

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ KURUTMA
SİSTEMİNDE ELMA KURUTULMASININ İNCELENMESİ**

HALİL ATALAY

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI-PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. OLCAY KINCAY**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ KURUTMA
SİSTEMİNDE ELMA KURUTULMASININ İNCELENMESİ**

Halil ATALAY tarafından hazırlanan tez çalışması 02/12/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Olcay KINCAY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Yrd. Doç. Dr. M.Turhan ÇOBAN
Ege Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Galip TEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Zafer UTLU
İstanbul Aydın Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN
Marmara Üniversitesi

Prof.Dr. Z.Düriye BİLGE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet CİHAN
Beykent Üniversitesi

Bu alışma, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 0348.STZ.2013-2 numaralı “Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolama Sistemli Ziraı Ürün Kurutma Sisteminin Geliştirilmesi”başlıklı SAN-TEZ projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve görüşlerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof.Dr.Olcay KINCAY'a ve Yrd. Doç. Dr. M.Turhan ÇOBAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez izleme jürisinde bulunan ve görüşleriyle yol gösteren Prof. Dr. Galip TEMİR'e, Prof. Dr.Zafer UTLU'ya ve Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN'a değerli katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini benden esirgemeyen ve her zaman yanımda olan annem Aytül DİNÇ'e, babaannem Emine ATALAY'a, annanem Semra DİNÇ'e ve kardeşim Seda ŞENOL'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, manevi desteklerinden güç aldığım, yardımlarını benden esirgemeyen değerli arkadaşım Özden KUYUMCU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Deney düzeneğinin kurulmasını sağlayan ve deneysel çalışmalar süresince desteklerini esirgemeyen Türkoğlu Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. firması sahibi Yusuf TÜRKOĞLU'na ve firma çalışanlarına katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca 0348.STZ.2013-2 nolu San-Tez Projesi olarak desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve proje sorumlumuz Aziz Burak YALÇIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık, 2015

Halil ATALAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ	xx
ÖZET	xxi
ABSTRACT	xxiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	10
1.3 Hipotez	13
BÖLÜM 2	
KURUTMA İŞLEMİ VE KURUTMA EKİPMANLARI	14
2.1 Kurutma İşlemi	15
2.2 Kurutucu Sistemleri	20
2.2.1 Endüstriyel Kurutucular	20
2.2.2.1 Direkt Kurutucular	21
2.2.2.2 İndirekt Kurutucular	21
BÖLÜM 3	
KURUTMA SİSTEMİ MODELİ	26
3.1 Kurutulacak Ürünün Belirlenmesi	26
3.2 Kurutma Sistemlerinde Verim Tanımı	30
3.3 Kurutma İşlemi Sırasında Meydana Gelen Kütle Transferinin Modellenmesi	31

3.4	Kurutma İşlemi Sırasında Meydana Gelen Isı Transferinin Modellenmesi	33
3.5	Simülasyon Çalışması	34

BÖLÜM 4

GÜNEŞ ENERJİLİ VE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI....37

4.1	Güneş Toplayıcı Sistem.....	40
4.2	Kurutma Kabini	41
4.3	Atık Isı Geri Kazanım Sistemi(Rekuperatör Ünitesi).....	42
4.3.1	Rekuperatör Ünitesinin Isıl Analizi	43
4.3.1.1	Rekuperatör Ünitesinde Plaka Üzerinde Sıcaklık Dağılımı	50
4.4	Güneş Enerjili Kurutucu Enerji Depolama Sistemi.....	54
4.4.1	Çakıl Taşı Enerji Depolama Sisteminin Isıl Analizi ve Modellenmesi.....	56
4.4.1.1	Çakıl Taşı Yatağının Boyutlandırılması.....	58
4.4.1.2	Havalı Güneş Kolektörünün Modellenmesi	59
4.4.1.3	Çakıl Taşı Yatağının Modellenmesi	59
4.5	Ölçüm ve Test Cihazları	69

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR.....76

5.1	Kurutma Denemeleri.....	79
5.2	Kurutma Deneyi Sonuçları	81
5.2.1	1.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	81
5.2.2	2.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	84
5.2.3	3.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	87
5.2.4	4.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	90
5.2.5	5.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	94
5.2.6	6.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	97
5.2.7	7.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	100
5.2.8	8.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	104
5.2.9	9.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	107
5.2.10	10.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	111
5.2.11	11.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	116
5.2.12	12.Kurutma Deneyi Sonuçları.....	120
5.3	Ürün Kalınlığının Kurutma Süresine Etkisi	125
5.4	Kurutma Deneyi Sonuçlarının Isıl Analizi	126
5.5	Kurutma Modelinin Oluşturulması.....	131
5.6	Çakıl Taşı Enerji Depolama Sistemi ile İlgili Deneysel Çalışmalar.....	135
5.6.1	1.Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları	136
5.6.2	2.Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları	139
5.6.3	3.Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları	141
5.6.4	4.Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları	144
5.6.5	5.Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları	147
5.7	Ölçümlerden Kaynaklanan Hata Analizi.....	149

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER154

KAYNAKLAR.....167

EK-A

KURUTMA DENEYİ SONUÇLARI173

EK-B

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ DENEYİ SONUÇLARI185

ÖZGEÇMİŞ.....190

SİMGE LİSTESİ

A	Yüzey alanı(m ²)
A_c	Kolektör alanı (m ²)
a_e	Çakıl taşı yüzey alanı(m ²)
a_s	Çakıl taşına eşdeğer hacme sahip kürenin yüzey alanı(m ²)
c_p	Elma dilimi için özgül ısı değeri(KJ/kgK)
c	Rekuperatör ünitesine giren taze akışkan için özgül ısı değeri (KJ/kgK)
h	Rekuperatör iç akışkanı için özgül ısı değeri (KJ/kgK)
a	Havanın özgül ısı değeri(J/kgK)
s	Çakıl taşı özgül ısı değeri(J/kgK)
dA	Plaka üzerindeki her bir dilimin yüzey alanı(m ²)
D_{eff}	Elma dilimi için difüzyon katsayısı
D_e	Çakıl taşı çapı(mm)
D_h	Hidrolik çap(mm)
$\dot{m}_c$	Plaka üzerinde bölünen her bir bölümde bulunan taze akışkan debisi(kg/s)
$\dot{m}_h$	Plaka üzerinde bölünen her bir bölümde bulunan iç akışkan debisi(kg/s)
D_0	Pre-exponential faktörü

dQ	Plaka üzerinde bölünen her bir parçanın yüzeyinden geçen ısı transfer miktarı(W)
dz	Plaka üzerinde bölünen her bir bölümün boyu(m)
E_a	Aktivasyon enerjisi(J/mol)
E_g	Enerji girişi (tüm sistem için) (kWh)
f	Sürtünme faktörü(boyutsuz)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
i	İç ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
d	Dış ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
x	x yönündeki ısı taşınım katsayısı(W/m^2K)
y	y yönündeki ısı taşınım katsayısı(W/m^2K)
h_v	Hacimsel ısı transfer katsayısı (W/m^3K)
I	Güneş enerjisinden gelen ışınlam miktarı(W/m^2)
i	x yönündeki sonlu fark adım sayısı
j	y yönündeki sonlu fark adım sayısı
k_t	Metal ısı iletim katsayısı (W/mK)
L	Çakıl taşı yatağı uzunluğu(m)
a	Rekuperatör plaka uzunluğu (m)
m	Metal et kalınlığı (m)
m_0	$t=0$ anında kurutulan ürünün kütlesi (kg)
M	Elma kütlesi(kg)
s	Kurumuş elma kütlesi(kg)
t	$t=t$ anında kurutulan ürünün kütlesi (kg)
w	Ürün nem kütlesi(kg_{H_2O})
w_a	Üründen uzaklaşan nem kütlesi (kg_{H_2O})
w_b	Üründen uzaklaşacak nem kütlesi (kg_{H_2O})

w_c	Üründen uzaklaştırılan nem miktarı ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$)
$\dot{m}_a$	Havanın kütleli debisi (kg/s)
$M_{d,i}$	Ölçüm anındaki nem değeri($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{km}}$)
$d_{0,0}$	İlk nem değeri($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{km}}$)
e	Denge nem değeri($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{km}}$)
Nu	Nusselt sayısı (boyutsuz)
P	Çevre uzunluğu(m)
Pr	Prandtl sayısı (boyutsuz)
$\dot{Q}$	Rekuperatör plakalarından geçen toplam ısı transferi (W)
Q_a	Çakıl taşı enerji yatağındaki kullanılabilir enerji miktarı(MJ)
t	Çakıl taşı enerji yatağında oluşan termal enerji miktarı(MJ)
$\dot{Q}_u$	Güneş kolektöründen gelen yararlı ısı miktarı(W)
Re	Reynold sayısı (boyutsuz)
R_{hg}	Sıcak gaz için kirlilik direnci ($\text{m}^2\text{K/W}$)
R_{sg}	Soğuk gaz için kirlilik direnci($\text{m}^2\text{K/W}$)
t	Çakıl taşı yatağının şarj (doldurma)süresi (saniye)
a	Kuruma süresi (saat)
k	Kurutma süresi(saniye)
$\bar{T}$	Ortalama sıcaklık değişimi ($^{\circ}\text{C}$)
T_0	Havanın kolektörden çıkış sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)
a	Sistem içindeki hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
a_i	Havanın çakıl taşı yatağına giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
a_{mb}	Çevre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

b_i	Çakıl taşı yatağı başlangıç sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)
c	Soğuk akışkan sıcaklığı(K)
h	Sıcak akışkan sıcaklığı (K)
i	Kolektör içindeki hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
U	Toplam ısı transfer katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
$\dot{V}$	Kurutma havası hacimsel debisi(m^3/s)
V_b	Çakıl taşı yatağı hacmi (m^3)
s	Depolanan çakıl taşının toplam hacmi(m^3)
w	Özgül nem değeri($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ kuru hava)
w_1	Kurutucu girişindeki özgül nem değeri($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ kuru hava)
w_2	Kurutucu çıkışındaki özgül nem değeri($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ kuru hava)
w_a	Kurutucu çıkışındaki havanın doyma özgül nem değeri $\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ k hava)
W	Plaka Genişliği (m)
$\dot{W}_{fan}$	Fan gücü (MJ/s)
X	Elma dilimi için nem değeri ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ kuru ağırlık)
X_i^*	Elma dilimi için ortalama nem değeri($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg}$ kuru ağırlık)
ΔP	Basınç düşümü (Pa)
Δt	Zaman aralığı (dakika)
η_{th}	Kolektör verimi(boyutsuz)
ε	Boşluk oranı(boyutsuz)
μ	Akışkan dinamik viskozitesi(kg/ms)
λ	Gizli buharlaşma ısısı (J/kg)
ρ	Kurutma havası yoğunluğu(kg/m^3)
ρ_a	Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)

ρ_{hava}	Havanın yoğunluğu(kg/m ³)
ρ_s	Çakıl taşı yoğunluğu(kg/m ³)
ϕ	Yuvarlaklık oranı(boyutsuz)

KISALTMA LİSTESİ

EPS	Boşluk oranı
KA	Kuru Ağırlık
KM	Kuru Madde
MER	Nem alma verimi(hızı)
MR	Nem oranı(kg _{H2O} /h)
SMER	Özgül nem alma hızı(kg _{H2O} /kWh)
SO	Su Oranı
SP	Yuvarlaklık oranı
W	Su(Water)
YA	Yaş Ağırlık

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Kuruma hızının özgül nem değişimine göre kuruma eğrisi16
Şekil 3.1	Elma dilimi içerisindeki su içeriğinin kuru ve yaş baza göre değişimi29
Şekil 3.2	Kuru ağırlığa göre elma dilimi üzerinde sıcaklık dağılımının gösterilişi.....35
Şekil 3.3	Kuru ağırlığa göre elma dilimi üzerinde nem dağılımının gösterilişi.....35
Şekil 3.4	Yaş ağırlığa göre elma dilimi üzerinde sıcaklık dağılımının gösterilişi.....36
Şekil 3.5	Yaş ağırlığa göre elma dilimi üzerinde nem dağılımının gösterilişi.....36
Şekil 4.1	Güneş enerjili ve enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi akış şeması.....37
Şekil 4.2a	Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi montaj resmi (önden görünüş)39
Şekil 4.2b	Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi montaj resmi (arkadan görünüş)39
Şekil 4.3	Güneş toplayıcı sistemin şematik resmi40
Şekil 4.4	Güneş toplayıcı sistem(havalı güneş kolektörü)montaj resmi40
Şekil 4.5	Kurutma kabini şematik resmi41
Şekil 4.6a	Kurutma kabini montaj resmi (yapım aşaması)42
Şekil 4.6b	Kurutma kabini montaj resmi(son hali).....42
Şekil 4.7	Rekuperatör üzerindeki sıcaklık dağılımının şematik gösterimi43
Şekil 4.8	Çapraz akışlı ısı değiştirici üzerindeki genel sıcaklık dağılım konfigürasyonu43
Şekil 4.9	Rekuperatör plaka sonlu fark gösterimi44
Şekil 4.10	Isı değiştirici sonlu eleman analizi sıcaklık profili kontur grafiği.....52
Şekil 4.11	Isı değiştirici sonlu eleman analizi soğuk hava profili52
Şekil 4.12	Isı değiştirici sonlu eleman analizi sıcak hava profili.....52
Şekil 4.13	Isı değiştirici sonlu eleman analizi toplam ısı transferi katsayısının (W/m^2K) yerel değişimi53
Şekil 4.14	Isı değiştirici sonlu eleman analizi sıcak ve soğuk hava toplam ısı transferi katsayısı profillerinin 3 boyutlu görünümü53
Şekil 4.15	Rekuperatör(ısı değiştirici) resmi54
Şekil 4.16	Çakıl taşı enerji depolama sistemine ait akış şeması55
Şekil 4.17	Çakıl taşı enerji depolama sistemi açık hali55
Şekil 4.18	Çakıl taşı enerji depolama sistemi kapalı hali56
Şekil 4.19	Çakıl taşı enerji depolama sistemi montaj resmi.....56
Şekil 4.20a	Çakıl taşı yatağında N tane elementin şematik gösterimi60

Şekil 4.20b	Çakıl taşı yatağında "m." elementin şematik gösterimi.....	60
Şekil 4.21	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımındaki değişim.....	64
Şekil 4.22	Şarj süresi boyunca kolektörden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi.....	64
Şekil 4.23	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağındaki ısı enerjisi miktarındaki değişimi	65
Şekil 4.24	Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağındaki toplam ısı enerjisi miktarındaki değişim	65
Şekil 4.25	Şarj süresi boyunca farklı boşluk ve yuvarlaklık oranlarına göre çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerji miktarı değişimi	66
Şekil 4.26	Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağı içindeki toplam kullanılabilir enerji miktarındaki değişim	66
Şekil 4.27a	Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağındaki ortalama sıcaklık değerindeki değişim	67
Şekil 4.27b	Yuvarlaklık oranına göre çakıl taşı yatağındaki ortalama sıcaklık değerindeki değişim	67
Şekil 4.28	Basınç düşümünün şarj süresi boyunca değişimi	68
Şekil 4.29	Fan tarafından tüketilen enerji miktarının şarj süresi boyunca değişimi.....	68
Şekil 4.30	Hava akış miktarının şarj süresi boyunca değişimi.....	69
Şekil 4.31	Datalogger resmi.....	70
Şekil 4.32	Bağıl nem ölçüm sensörü resmi.....	70
Şekil 4.33	Thermocouple ve datalogger güç kaynağı resmi	71
Şekil 4.34	Anemometre (hava hızı ölçüm cihazı) resmi.....	71
Şekil 4.35	Fark basıncı sensörü resmi	71
Şekil 4.36	Basınç sensörü resmi.....	72
Şekil 4.37	Piranometre(güneş enerjisi ölçüm cihazı) resmi	72
Şekil 4.38	Hassas terazi resmi.....	72
Şekil 4.39	Sıcaklık ölçüm cihazlarını kalibre etmek için kullanılan Julobo FK30-SL kalibrasyon banyosunun resmi.....	74
Şekil 4.40	Nem kalibrasyon cihazı TESTO HUMINATOR.....	74
Şekil 4.41	Basınç kalibratör cihazı GE DRUCK PV622+DPI620+PM620.....	75
Şekil 5.1	Elmaları dilimlemek için kullanılan salam dilimleme makinesi resmi.....	77
Şekil 5.2	Çekirdek yuvaları çıkartılmış elma dilimleri.....	80
Şekil 5.3	Dilimlenerek tepsilere yerleştirilen elma dilimleri.....	80
Şekil 5.4	Kurutma işlemi sonrası elmaların tepsideki görünüşü.....	80
Şekil 5.5	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:1).....	81
Şekil 5.6	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:1).....	82
Şekil 5.7	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:1).....	82
Şekil 5.8	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:1)	82
Şekil 5.9	Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi(deney no:1)	83
Şekil 5.10	5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:1)	83

Şekil 5.11	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:2).....	84
Şekil 5.12	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:2).....	85
Şekil 5.13	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:2).....	85
Şekil 5.14	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:2).....	85
Şekil 5.15	Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi(deney no:2).....	86
Şekil 5.16	5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:2).....	86
Şekil 5.17	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:3).....	88
Şekil 5.18	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:3).....	88
Şekil 5.19	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:3).....	88
Şekil 5.20	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:3).....	89
Şekil 5.21	Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi(deney no:3).....	89
Şekil 5.22	5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:3).....	89
Şekil 5.23	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:4).....	91
Şekil 5.24	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:4).....	91
Şekil 5.25	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:4).....	92
Şekil 5.26	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:4).....	92
Şekil 5.27	Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi(deney no:4).....	92
Şekil 5.28	5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:4).....	93
Şekil 5.29	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:5).....	94
Şekil 5.30	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:5).....	95
Şekil 5.31	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:5).....	95
Şekil 5.32	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:5).....	95
Şekil 5.33	Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi(deney no:5).....	96
Şekil 5.34	6mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:5).....	96
Şekil 5.35	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:6).....	98
Şekil 5.36	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:6).....	98
Şekil 5.37	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:6).....	98
Şekil 5.38	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:6).....	99
Şekil 5.39	Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi(deney no:6).....	99
Şekil 5.40	6mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:6) ...	100
Şekil 5.41	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi (deney no:7).....	101
Şekil 5.42	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi(deney no:7).....	101
Şekil 5.43	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi(deney no:7).....	102
Şekil 5.44	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değişimi(deney no:7).....	102

Şekil 5.45	Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değışimi(deney no:7)....	102
Şekil 5.46	6mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:7) ...	103
Şekil 5.47	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değęerlerinin zamana göre değışimi (deney no:8).....	104
Şekil 5.48	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değęerinin zamana göre değışimi(deney no:8).....	105
Şekil 5.49	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değışimi(deney no:8)	105
Şekil 5.50	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değışimi(deney no:8)	105
Şekil 5.51	Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değışimi(deney no:8)....	106
Şekil 5.52	5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:8) ...	106
Şekil 5.53	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değęerlerinin zamana göre değışimi (deney no:9).....	108
Şekil 5.54	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değęerinin zamana göre değışimi(deney no:9).....	108
Şekil 5.55	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değışimi(deney no:9).....	109
Şekil 5.56	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değışimi(deney no:9)	109
Şekil 5.57	Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değışimi(deney no:9)....	109
Şekil 5.58	Farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:9)..	110
Şekil 5.59	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değęerlerinin zamana göre değışimi (deney no:10).....	112
Şekil 5.60	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değęerinin zamana göre değışimi(deney no:10).....	113
Şekil 5.61	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değışimi(deney no:10).....	113
Şekil 5.62	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değışimi(deney no:10)	113
Şekil 5.63	Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değışimi(deney no:10)..	114
Şekil 5.64	Farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:10)	114
Şekil 5.65	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değęerlerinin zamana göre değışimi (deney no:11).....	117
Şekil 5.66	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değęerinin zamana göre değışimi(deney no:11).....	117
Şekil 5.67	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değışimi(deney no:11).....	118
Şekil 5.68	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değışimi(deney no:11)	118
Şekil 5.69	Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değışimi(deney no:11)..	118
Şekil 5.70	Farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:11)	119
Şekil 5.71	Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değęerlerinin zamana göre değışimi (deney no:12).....	121
Şekil 5.72	Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değęerinin zamana göre değışimi(deney no:12).....	121
Şekil 5.73	Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değışimi(deney no:12).....	122
Şekil 5.74	Kabin içindeki hava basıncının zamana göre değışimi(deney no:12)	122
Şekil 5.75	Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değışimi(deney no:12)..	122
Şekil 5.76	Farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için kuruma periyodları(deney no:12)	123
Şekil 5.77	Farklı kalınlıklarındaki elma dilimleri için nem içeriğinin zamana göre değışimi	125
Şekil 5.78	6mm,8mm ve 10mm kalınlıklarındaki elma dilimleri için nem oranının zamana göre değışimi	126

Şekil 5.79	5mm,7mm ve 9mm kalınlıklarındaki elma dilimleri için nem oranının zamana göre değişimi	126
Şekil 5.80	5mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 1. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi.....	127
Şekil 5.81	6mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 5. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi.....	128
Şekil 5.82	Farklı kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 9. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi.....	128
Şekil 5.83	Kurutma sisteminin tam kapasite çalıştırıldığı 10. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi.....	129
Şekil 5.84	5mm kalınlıktaki elma dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı ve deneysel verilerin karşılaştırılması(4. kurutma deneyi)	132
Şekil 5.85	6mm kalınlıktaki elma dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı ve deneysel verilerin karşılaştırılması(5. kurutma deneyi)	132
Şekil 5.86	6mm kalınlıktaki elma dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı ve deneysel verilerin karşılaştırılması(6. kurutma deneyi)	133
Şekil 5.87	6mm,8mm ve 10mm kalınlığa sahip elma dilimleri için yapılan kurutma deneyi sonuçlarının önceden tahmin edilen nem oranı değerleri ile karşılaştırılması (11.kurutma deneyi verileri kullanılmıştır.).....	134
Şekil 5.88	5mm,7mm ve 9mm kalınlığa sahip elma dilimleri için yapılan kurutma deneyi sonuçlarının önceden tahmin edilen nem oranı değerleri ile karşılaştırılması (12.kurutma deneyi verileri kullanılmıştır.).....	135
Şekil 5.89	Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi (deney no:1).....	137
Şekil 5.90	Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi(deney no:1)	137
Şekil 5.91	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi(deney no:1).....	138
Şekil 5.92	Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi (deney no:1).....	138
Şekil 5.93	Şarj süresi boyunca güneş ışıınının zamana göre değişimi (deney no:1)	138
Şekil 5.94	Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre Değişimi(deney no:1)	138
Şekil 5.95	Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi (deney no:2).....	139
Şekil 5.96	Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi(deney no:2)	140
Şekil 5.97	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi(deney no:2).....	140
Şekil 5.98	Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi (deney no:2).....	140
Şekil 5.99	Şarj süresi boyunca güneş ışıınının zamana göre değişimi (deney no:2)	141
Şekil 5.100	Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre Değişimi(deney no:2)	141

Şekil 5.101	Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenlen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi (deney no:3)	142
Şekil 5.102	Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi(deney no:3)	142
Şekil 5.103	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi(deney no:3).....	143
Şekil 5.104	Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi (deney no:3).....	143
Şekil 5.105	Şarj süresi boyunca güneş ışıınının zamana göre değişimi (deney no:3)	143
Şekil 5.106	Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre Değişimi(deney no:3)	144
Şekil 5.107	Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenlen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi (deney no:4).....	145
Şekil 5.108	Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi(deney no:4)	145
Şekil 5.109	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi(deney no:4).....	145
Şekil 5.110	Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi (deney no:4).....	146
Şekil 5.111	Şarj süresi boyunca güneş ışıınının zamana göre değişimi (deney no:4)	146
Şekil 5.112	Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre Değişimi(deney no:4)	146
Şekil 5.113	Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenlen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi (deney no:5).....	147
Şekil 5.114	Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi(deney no:5)	148
Şekil 5.115	Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi(deney no:5).....	148
Şekil 5.116	Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi (deney no:5).....	148
Şekil 5.117	Şarj süresi boyunca güneş ışıınının zamana göre değişimi (deney no:5)	149
Şekil 5.118	Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre Değişimi(deney no:5)	149
Şekil 6.1	Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü’nde yapılan testlere ilişkin fotoğraflar.....	162
Şekil 6.2	Doğal kurumaya bırakılan ürünlerin kuruma sonrası durumu	164

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1	Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri	23
Çizelge 2. 2	Farklı kurutucu tiplerine göre enerji tüketim değerleri.....	24
Çizelge 4. 1	Hava için özgül ısı değeri kısmi devamlı denklem katsayıları.....	49
Çizelge 4. 2	Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili işletme parametreleri	57
Çizelge 4. 3	Ölçüm ve test cihazları özellikleri	73
Çizelge 5. 1	Yapılan kurutma deneylerinde farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için özgül nem alma hızlarının ve nem alma verimlerinin karşılaştırılması	130
Çizelge 6. 1	Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi için sabit giderler	160
Çizelge 6. 2	Elektrikli Kurutma Sistemi için sabit giderler	161
Çizelge 6. 3	Kurutulmuş elma dilimlerine ilişkin nem ve su aktivitesi tayini deney sonuçları	163
Çizelge 6. 4	Kurutulmuş elma dilimleri için renk analizi sonuçları.....	163
Çizelge 6. 5	Kurutulmuş elma dilimleri için doku profili analizi sonuçları.....	164

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ KURUTMA SİSTEMİNDE ELMA KURUTULMASININ İNCELENMESİ

Halil ATALAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Olcay KINCAY

Eş Danışman: Yrd.Doç. Dr. M.Turhan ÇOBAN

Zirai ürünlerin hijyenik şartlarda kurutulması çok büyük bir öneme sahiptir. Tarımsal ürünler ülkemizde genellikle yere serilerek kurutulmaktadır. Bu durumda aflatoksin gibi zararlı etkilerin ürün kalitesini etkilemesi söz konusu olmaktadır. Ürün kurutucuları ise ürünün daha sağlıklı şartlar altında kurutulmasını sağlarlar. Bu çalışma kapsamında güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sistemi geliştirilerek, güneş enerjili kurutucuda performansa etki eden faktörler deneysel olarak belirlenmiştir. Isıl enerji depolama sistemi olarak izolasyonlu çakıl taşı yatağı sistemi tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen bu sisteme entegre edilen reküperatör(çapraz akışlı ısı değiştirici) ünitesi ile elde edilen olan atık ısının yaklaşık %50-60 oranında geri kazanılması söz konusu olmuştur.

Geliştirilen bu sistemde zirai ürün olarak elma kurutulmuştur. Çalışmada sarı ve yeşil renkli golden elma tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde 5-10 mm arasında değişen kalınlıklarda elma dilimlerinin kuruma davranışları incelenmiştir. Deney süresince sistemin özellikle giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen sensörler ile sistem içerisindeki sıcaklık, bağıl nem, basınç ve hava hızı değerleri ölçülerek elde edilen veriler datalogger ile veritabanına aktarılmıştır. Bununla birlikte 0,01 gr. hassasiyete sahip terazi ile de kurutulan ürünlerden alınan numunelerin ağırlık değişimleri 30

dakika ara ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar süresince kabin içerisindeki kuruma süreleri 55⁰C- 63⁰C arasında değişen sıcaklıklarda genellikle 6 saat olarak belirlenmiştir. Sistemin tam kapasite çalıştırılması durumunda kabin giriş ve çıkışı arasındaki bağıl nem farkı en yüksek %16, hava hızı farkı 1.05 m/s, özgül nem çekme hızı (SMER) 2.502 kg_{H2O}/kWh ve nem alma verimi(MER) 4.14 kg_{H2O}/h olarak bulunmuştur.

Deney numunelerinin bazıları Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne iletilerek burada renk, doku, tat, nem tayini ve su aktivitesi açısından teste tabi tutulmuş olup bu çalışmalar sonucunda kurutulan elma dilimlerinin özellikle nem tayinlerinin %10'nun ve su aktivitesi değerlerinin de 0.7'nin altında çıkmasından dolayı kuru madde olarak kabul edilebileceği ve uzun süre bozulmadan kalabileceği ortaya çıkmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda güneş enerjisi destekli ve enerji depolama sistemli kurutma sisteminin düşük nem ve sıcaklık değerleri arasında çalışmasından dolayı kurutulan ürünün kalitesinde de olumlu etkisinin bulunduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen güneş enerjisi destekli kurutma sistemi ile benzer kapasiteye sahip elektrikli kurutma sistemlerinin enerji tüketimi ile ilk yatırım ve işletme maliyetleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Elektrikli kurutma sistemi günde ortalama 35KWh enerji tüketirken güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sistemi ise fanlar ve reküperatör ünitesinden dolayı günde ortalama 8.12KWh enerji tüketmektedir. Dolayısıyla, geliştirilen bu sistem sayesinde kurutma işleminde elektrik enerjisinden yaklaşık %76.8 oranında tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca her iki sistem de benzer kapasitede çalıştırıldığında bu çalışma kapsamında geliştirilen güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sisteminin kendisini 6 ay içinde , benzer kapasiteye sahip elektrikli kurutma sisteminin ise kendisini 12 ay içinde amorti edebildiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Güneş Enerjisi, Kurutulmuş Elma, Çakıl Taşı Enerji Depolama Sistemi, Yenilenebilir Enerji Sistemleri...

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE DRYING PROCESS OF APPLES BY USING SOLAR ENERGY AND THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM

Halil ATALAY

Department of Mechanical Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Olcay KINCAY

Co-Adviser: Ass.Prof. Dr. M. Turhan ÇOBAN

Drying of agricultural products under hygienic conditions has a great significance. In our country, these products are generally dried by laying on the ground, but products dried by this method are prone to harmful affects like aflatoxin which degrades the quality of the products. Driers which are used for this purpose, maintain drying to take place under healthy conditions. In this work, drying system was improved by using solar air heater and thermal energy storage system. An insulated packed bed (flint stone bed) was used as the heat storage medium. So, the parameters affecting the performance of solar drier and packed bed thermal energy storage system were obtained experimentally. Furthermore 50 to 60% of the waste energy was recovered by using a recuperative system.

Apple(golden delicious) was dried in this study. Drying behaviour was investigated for six different apple slices(between 5-10mm sliced rings) Measurements of temperature, relative humidity, air speed and pressure into system were recorded with datalogger. The values of the mass of the apple slices were measured every 30 minutes during experiments. During experimental studies, drying times were determined for between 55⁰C- 63⁰C temperature values as a 6 hours. When operating at full capacity of the system, maximum relative humidity difference was found %16, maximum air speed

difference was found 1,05 m/s between entry and exit of drying cabin . However, the value of the SMER(Specific Moisture Extraction Rate) was determined 2.502 kg_{H2O}/kWh and the value of the MER(Moisture Extraction Rate) was determined 4.14 kg_{H2O}/h.

Some of the test specimens was transmitted Ege University Food Engineering Department for testing of apple slices in color, fiber, taste, determination of moisture and water activity.

In the result of the tests, dried apple slices, especially due to determination of moisture values below %10 and water activity values below 0.7, can be accepted dry matter and can be resisted deterioration for a long time. Also, it is observed that the drying is affected positively the quality of the product because the agricultural product dryer is worked between low moisture and temperature values.

In this work, the solar energy assisted drying system was compared with electrical drying system which has a similar capacity in energy consumption and initial investment and operation costs. Electrical drying system consumes 35 kWh of energy per day. The agricultural product drying system, due to fans and recuperative unit only, consumes 8.12kWh of energy per day. So, because of developing this system, by 76.8% from the electrical energy was saved up in drying process. In addition, when both the two systems are also operated at similar capacity, the agricultural product drying system can be amortized within 6 months but electrical drying system can be amortized within 12 months.

Keywords: Drying, Solar Energy, Dried Apple, Packed Bed Thermal Energy Storage, Renewable Energy Resources...

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde ürünlerin daha teknik metotlarla kurutularak iç ve dış piyasaya daha kaliteli olarak sürülmesi son derece önemli hale gelmiştir. Üründeki kalite değerleri ürünün son nem miktarı (kurutma sonrası), ürünün kurutma sonrası su aktivitesi değeri, üründeki aflatoksin miktarı, ürünün aroması, ürünün rengi ve ürünün dayanıklılığı olarak sıralanabilir.

Gıdaların kurutulması, insanlığın tabiattan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Gerçekten bu metot tabiatta çoğu zaman kendi kendine gerçekleşmekte ve örneğin, çeşitli tahıllar, baklagiller ve zirai ürünler tarlada kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir. Doğada kuruma, güneş enerjisiyle gerçekleşmekte olduğundan, kurumanın her yerde ve her zaman bu yolla olması imkânsızdır. Her ürünün güneşte kurutulması doğru değildir. Bu yüzden birçok ürünün diğer metotlarla kurutulma yolları geliştirilmiştir.

Kurutmanın uygulandığı en yaygın alanlar; gıda sanayi, deri sanayi, tarım sektörü, kimya sanayi, silah sanayi ve orman ürünleri sanayi olarak özetlenebilir. Bu alanlara kurutma işlemi uygulanarak ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma, kullanım ve işleme kolaylığı vb. avantajlar kazandırılması da eklenebilir. Gıda maddelerinde kurutma işlemi daha çok meyve ve sebzelere uygulanmaktadır. Kuru meyvelerin anavatanı ve binlerce yıllık üretim alanı olan Türkiye’de kuru meyveler tarih boyunca ve günümüzde özellikle dış ticaret gelirlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Türkiye’de kuru meyve

yetiştiriciliğinin çok eski ve üretimin fazla olmasında bu meyvelerin kolay hasat, muhafaza ve nakil edilebilir oluşlarının, ekolojik imkanların uygunluğunun ve doğal olarak yetişmiş olmalarının büyük payı vardır.

Günümüzde gıda kurutma sistemleri ve kurutulmuş ürünlerle ilgili birçok çalışma yapılmış olup bu konularla ilgili olarak hem deneysel hem de matematiksel metotlarla kurutma parametreleri incelenmiştir. Gıda maddelerinin kuruma özellikleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle kurutmada kullanılan havanın sıcaklığı, bağıl nemi, hızı ve ürüne göre akım yönü, ısı ve kütle transferi olaylarının etkilerinin belirlenmesi gerekir. Bu konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların bazıları aşağıda yer almaktadır:

Lee ve Kim[1], çalışmalarında ince dilimlenmiş kırmızı turpu ısı pompalı kurutucuda kurutmuşlardır. Ayrıca karşılaştırma için sıcak havalı ısıtıcı ile de kurutmuşlardır. Isı pompasında özgül nem alma oranı $3.4 \text{ kg}_w/\text{kWh}$ değerlerine ulaşılmıştır. Sıcak havalı kurutmaya göre 1-1.5 kat uzun sürmesine karşın ısı pompalı kurutucunun enerji kazancının yaklaşık üç kat daha iyi olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca kurutma havası sıcaklığı arttığında bağıl nemin düştüğü ve nem alma oranı ile özgül nem çekme oranı değerlerinin arttığı görülmüştür. Çalışma ayrıca ısı pompalı kurutmanın, sıcak havalı kurutmaya göre % 58.9 - 69.5 oranında enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir.

Queiroz vd. [2], yaptıkları çalışmada elektrik rezistanslı ve ısı pompalı farklı iki kurutucuda domates kurutmuşlar ve performanslarını incelemişlerdir. Ayrıca kurutmayı matematiksel model ile desteklemişlerdir. Kurutma havasını paralel ve karşıt akışlı olarak iki farklı şekilde kullanmışlardır. Sıcaklık, hava hızı ve domates tiplerinin etkilerini incelemişlerdir. Isı pompalı kurutucunun efektif COP değerini 2.56-2.68 arasında hesaplamışlardır. Elektrik rezistanslı kurutucuya göre ısı pompalı kurutucunun enerji bakımından %40 daha ekonomik olduğunu göstermişlerdir. Matematiksel model olarak da Page modelini kullanmışlardır. Bu modelde parametrelerin en çok kurutma sıcaklığıyla etkilendiğini belirtmişlerdir.

Hawlder vd.[3], Singapur'da yaptığı çalışmada güneş enerjisi destekli ısı pompası kurutma sistemi tasarlayıp testlerini yapmıştır. Sistemde soğutucu akışkanı buharlaştırmak için dış ortam havası sıcaklığı kullanılmış olup, ayrıca kurutma havasını ısıtmak için de havalı güneş kolektörü kullanılmıştır. Bunun dışında kurutucu girişine bir

de harici ısıtıcı konmuştur. Isı pompası içinde kullanılan akışkan R-134a dır. Sistem ile ilgili olarak sıcaklık, basınç, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgar hızı değerleri ölçümü yapılmıştır. Ölçüm cihazları için hata analizi metodu kullanılmış ve ± 3.5 bulunmuştur. ASHRAE test standartlarına göre kolektör testleri yapılmış ve en yüksek verimin hava debisinin artmasıyla elde edildiği görülmüştür. Verim değerleri 0.036 kg/s ve 0,06 kg/s hava debileri için sırasıyla %69-73 ve %72-75 olarak elde edilmiştir. Havalı kolektör veriminin giren havanın neminin alınmasıyla arttığı görülmüştür. Soğutucu akışkanın buharlaştırıcı kolektöre daha düşük sıcaklıkta girmesinden dolayı verimin havalı kolektör verimine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu verim %87 ve %76 değerlerindedir.

Akpınar[4], kırmızıbiber dilimlerinin ince tabaka kurutma işleminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Araştırmada, konvektif tip kurutucuda 55 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklık değerlerinde ve 1.5 m/s hava hızında kurutma işlemi gerçekleştirmiştir. Termodinamiğin I. kanunu kullanılarak enerji analizi ve termodinamiğin II. kanunu uygulanarak ekserji analizi yapılmıştır.

Aghbashio vd.[5], yaptıkları çalışmada yarı endüstriyel bir bantlı kurutucunun performans analizini incelemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmada havuç dilimleri kurutulmuştur. Enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Havuçlar 5 mm kalınlığında 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıkta, 0.61, 1.22 ve 1.83 kg/s hava debisinde ve $2.98 \cdot 10^{-4}$, $3.48 \cdot 10^{-4}$ ve $4.16 \cdot 10^{-4}$ kg/s besleme oranlarında kurutulmuştur. Kurutma parametreleri, ürün kütle kaybı, enerji kullanımı, enerji kullanım oranı, ekserji kaybı ve ekserji verimliliği şeklinde incelenmiştir. Her bantta 250 gram yaş ürün kullanılmış %51.6-%84.4 oranında kütle kaybı izlenmiştir. Enerji kullanımı ve enerji kullanım oranı sırasıyla 3.78- 25.57 kJ/s ve 0.1554-0.3752 dir. Ekserji kaybı ve ekserji verimi ise 0.6677- 14.1577 ve 0.5527- 0.9329 dur. Ayrıca çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Ürün kütle kaybı, enerji kullanımı, enerji kullanım oranı ve ekserji kaybı kurutma hava sıcaklığı arttıkça artmakta fakat ekserji verimliliği düşmektedir. Ürün kaybı, enerji kullanımı, ekserji kaybı ve ekserji verimliliği kurutma hava hızıyla artmakta fakat enerji kullanım oranı düşmektedir.

Vazquez vd.[6], İspanya’da yaptıkları deneysel çalışmalarıda üzüm kurutmuşlardır. Isı pompalı kapalı çevrim bir kurutma düzeneği kurulmuştur. Bu kurutucuda farklı üzümler, değişik hava hızı ve sıcaklıklarında kurutulabilmektedir. Üzümlerin dış ortamda 40 gün gibi uzun sürelerde kurumasına karşın bu sistemde 24 saatte kurutma sağlayabilmişlerdir. Ayrıca zeytinyağı, K_2CO_3 gibi solüsyonlarla ön işlem yapılması kurutma süresinde azalmayı sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Renk ve üzüm kalitesinin bozulmadığını da bildirmişlerdir. Bu tür bir cihazın endüstriyel boyutta yapılmasının uygun olabileceğini söylemişlerdir.

Chou ve arkadaşları[7], ısı pompalı kurutucuda tarımsal ve deniz ürünlerini (mantar, meyveler ve istiridye) kurutmuştur. Isı pompalı kurutucularda planlanmış kurutma şartları ile tarımsal ve deniz ürünlerinin kalitesinin arttırılabileceğini ifade etmişler.

Teeboonma ve arkadaşları[8], ısı pompalı meyve kurutucularının optimizasyonunu yapmış. Isı pompalı meyve kurutucularının optimum şartları belirlenirken en önemli faktörlerin dönüş havası oranı, evaporatör by-pass oranı, kütleli debi ve kurutma havası sıcaklığı olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri optimum hava debisini ve evaporatör by-pass hava oranını önemli bir biçimde etkilemektedir ifadesini kullanmıştır.

Prasertsan ve arkadaşları[9], ısı pompalı kurutucuda tarımsal gıdaları (muz) kurutmuştur. Isı pompalı kurutucuların yüksek nem miktarına sahip materyaller için daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Isı pompalı kurutucuların işletme maliyetlerinin daha ekonomik olmasının mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

Güngör ve Özbalta[10], çalışmalarında endüstride kullanılan kurutucuların sınıflandırılmasını, seçimine etki eden parametreleri, kurutma sistemlerinde kütle ve enerji dengelerini, kuruma hızının belirlenmesini, malzemenin nem içeriğini, kurutma sistemlerinde enerji tasarrufu ve kurutucu tasarımında dikkate alınması gereken önemli noktaları incelemişlerdir.

Tosun[11], ısı pompası destekli, ısı geri kazanımlı, rafli bir kurutucuyu bazı yüksek nemlilik oranına sahip tarım ürünlerini kurutmak üzere tasarlamış ve imalatını gerçekleştirmiştir. Sistemde iki kademeli yoğuşturucu kullanmıştır. Ön soğutucu olarak bir ısı değiştirici ilave edilmiş ve böylece ısı geri kazanımı sağlanmıştır. Elma kurutma

deneyindeki kuruma süreleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 435, 300, 300, ve 285 dakika sürmüştür. Aynı kurutma sıcaklıkları için sırasıyla kurutma havasının girişteki bağıl nemini %14, 16, 15, 11 ve çıkıştaki bağıl nemini %21, 23, 20, 21 olarak bulmuştur. Özgül nem alma değerlerini 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 0.46, 0.68, 0.61 ve 0.81 kg_w/kWh olarak hesaplamıştır. Nem alma oranı değerlerini ise 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 0.65, 0.99, 0.94 ve 1.2 kg_w/h olarak bulmuştur. COP değerlerini de 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 2.72, 2.62, 2.59 ve 2.81 olarak tespit etmiştir. Isı pompalı kurutucunun düşük nem ve sıcaklıkta çalışmasından dolayı kurutmanın ürün kalitesinde de olumlu etkisinin bulunduğunu gözlemlemiştir.

Olgun ve Rzayev [12], güneş enerjisi ile üç farklı sistemde fındığın kurutulmasını deneysel olarak incelemişler ve kabinet tipi, dolap tipi ve çadır tipi olmak üzere üç sistemde bulunduğu kurutmuşlardır. Yapılan sistemlerde, açık havada fındığın 82 saat civarında kuruduğu tespit edilerek; kabinet tipli kurutucuda ek ısıtıcı kullanılması durumunda 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığı durumda 50 saatte, çadır tipli kurutucuda 73 saatte, ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise 72-76 saat içerisinde fındığın kuruduğunu tespit etmişlerdir. Kurutulmuş olan fındıklardan alınan numuneler görüntü ve tat analizine de tabi tutulmuş ve ürünlerde herhangi bir bozulmaya rastlanılmamıştır. Sistemde ek ısıtıcı kullanıldığı durumda ise kurutma süresinin oldukça kısaldığı görülmüştür.

Ceylan vd.[13], ısı pompalı bir kurutma fırınının elma kurutulmasında kullanılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ayarlı kapak (damper) ile bağıl nemi daha düşük olan dış hava sisteme alınarak, sistem havasının neminin düşürülmesi sağlanmıştır. Elmalar; 40 °C'de, ortalama %20 bağıl nemde, 2.8 m/s hava hızında, 4.8 (g su / g kuru madde) su oranından 0.18 (g su / g kuru madde) su oranına kadar 3.5 saatte kurutulmuştur.

Aktaş M.[14], ısı pompası destekli PID kontrollü bir kurutucu tasarlamış, imal etmiş ve deneysel olarak incelemiştir. Tasarladığı ve imal ettiği bu kurutucu ile önemli bir gıda ürünü olan fındığı kurutmuş ve analiz etmiştir. Kurutma sisteminde kurutma havası sıcaklığı 50 °C, 45 °C ve 40 °C olarak seçilmiştir. Isı pompalı kurutucuda 50 °C, 45 °C ve

40 °C kurutma havası sıcaklığında fındıklar sırasıyla 24, 27 ve 30 saatte kurutulmuştur. Kurutma havası hızları 50 °C için 0.25 m/s, 45 °C için 0.32 m/s ve 40 °C için 0.38 m/s olarak değiştirmiştir. Isı pompalı kurutucunun COPws değerini 50 °C kurutma havası sıcaklığı için 1.70, 45 °C için 1.58 ve 40 °C için 1.40 olarak hesaplamıştır. Isı pompalı kurutucuda 50 °C kurutma havası sıcaklığı için %24 - %65 arasında, 45 °C için %17 - %63 arasında ve 40 °C için %14 - %43 arasında değiştiğini gözlemlemiştir.

Polat, T.[15], endüstriyel amaçlı çam fıstığının ısı pompası ve güneş enerji destekli bir kurutucuda kurutmuş ve çam fıstığının kozalaklardan ayrılmasını sağlayan sistemin tasarımını ve imalatını yaparak deneysel olarak enerji analizini incelemiştir. Ayrıca, gerçekleştirmiş olduğu bu çalışma kapsamında bilgisayar kontrollü güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kurutucuda teknik kurutma yöntemi ile; enerji tasarrufu ve yatırım maliyetlerini düşürmüş ve kuruttuğu ürünün de yüksek kalitede olmasını sağlamıştır.

Kurban, M., Varlık, T., Filik, Ü.B., Hocaoglu, F.O.[16], yaptıkları çalışmada güneş enerjisi destekli hibrid sistemden beslenen bir ton kapasiteli, kapalı sistemli ve taşınabilir yaş sebze veya meyve kurutma makinesi tasarlamıştır. Güneş enerjisinden elde ettikleri elektrik enerjisini, su deposu etrafına döşenen resistanslar sayesinde ısı enerjisine çevirmişlerdir. Tasarladıkları bu sistem ile güneş enerjisinden maksimum fayda sağlamışlar ve ürünün kuruma süresini kısaltarak verimi arttırmışlardır. Ayrıca kullanmış oldukları kontrol sistemi ile makine ve depo içerisindeki sıcaklığı istenilen değerler arasında tutmuşlardır. Enerji yetersizliğinde ise eksik kalan enerjiyi şehir şebekesinden sağlamışlardır.

Fudholi vd.[17], güneş enerjili kurutma sisteminde kırmızı biberi kurutarak enerji ve ekserji analizlerini yapmışlar ve kurutma için gerekli olan özgül enerji tüketiminin 5.26 KW h/kg olduğunu belirlemişlerdir.

Ambarita vd.[18], kakao çekirdeklerini sürekli kurutmak için, güneş enerjili kurutucu sistemine kurutucu enerji depolama sistemini entegre etmişlerdir. Bu çalışmada iki farklı tipte kurutucu madde test edilmiş ve kakao çekirdeklerini 40⁰ C -54⁰ C arasında değişen sıcaklık değerlerinde sırasıyla kurutulmuş olup özgül enerji tüketimlerini doğrudan güneş enerjili sistem ile kurutma ve güneş enerjili kurutma sistemi ile birleştirilmiş kurutucu enerji depolama sistemi için sırasıyla 55 saatte 60.4 MJ/kg nem

ile 41 saatte 18.94 MJ /kg nem olarak belirlenerek güneş kurutucu sisteme termal enerji depolama sisteminin entegre edilmesiyle kurutma süresinde ve özgül enerji tüketiminde önemli miktarda azalma olabileceğini göstermişlerdir.

Kowalski vd.[19], meyve ve sebzelerde farklı kurutma metotları için kurutma kinetiğini hesaplayan nümerik bir model geliştirmişlerdir. Termodinamik tabanlı geliştirilen bu modelde, elde ettikleri katsayılar ve nümerik hesaplama ile kurutma eğrilerini ve sıcaklıklarını zamanın bir fonksiyonu olarak toplam kurutma prosesi için elde etmişler ve optimum kurutma süresi ve enerji tüketimini belirlemişlerdir.

Elkhadraoui vd.[20], kırmızı biber ve üzüm kurutmak için güneş enerjili sera kurutucuların performansını deneysel olarak incelemişler ve ekonomik açıdan değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada kırmızı biber ve üzüm için kurutma sürelerini sırasıyla 7 ve 17 saat olarak belirleyip deneysel kurutma eğrilerinin sadece azalan hız dönemini gösterdiğini ve bu kurutucu için geri ödeme periyodunun yaklaşık 1.6 yıl ve sistem ömrünün de tahmini 20 yıl olduğunu belirtmişlerdir.

Siles vd. [21], yonca yaprağını kurutarak nem içeriğini ve sıcaklığını eş zamanlı olarak modellemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada yonca yaprağını sırasıyla 328K,333K, 338K ve 343K sıcaklığındaki ılık hava ile kurutmuşlar ve hava ile yonca yaprağının nem değişimlerini değişen sıcaklıklarda eş zamanlı olarak belirlemişlerdir.

Chouicha vd.[22], hibrit güneş enerjili kurutucu ile patates diliminin kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir.

Romero vd. [23], Meksika'da 50 kg kapasite için tasarlayıp imal ettikleri dolaylı güneş enerjili kurutucu ile vanilya kurutmuşlardır. Bu çalışmada, aynı zamanda, CFD Fluent paket programı kullanılarak vanilya kurutma prosesinin simülasyon çalışmasını gerçekleştirmişlerdir.

Tunç, M.[24], bir laboratuvar kurutucusunda, patlıcanın farklı kurutma şartlarındaki (hava sıcaklığı: 45 °C, 55 °C, 65°C ve 75 °C; ön işlem: 6 mm ve 9 mm; hava hızı: 1.5 m/s ve 2.5 m/s) kuruma karakteristiklerini belirlemeye çalışmıştır. Ayrıca; patlıcanın kuruma süresinin belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek amacıyla Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Papis, logaritmik, iki terimli, iki terimli ve eksponansiyel, Wang ve Sing, Thompson, difüzyon yaklaşımı, geliştirilmiş Henderson ve

Papis, Verma ve ark. ve Midilli ve ark. modellerini birbirleri ile karşılaştırmıştır. Kuruma olayını en iyi açıklayan modelde bulunan katsayılara, kurutma havası sıcaklığı ve hızındaki değişimin etkilerini çoklu regresyon yöntemiyle incelemiştir. Tahmini standart hatası (RMSE) ve khi-kare (c_2) değerlerini kullanarak en uygun modeli saptamış ve bunlara ilaveten modelin modelleme yeterliliğini de (EF) belirlemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre; kuruma havası sıcaklığının (T) ve hızının (V) etkileri 6 mm dilim kalınlığındaki patlıcan örnekleri için; $a=[0.7889+0.050.\ln(T)]$, $k=\{(11.0023+3.1720.\ln(T))\}$, $n=[1.0204.\exp(1.0580/T)]$, $b=0.0005.\exp(0.0877/V)$; 9 mm dilim kalınlığı için $a=[0.9853+0.0264.\ln(T)]$, $k=-\{(0.7517+0.2964.\ln(T))\}$, $n=[0.6899.\exp(0.3403/T)]$, $b=0.0025.\exp(0.1738/V)$ sabit ve katsayıları ile nem değişimini en uygun biçimde açıklayan Midilli ve ark. ($ANO=a.\exp(-k.tn)+b.t$) modeli ile tahmin etmiştir. Modelleme yeterliliğini de 6 mm için 0.998300...0.999123 arasında; 9 mm için 0.998684....0.999188 arasında değişmiştir.

Bu çalışmada, kurutma işleminin sürekliliğini sağlamak amacıyla çakıl taşı enerji depolama sistemi kullanılmıştır. Bu tür bir depolama sistemine yönelik literatürde gerçekleştirilmiş olan bazı çalışmaları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

Schmidt ve Willmot[25] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada çakıl taşı enerji depolama sisteminde önemli bir dezavantaj olan basınç düşümünün yüksek olması durumunda çakıl taşı yatağına sıcak havayı ileten fan sisteminin daha fazla enerji tüketimine neden olacağından bahsetmişlerdir.

Sagara ve Nakahara[26] yapmış olduğu çalışmada çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünü azaltmak için kullanılan çakıl taşı boyutlarının daha geniş olması gerektiğini vurgulamışlardır.

Singh[27], işletme koşulları altında çakıl taşı yatağı içindeki boşluk oranı ve kullanılan çakıl taşlarının boyutlarının genişliğinin etkilerini analiz etmek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Çakıl taşı enerji depolama sisteminin performans etkilerini önceden belirleyebilmek için Nusselt sayısı ve sürtünme faktörüne bağlı olarak çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir.

Saini [28] çakıl taşı enerji depolama sisteminin performansını belirleyen simülasyon çalışmasında sistem parametrelerinin çakıl taşı yatağı içerisindeki ısı transferi ve

akışkanın akış karakteristiği üzerinde önemli bir role sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Singh [32] düşük boşluk oranı ile geniş boyutlara sahip bir çakıl taşı enerji depolama sisteminin performansını incelemiştir. Bu çalışmada beş farklı şekilde depolama elemanı kullanılmış olup yuvarlaklık oranının 1.0 olan küresel elemanlar için minimum boşluk oranı 0.275 ve yuvarlaklık oranı 0.8 olan kübik elemanlar için maksimum boşluk oranı 0.48 olarak saptanmıştır.

Bouadila vd. [33] gece kullanılmak üzere çakıl taşına enerji depolayan yeni bir havalı güneş kolektörünün performansını incelemiştir. Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda geliştirdikleri havalı güneş kolektörlerinden elde etmiş oldukları enerjiyi çakıl taşı ile depolayarak kolektör yerleşimine göre sıcaklık dağılımını inceleyip günlük enerji veriminin %32-%45, buna karşılık günlük ekserji veriminin %13-%25 olduğunu belirlemiştir.

Opitz vd.[34] çakıl taşı termal enerji depolama sistemine yönelik deneysel olarak desteklenmiş heterojen ısı transferine sahip bir model geliştirmişlerdir. Modelica dilinde geliştirmiş oldukları simülasyon programı ile çakıl taşı enerji depolama sisteminde meydana gelen özgül ısı transferi değerlerini belirlemiştir.

Bouadila vd.[35] çakıl taşı enerji depolama sisteminin Tunus'ta bir seranın gece saatlerinde ısıtılmasında ne kadar etkili olduğunu değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada seranın ısı dengesini belirleyebilmek için faz değiştirme malzemesi kullanılarak sera üzerindeki sıcaklık ve nem dağılımını incelemiştir. Yapmış oldukları araştırma sonucunda gece saatlerinde 5°C sıcaklık ve %10-20 bağıl nem değerlerine sahip seranın ısıtılmasında %31'lik bir iyileşme olduğunu ve aynı zamanda karbon emisyonunun da azaldığını gözlemlemiştir.

Cascetta vd. [36] çakıl taşı enerji depolama sistemini farklı ısı transfer akışkanları için nümerik olarak incelemiştir. Bu çalışmada farklı ısı transfer akışkanı olarak hava, yağ ve erimiş tuz kullanarak, nümerik inceleme için akışkanın termodinamik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu iki fazlı tek boyutlu Schumann Modelini baz almışlardır. Gerçekleştirmiş oldukları çalışma sonucunda ısı transfer akışkanı olarak kullandıkları

yağ ve erimiş tuzun da çakıl taşı enerji depolama prosesinde hava gibi iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir.

Zanganeh vd.[37] 100 MW termal ısı enerjisini depolayabilen bir çakıl taşı enerji depolama sistemi geliştirmiştir. Isı transfer akışkanı olarak havayı kullanarak deneme çalışmaları için 6.5 MW ısı enerji depolayan bir sistem kurmuşlardır. Bu çalışmada sayısal ısı transferi ve akışkan akışı modelini geliştirerek kurmuş oldukları 6.5 MW ısı enerjisi depolayan sistemde deneysel olarak incelemişlerdir. Geliştirmiş oldukları simülasyon modelinden yola çıkarak Fas'ta güneş enerjili bir santral için 100 MW ısı enerjisi depolayan endüstriyel ölçekli bir sistem dizayn etmişlerdir.

Zanganeh vd.[38] yüksek sıcaklıklardaki endüstriyel proseslerin ısıtılması için çakıl taşı termal enerji depolama sistemi(72GWh_{th}) geliştirmişlerdir. Bu çalışmada ısı transfer akışkanı olarak havayı kullanmışlar ve geçici olarak bir boyutlu iki fazlı ısı transferi modeli geliştirip ısı transferi akışkanının yüksek sıcaklıktaki davranışını, termal enerji depolama sisteminin performansını (termal kayıplar, pompanın çalışma performansı, dış sıcaklık değerleri, toplam depolama verimi vb.), işletme ve tasarım parametrelerini değerlendirmişlerdir. Şarj süresi boyunca sıcaklığın düştüğünü buna karşılık enerji depolama veriminin, çakıl taşı termal enerji depolama sistemini içindeki basınç düşümünün ve buna bağlı olarak pompa gücünün arttığını gözlemlemişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Artan nüfus ve enerji ihtiyacı birbirini etkileyen iki unsurdur. Özellikle gelişmiş ülkelerde artan enerji ihtiyacıyla birlikte alternatif enerji üretim yollarını aramak, ülkelerin gelişmişlik düzeyleriyle doğru orantılıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları bu noktada önemli bir rol üstlenmektedir. Çünkü bu kaynaklar tükenmez ve sürekli. Teknolojideki gelişmeler her alanda olduğu gibi bu alanda da etkili olmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanımı, özellikle son yıllarda üst düzeye çıkmakta ve bu alanda çalışmalara sürekli devam edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları denildiğinde ilk olarak aklımıza güneş, su, jeotermal, rüzgar vb. enerji kaynakları gelmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin birçok alanda kullanımı yaygın bir şekilde devam etmektedir. Endüstriyel alanda başlayan bu uygulamalar zaman ilerledikçe gündelik hayatta da

uygulanabilmektedir. Özellikle güneş enerjisinin ısı uygulamaları son yıllarda oldukça artış göstermektedir. Bu tarz uygulamalara örnek olarak; güneş enerjisinden sıcak su üretimi, ev ve iş yerlerinin ısıtılması, sera vb. üretim alanlarının ısıtılması, tarımsal ürünlerin kurutulması vb. durumlar gösterilebilmektedir. Hayat kaynağı olan güneşin en büyük enerji kaynağı olarak kullanılması yolunda ilgili araştırmalar ve teknolojik gelişmeler artarak devam etmektedir. Özellikle güneş enerjisi baz alınarak oluşturulan sistemlerin işletme ve bakım masraflarının düşük olması ve yüksek verimli sistemlerin elde edilmesi, bu sistemlerin kullanımını ön plana çıkartmaktadır.

Ülkemizin sahip olduğu ekonomik öğelerden birisinin de tarım olduğu hepimiz tarafından bilinen bir gerçektir. Tarım ile ilgili teknolojiler sürekli gelişmekte ve kendilerine yeterli uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle zirai ürün kurutma ile ilgili olarak güneş enerjisinden beslenen sistemlerin birçok alanda kullanılmaya başlamasıyla birlikte, bu teknolojinin tarım alanında da kullanılmaya başlanması kaçınılmazdır.

Günümüzde meyve ve sebze kurutma sistemleri ve kurutulmuş ürünlerle ilgili birçok çalışma yapılmış olup bu konularla ilgili olarak hem deneysel hem de bazı metotlarla kurutma parametreleri incelenmektedir. Özellikle gıda maddelerinin kuruma özelliklerinin birbirinde farklı olduğu göz önüne alınarak kurutmada kullanılan havanın sıcaklığı, bağıl nemi, hızı ve ürüne göre akım yönü ile ısı ve kütle transfer olaylarının etkilerinin mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Tarım ürünlerinin kurutulması çevreye etkisi olan önemli bir süreçtir. Su içeriği yüksek gıdalardan suyun uzaklaştırılması büyük miktarlarda enerji gerektiren karmaşık işlemlerden oluşmaktadır. Tarımsal ürünün kurutma öncesi hazırlanması, içeriği, sıcaklığa karşı duyarlılığı gibi faktörler kurutma işlem basamaklarını belirlemektedir. Çevre dostu kurutma teknolojilerinin geliştirilmesi pek çok nedenden dolayı yavaş bir şekilde olmaktadır. Bu nedenlerin başında kısa dönemde kazanç elde etme beklentisi gelmektedir. Alternatif kurutma teknolojilerinde gerçekleştirilen uygulamalı araştırmalar, kullanıcıların ekonomik endişelerini de göz önüne alacak şekilde geliştirilmelidir.

Kurutma işlemleri temel olarak; kurutulacak ürün, ürünün bulunduğu ortam ve bu ortamda kurutma işlemini sağlayacak enerjinin üretildiği birimlerden oluşmaktadır.

Kurutulacak ürün için; ürünün boyutu, kurutucuya yükleme ve boşaltma şekli, kurutucuya giriş ve çıkıştaki su içeriği, ısıya karşı duyarlılığı kurutma süreçlerini belirlemede etkili olmaktadır. Ayrıca bu özellikler kurutulacak ürünün konulacağı ortamın yani kurutucu tipinin belirlenmesinde de etken faktörlerdir. Bunlara ilave olarak kurutma ortamındaki nemin taşınmasını sağlayan kurutma akışkanı (genellikle hava) ve buna ısı enerjisi sağlayan donanımlar işletme maliyetini oluşturan başlıca etkenlerdir.

Güneş enerjisi temel olarak ilk yatırım maliyetleri dışında ek enerji maliyeti getirmeyen bir enerji türü olarak ürün kurutması açısından cazip bir alternatiftir. Ancak Güneşten sadece gündüz yararlanmanın mümkün olması ve birçok üründe sürekli bir kurutma prosesinin gerekmesi kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle güneş enerjisinin ısı enerjisi halinde depolanması ve depolanan bu enerji ile gece ve yeterli güneş ışığının olmadığı zamanlarda da bu ısı enerjisinin karşılanması gerekmektedir.

Meyve ve sebzelerin hijyenik bir şekilde ve düşük maliyetlerle kurutulması ise tarım sektörünün öncelikli amacını oluşturmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için güneş enerjisinden yararlanmak enerji maliyetlerini önemli ölçüde düşürülebilecek bir opsiyondur. Fakat, güneş enerjisinden sadece gündüz saatlerinde yararlanıldığı için gece ya da güneş ışığının yeterli olmadığı durumlarda güneş enerjisinin depolanması ve kurutmanın sürekli olması hedeflenmektedir. Bunun dışında, kurutma işleminin sürekliliğini sağlamak ve nem alma işlemini gerçekleştirebilmek için alternatif enerji kaynaklarının kullanılması veya kurutma sistemine ısı pompasının entegre edilmesi söz konusu olmaktadır. Ayrıca, kurutma sistemi çıkışına yerleştirilen ısı geri kazanım ünitesi (reküperatör) kullanımı ile kurutma sisteminden elde edilen atık ısıнын yaklaşık %50-60 oranında geri kazanımını sağlamak söz konusudur.

Bu çalışma kapsamında özellikle, yerli veya yabancı zirai ürün üreticileri ve endüstrisi, çiftçiler, tarımsal şirketler, kuru tarımsal ürün pazarlayıcıları vb. hedef grupları için güneş enerjisini kullanarak, çakıl taşı termal enerji depolama sistemi ile depolayarak ve kurutma sisteminden elde edilen atık ısıyı önemli ölçüde geri kazanarak düşük maliyetlerde sürekli kurutma işleminin gerçekleştirilmesi ve bu sayede zirai ürün kurutma proseslerinde meydana gelebilecek problemlerin minimize edilmesi

hedeflenmiştir. Bu bağlamda geliştirilen kurutma sisteminde, tez çalışması boyunca, elma kurutma işlemi yapılarak ürünün kuruma aşamalarının belirlenmesi, kurutma havası çevriminin ısı analizi ve elma kurutulmasına ilişkin matematiksel bir model oluşturulması da bu çalışmanın temel amaçları arasında yer almaktadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışma kapsamında geliştirilen bu sistemi literatürde gerçekleştirilen çalışmalardan ayıran en önemli özelliği sadece sistemde yer alan fanların ve ısı değiştiricinin(rekuperatör) çalıştırılması dışında elektrik enerjisine gerek duymadan sadece güneş enerjisini kullanarak, depolayarak ve sistemde meydana gelen atık ısının rekuperatör adı verilen ısı değiştiricisi ile yaklaşık %50-60 oranında geri kazanarak tüketilecek enerji miktarını önemli ölçüde azaltan bir sistem olmasıdır. Dolayısıyla çalışmanın kattığı en önemli yenilik enerji verimliliğinin artması ve kurutma uygulamasında kullanılan enerji miktarının azaltılmasıdır. Ayrıca kurutma işlemi sonrasında elde edilen ürünün kalitesi de gerçekleştirilen bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran bir diğer önemli unsurdur. Kurutulan ürünün rengi, aflatoksin miktarı, son nem miktarı, aroması, besin değerleri gibi faktörler ürün kalitesini belirlemektedir. Ayrıca çalışmanın meydana getirdiği diğer bir yenilik ise kurutma süresindeki azalmadır. Geliştirdiğimiz bu sistemin muadillerine göre %100 daha verimli çalıştığı göz önüne alındığında ürünün çok daha kısa sürede hijyenik ve kaliteli bir şekilde kurutulması sağlanmaktadır.

BÖLÜM 2

KURUTMA İŞLEMİ VE KURUTMA EKİPMANLARI

Gıdaların kurutularak saklanması çok eskiden beri bilinen yöntemlerden birisidir. Kurutmanın doğada kendiliğinden olduğu birçok tarım ürünü mevcuttur. Günümüz koşullarında, gıda sektöründeki makineleşme ve yoğun enerji kullanımı kurutma işlemleri için de geçerlidir. En kısa bir ifade ile kurutma, katılardaki suyun uzaklaştırılması diye tanımlanabilir.

Herhangi bir hacimdeki su, bulunduğu koşullara bağlı olarak az veya çok sıvı fazdan buhar fazına geçme eğilimindedir. Bunun anlamı söz konusu hacmi çevreleyen havaya gaz halinde yani su buharı olarak karışması demektir. Bu tek yönlü bir geçiş değildir, aynı zamanda havadaki su buharı da sıvı faza yani suya dönüşmektedir. Su bulunduğu koşullara özellikle sıcaklığın etkisine bağlı olarak bir buhar basıncına sahiptir. Çoğunlukla suyun katı ve sıvı fazındaki basıncına suyun buhar basıncı, suyun gaz fazındaki basıncına havanın toplam basıncındaki yerini belirtmek için su buharının kısmi basıncı tanımlaması yapılmaktadır. Suyun buhar basıncının oluşması için birçok faktör söz konusudur. Bunlardan en etkili olan sıcaklıktır. Suyun içinde çözünen bir madde varsa veya su herhangi bir maddeye bağlı ise suyun buhar basıncı düşecektir. Suyun buhar basıncına etki eden bir diğer faktör ise, kurutma işlemi yönünden önemli olan kapiler etkidir. Daha ince kapiler boşluklar daha kalın olanlara göre düşük buhar basıncı değerine sahiptir.

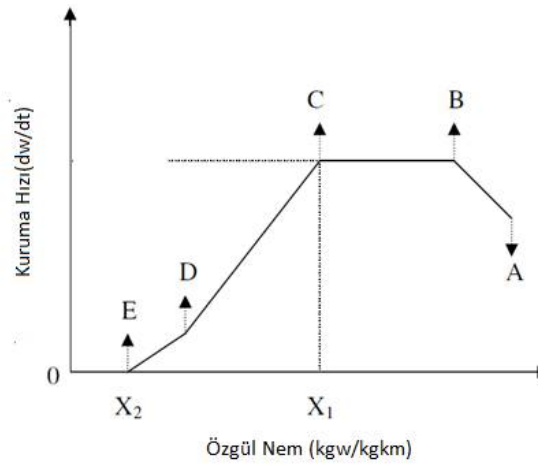
2.1 Kurutma İşlemi

Kurutma, kurutulacak malzemenin yapısı ile direkt ilgili olduğu bilinen bir olgudur. Ürünün higroskopik yapıda olması veya olmaması kurutma işlemini etkileyecektir. Tarım ürünleri de higroskopik yapıya sahip ürünlerdir. Bu nedenle de kuruma işlemi diğer yapılardaki ürünlere göre yavaş olacaktır. Kurutulacak ürünün yapısı aynı zamanda kuruma hızını da belirleyen bir faktördür. Kurutma bazen birkaç evreden oluşurken bazen de bu evreler gözlenmeyebilir. Suyun, kurumanın gerçekleştiği yüzeyi tamamen kapladığı, bu nedenle kurumanın bütün yüzeyden olduğu (sabit hızda suyun buharlaştığı) evreye sabit kuruma hızı evresi denmektedir. Bu dönemden sonra kuruma yüzeyinin bazı bölgelerinde kuruluklar oluşmaya başlar. Çünkü ürünün kapiler kuvveti suyu daha derinlerden çekmeye yeterli olmamaktadır[39]. Bu birinci azalan hız periyodudur. Bir zaman sonra kurutulan yüzey tamamen kuru hale gelir. Bundan sonra ikinci azalan hız periyodu başlar. Su artık ürünün yüzeyinde değil yüzeyin derinliklerinde bulunmaktadır. Yüzeyde oluşan kuru bölgeler ısıya karşı az ya da çok yalıtkan bir yüzey oluşturarak, ısının suyun buharlaşacağı alana inmesine engel oluşturacaktır.

Farklı gıda ürünlerinde farklı kuruma evreleri görülebilir. Bu evreler bazılarında çok belirgin gözlenirken bazılarında gözlenemeyebilir. Kuruma hızlarının değişim karakteristikleri, sabit hız periyodu ve azalan hız periyodu olarak birçok ürünün kurutulması gözlemlenmektedir. Sabit hız periyodunun sonunda, ürün nemi kritik nem değeri olarak isimlendirilir. Literatürde birçok tarım ürünü için kuruma karakteristik eğrileri araştırmacılar tarafından hazırlanmış olarak bulunabilir[40]. Bu eğrilerde dikkat edilmesi gereken nokta, kritik nem değeridir. Kritik nem değeri her ürün için farklılık göstermektedir. Cemeroğlu'na [41] göre bu değer, pek çok gıda maddesi için ürünün bulunduğu ortamın bağıl neminin % 58–65 arasında iken dengede olduğu durumdur.

Gıda ürünlerinde suyun bulunuş şekli serbest ve bağıl su olarak tanımlanmaktadır. Kritik nem değerlerine kadar uzaklaştırılan nem değerleri, serbest su olarak belirtilirken, bu noktadan sonraki uzaklaştırılmak istenen nem, bağıl su olarak adlandırılır. Kurutma işlemlerinde bir başka önemli tanım da kuruma hızıdır. Buna etki

eden pek çok faktör söz konusudur. Eğer kurutma işlemi bir süreç olarak göz önüne alınırsa, kuruma hızına etki eden faktörleri iki kısımda incelemek mümkündür. Birincisi kurutulacak ürünün bulunduğu kurutma ortamı, ikincisi ise kurutulacak ürünün özellikleridir. Her iki kısım için, kütle ve ısı transferine etki eden faktörler önemlidir. Bu faktörler; kurutma havasının sıcaklığı, nemi ve hızı ile kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri ve bileşimi gibi karakterlerdir. Kurutulacak ürünün kendi özellikleri dışındaki kalan faktörler, kurutma hızını artırmak için optimize edilebilirler.



Şekil 2.1 Kuruma hızının özgül nem değerine göre kuruma eğrisi

Şekil 2.1'de kuruma hızının özgül nem miktarına göre değişimini gösteren basit bir kuruma eğrisi verilmiştir. Şekildeki C değeri, kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın olduğu duruma "kritik nokta" adı verilir. Kritik nokta, sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgelemektedir. Şekilde yer alan AB bölgesi kurutucu ve ürünün ısınma süresini göstermektedir. BC bölgesinde ise buharlaşma ürünün yüzeyinde oluşan sıvı film tabakasıyla gerçekleşmektedir. Şekilde verilen kuruma hızı eğrisi kurumadaki çeşitli periyotları içermektedir. Başlangıçta nem, doymuş halde bulunan yüzeyden buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Kurutma ilerledikçe doymuş halde bulunan yüzey alanı kademeli olarak azalır. Bunu maddenin iç kısmındaki suyun buharlaşması izler. CD bölgesinde ise ürün yüzeyine difüze edilebilen su buharlaşmaktadır. Bu nedenle BC bölgesinde kurutma hızı sabit kalmakta ve CD bölgesinde ise doğrusal olmaktadır. DE bölgesi, ürün içindeki suyun yüzeye çok yavaş

difüze edildiği bölgedir. AB bölgesi kararsız durumu, BC bölgesi ise sabit hız periyodunu göstermektedir.

Kurutmanın yapıldığı ortamın özellikleri bazı şartlar altında kontrol edilebilen faktörlerdendir. Kurutma havasının kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki farkı, kurutmaya etki eden en önemli faktörlerdendir. Bu iki değer arasındaki farkın büyüklüğü önemlidir. Kurutucu akışkanın kuru termometre sıcaklığının büyüklüğü eğer yaş termometre sıcaklığına yakın ise veya eşit olursa kurutmayı hızlandıracak çok önemli bir etkisi olamamaktadır. Kurutmanın ilk aşamalarında, bu iki büyüklüğün farkı son aşamalara göre daha az etkilidir. Bununla beraber kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki fark ile kuruma hızı doğru orantılıdır [41]. Diğer taraftan yaş termometre sıcaklığı sabit tutulup kuru termometre sıcaklığının artırılması ile kurutmanın ileri aşamalarında kuruma hızını artırmak mümkündür. Bunun nedeni, ürünün iç kısımlarındaki nemin difüzyonla ilerlemesine sıcaklığın olumlu yönde etkisinin olmasıdır.

Kurutma hızına etki eden faktörlerden bir diğeri de, kurutma havasının hızıdır. Kurutma havası hızının artması, kuruma hızı ile doğru orantılıdır. Kurutma esnasında kurutulacak ürünün üzerinde daima durgun bir buhar filmi oluşmaktadır. Bu tabakanın taşınma sıklığı suyun buharlaşma hızını artırmaktadır. Buna ilave olarak kurutma havası hızının etkisinin kurutmanın ilk aşamalarında daha fazla olduğu görülecektir.

Kurutulacak ürünün kimyasal ve fiziksel özellikleri kuruma hızına etkisi büyük olan en belirleyici faktörlerdendir. Kurutulacak ürünün kimyasal yapısında şeker, tuz gibi maddelerin bulunması kuruma hızını düşürecektir. Bunun nedeni ise çözünmüş maddelerin suyun buhar basıncını düşürmesi ve buharlaşmayı zorlaştırmasıdır. Kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri yani ebatları kurutmayı önemli ölçüde etkilemektedir. Kurutma yüzeyinin büyüklüğü kurutma hızını artırmakta ancak ürünün kalınlığı kurutma hızını yavaşlatmaktadır. Söz konusu ürünün boyutlarında kurutucu seçiminde de etkili olan faktörlerdendir. Meyve ve sebzelerde, kurutmanın ilk evresinde ürünün büyüklüğü önem taşımaz iken, daha sonraki evrelerde kuruma hızını etkilemektedir. Ancak her bir kurutulacak ürünü parçalamak ve doğramak mümkün olmamaktadır.

Tarım ürünlerinin kurutulması esnasında veya kurutma sonrasında ürünün yapısında birçok fiziksel ve kimyasal değişimler oluşmaktadır. Bu değişimlerin bazıları istenen ve beklenen değişimler iken bazıları istenmemektedir. Ürünün kuruması dış etkenlerle başlatılan bir sıvı hareketi ve sıvı kaybıdır. Bu sıvı hareketi (genellikle kurutmanın ilk aşamalarında) sırasında, sıvı ile beraber çözünmüş maddeler de yukarıya doğru taşınmaktadır. Böylece yüzeyde kuru madde birikmesi olmaktadır. Ters yöne akışın olması durumunda da mümkün olan bu olay, kurutulan ürünün yüzeyi ile iç kısımları arasında sürekli bir sıvı köprüsü olmasını gerektirir. Bazı durumlarda hücre sıvısının yüzeye akması söz konusudur. Farklı bir mekanizma sonucu olan bu olay genellikle erik, kayısı, incir gibi kurutulmuş ürünlerde gözlenmektedir.

Bir başka fiziksel değişim ise kabuk bağlama olayıdır. Kurutmanın ilk aşamalarında uygulanan yüksek sıcaklık neticesinde oluşmaktadır. Hatalı kurutma koşullarının seçilmesi bu olaya neden olmaktadır. Yüksek kurutma sıcaklığı nedeniyle, yüzeyde oluşan sert tabaka henüz iç kısımlardan uzaklaştırılamamış sıvının dışarıya çıkmasını zorlaştırır ve kurumayı engeller. Özellikle şeker ve benzer maddelerce zengin meyve gibi materyallerin kurutulmasında bu duruma sıkça rastlanır. Kuruma hızı ve kurutulacak ürünün kalitesini etkilemesi nedeniyle kabuk bağlamanın önlenmesi gerekir. Kurutma koşulları gözlenerek iyileştirme yapılabilir.

Kurutma işleminin bir sonucu da üründeki kitle yoğunluğunun değişmesidir. Bu ölçüt birim hacimdeki ürünün ağırlığıdır. Sebze ve meyvelerin elastik bir yapıya sahip olmaları, kurutma sonrası kaybedilen su miktarı ile doğru orantılı olarak büzüşmeyi gerektirir. Bu büzüşme aslında kurutma koşulları hakkında da bize ipucu veren bir özelliktir. Kurutulan üründen beklenen kurutma sonrası kitle yoğunluğunun artmasıdır. Kurutma koşullarının, malzemenin iç yüzeylerinden nemin buharlaşmasına izin verecek derecede uyumlu olması mükemmel bir büzüşmeye sebep olur ve kuruma sonrası ürün hacmi istenen oranda küçülür. Bu şekilde kurutulmuş olan ürünlerin kitle yoğunluğu yüksek olacaktır. Bu koşulların tersi yani ürünün dış tabakasının iç bölgelere göre hızlıca kuruması ile kütle kaybı olmasına rağmen, hacimde küçülme olamayacağı için kitle yoğunluğu istenen değere ulaşamayacaktır.

Kurutulan üründe istenen bir başka özellik ise rehidrasyon (yeniden nem alma) yeteneğidir. Yani kurutma sonrası kullanılmak istenen ürünün su ile temas etmesi halinde kaybettiği suyu geri kazanmasıdır. Ürünün tamamen eski haline gelmesi mümkün olmamaktadır. Her ne kadar rehidrasyon yeteneği fiziksel bir olaysa da ürünün fiziksel ve kimyasal yapısından etkilenir. Kuruma esnasında ürünün kapiler yapısındaki bozulmalar bu yeteneğin azalmasına sebep olmaktadır. Dondurularak yapılan kurutmalarda, kurutulan ürünlerin rehidrasyon yeteneği diğer klasik kurutma yöntemlerine göre oldukça yüksektir. Ürünlerin rehidrasyon yeteneği ürünün belirli koşullar ve sürelerde su içinde tutularak belirlenir. Suyun sıcaklığı ve bekleme süresi önemlidir. Bu nedenle bir ürünün rehidrasyon yeteneği verilirken hangi koşullarda denendiği de ayrıntılı olarak verilmelidir.

Kurutulan üründe fiziksel değişimlerin yanında kimyasal değişimler de söz konusudur. Bu değişikliklerin başında renk, besleme değeri, tat, viskozite ve depolanma stabilitesi gelmektedir. Gerek kurutma esnasında gerekse depolama sırasında ürünün besin değerlerinde kayıplar görülür. Bu kayıpların en başında parçalanmaya en çok eğilimli C ve A vitaminleri gelmektedir. Isıya karşı çok duyarlı olan Tiyamin (B1) de kurutma esnasında oldukça kayba uğramaktadır[39]. Bu kayıplar ağırlıklı olarak kurutma koşullarına bağlıdır. Örneğin güneşte kurutulan ürünlerde C vitamini ve karoten kaybının diğer yöntemlere göre çok daha fazla olduğu bilinmektedir.

Kurutma işleminde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi de üründeki renk değişimidir. Enzim faaliyetlerinin durdurulmadığı durumlarda, yani haşlamadan yapılan kurutmalarda,(meyvelerde olduğu gibi) enzim faaliyetlerinden dolayı renk değişmesi olabilmektedir. Çoğu zaman kurutma sıcaklığı enzim faaliyetlerini durdurmaya yeterli olamamaktadır. Kurutma yüksek sıcaklıkta yapılsa bile kurutmanın ilk evrelerinde ürün sıcaklığı, bütün yüzeyin ıslak olması nedeniyle düşük kalmaktadır. Enzim kaynaklı renk değişimleri bu evrede daha çok oluşmaktadır. Bununla birlikte enzim kaynaklı olmayan renk değişimleri de mümkündür. Sıcaklığın yükselmesiyle ve reaksiyona giren maddelerin ortamdaki yoğunluklarının artmasıyla da gözlenmektedir. Düşük nem düzeyinde yani % 2 nemin altında herhangi bir renk değişimi olmayacağı değişik kaynaklarca belirtilmektedir.

2.2 Kurutucu Sistemleri

2.2.1 Endüstriyel Kurutucular

Kurutma işlemi, ısı ve kütle transferinin birlikte gerçekleştiği uygulamalardır. Kurutma uygulamalarında kurutulan ürün ve kurutmanın yapıldığı donanım farklı inceleme konusudur. Enerjinin çok yoğun olarak kullanıldığı bir endüstri dalı olan kurutma pek çok farklı uygulama örnekleri ile günümüz teknolojik gelişmelerini de takip etmek durumundadır. Pek çok farklı isimle anılan ve farklı çalışma prensiplerine sahip olan bu cihazları anlamak için sınıflandırmak ve belirli başlıklar altında incelemekte yarar olacaktır.

Aslında kurutucuların sınıflandırılması ve seçimi konusunda bir kural oluşturmak, beklentilerin oldukça sık değişmesi ve pek çok yeni ürünün kullanılmaya başlanması nedeniyle zordur. Operasyon şekli, ısı girişi biçimi, kurutucudaki malzemenin durumu, çalışma basıncı, kurutma ortamı (taşınımlı, iletimli), kurutma sıcaklığı, kademe sayısı, kurutma süresi gibi ölçütler göz önüne alınarak kurutucuları sınıflandırmak mümkündür.

Bu şekilde bir sınıflandırma, 1997 yılında Baker tarafından yapılmıştır. Baker'e göre kurutucular, kurutulacak ürünün kurutucuya yüklenme şekli ile sınıflandırılabilir. Bu nedenle kurutucular temel olarak iki kısımda toplanabilir [42].

- Kesikli tip kurutucular
- Sürekli tip kurutucular

Endüstriyel tip kurutucularda kesikli tip kurutucular için daha kısıtlı bir seçim söz konusudur. Bununla birlikte sadece birkaç kurutucu tipi her iki yükleme şeklinde de çalışabilmektedir.

Bir başka sınıflandırma ise, kurutucuya ısı girişi prensibine göre yapılmaktadır. Bu şekildeki kurutucuların sınıflandırılması daha yararlıdır. Çünkü bu durumda kurutucuların tanımlanması sadece bir temel özelliğe bağlı olacaktır. Söz konusu özelliğe göre kurutucuları direkt ve indirekt kurutucular olarak sınıflandırmak mümkündür.

2.2.1.1 Direkt Kurutucular

Taşıyımli (convective dryers) kurutucular olarak bilinirler ve geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Egzoz havasındaki gizli enerjinin geri kazanımının zor olması nedeniyle ısı verimleri düşüktür. Buna rağmen endüstriyel kurutucuların % 85' e yakını bu tip kurutuculardan oluşmaktadır. İndirekt ısıtma veya direkt ateşleme ile hazırlanan sıcak hava en yaygın kurutma ortamıdır. Bunun yanında bazı uygulamalarda kızgın buhar kullanılarak daha yüksek ısı verim ve daha kaliteli ürün elde edildiği görülmektedir. Yanma ürünü gazlar, ürünün ısı duyarlılığı olmadığı ve yanma gazlarından etkilenmediği durumlarda kullanılmaktadırlar. Direkt kurutucularda kurutma ortamı kurutulacak malzeme ile doğrudan temas halindedir.

Kurutma gaz sıcaklığı 40⁰C ile 500⁰C arasında değişebilir. Bu sıcaklık kurutulacak ürünün niteliğine bağlıdır. Nem alma (dehumidifier) ile yapılan kurutmalar kurutulacak malzemenin sıcaklığa duyarlılığının çok yüksek olduğu durumlarda kullanılabilen en uygun kurutuculardır.

Ayrıca kurutma ortamı olarak inert gazların (azot vb.) seçilmesi kurutulacak malzemenin patlama, parlama ihtimalini önlemek veya organik çözücülerin uzaklaştırılmasının istendiği kurutmalarda uygun bir kurutma şekli olacaktır[43]. Bu tip kurutucularda kurutma havasının hazırlanması en büyük sorunu teşkil etmektedir.

2.2.1.2 İndirekt Kurutucular

Kurutulacak malzemeye direkt temas yerine, ısı transfer ortamı yoluyla temasın olduğu kurutucu tipidir. Isı transferi (buhar, sıcak gazlar, ısıl akışkanlar vb.) iletimle kurutulacak malzemeye iletilir. Gaz akışsız olan bu kurutma ortamında kurutulacak malzemenin bulunduğu kısımda nemin doymuş duruma gelmemesi için vakum gibi uygulamaların yapılması gerekli olmaktadır. Isı transfer yüzeyi -40⁰C (dondurarak kurutma uygulamaları için) ile 300⁰C arasında olabilir. Kurutulacak ürün ile ısıtma ortamının direkt irtibatla olmaması nedeniyle, yanmış yağların kullanılması da mümkündür. Vakum uygulamasında herhangi bir patlama veya yangın tehlikesi

bulunmamaktadır. Ayrıca buharlaşan çözücülerin geri kazanımı bu yolla daha kolay olmaktadır. Bununla beraber vakum uygulamalarında sıvıların kaynama noktalarının daha düşük olması nedeniyle, düşük sıcaklıklarda yapılan kurutmalar ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmasına olanak sağlamaktadır.

Isı transferi ışıma yoluyla da bu sistemlerde uygulama bulmasının yanında, mikrodalga ve radyo frekansı uygulamaları da söz konusudur. Gaz akışı veya vakum operasyonları buharlaştırılan nemin uzaklaştırılmasını gerektirmektedir. Isıtmalı kurutma sistemleri, oymacılık işlemlerinde, kâğıt kaplanmış yüzeylerin kurutulmasında veya baskı yapılmış yüzeylerin kurutulmasında önemli bir yer bulmaktadır. Bununla beraber gaz akışlı ve ısıtmalı sistemlerin beraber kullanıldığı uygulamalar daha yaygındır. Bu uygulama sıklıkla taşınımlı (convective) kurutucuların, kâğıt gibi tabaka şeklindeki malzemelerin kurutulmasını da sağlamaktadır.

Mikrodalga kurutucuları da indirekt kurutuculara örnek olarak verebilmektedir. Mikrodalga kurutucuların hem ilk maliyeti hem de enerji bakımından işletim maliyeti yüksektir. Kullanılan enerjinin sadece % 50'si elektromanyetik enerjiye dönüştürülebilmekte ve bunda bir kısmı kurutulacak malzeme tarafından emilebilmektedir. Günümüzde çok az uygulama bulmasına rağmen bazı ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında kullanılmaktadırlar. Radyo frekanslı kurutucular da endüstriyel kurutma alanında kısıtlı kullanım alanına sahiptirler. Genellikle mikrodalga kurutucular gibi onlar da oymacılık sektöründe, kâğıt kaplama ürünlerde ve kalın ağaç parçalarının kurutulmasında kullanılırlar. Ayrıca gaz akışlı ve vakumlu sistemlerle birleştirilmeleri verimli olmaktadır.

Gerçekte istenen bazı uygulamalarda birleştirilmiş ısı transferi uygulamaları mevcuttur. Örneğin, iletim-taşınım, taşınım-ışınım şeklinde birleştirilebilirler. Bu tip uygulamaların ilk kurulum maliyeti yüksek olmasına rağmen, işletme maliyeti düşük olmakta ve kurutulan ürünün kalitesi de yükselmektedir. Kurutucu seçeneklerinin çok geniş olmasından dolayı, birisinin seçilmesi birçok ürünün kurutulmasını mümkün kılacaktır. Kurutucuların seçiminde deneyimin çok önemli olduğu da not edilmelidir. Bir kurutucunun seçimi ile ilgili kriterleri şu şekilde sıralamak mümkün olabilir[44]:

- Uygun kurutucuların incelenmesi
- Değişik tip kurutucuların ön maliyetlerinin belirlenmesi
- Yatırım maliyeti
- İşletme maliyeti
- Prototip sistemde veya laboratuvar ünitesinde kurutma testi davranışları
- Kurutma deneylerinde kurutulan ürünlerin örnek ve kalitelerinin belirlenmesi.

Kurutucuların kurutulan ürün bazında değerlendirmesinde ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri de dikkate alınmaktadır. Çizelge 2.1’de bazı ürünlere ait kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri verilmiştir [10].

Çizelge 2.1 Bazı Ürünlerin Kuruma Sıcaklıkları ve Kurutma Süreleri

Malzeme Cinsi	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Hafta	Gün	Saat
Meşe Tahtaları	32-52	1-4		
Yumuşak Tahtalar	70-105		2-14	
Tuğlalar	77			30
Kahve	50-72			12-48
Kauçuk	36-60		2-6	
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65-92			4-20
Meyveler	55-80			6-24
Üzüm	60-65			24
Elma(1.Kademe)	70-88			8
Elma(2.Kademe)	74			8
Şeftali, Armut	68			24-30
Sebzeler	50-65			2-18
Havuç(1. Kademe)	70			14-24
Havuç (2.Kademe)	65			14-24

Çizelge 2.1 Bazı Ürünlerin Kuruma Sıcaklıkları ve Kurutma Süreleri(Devamı)

Mantar(1.Kademe)	44	14-24
Mantar(2.Kademe)	65	14-24
Soğan(1. Kademe)	70-88	10-15
Soğan(2.Kademe)	55-60	10-15
Çay Yaprakları(Fanaj veya İlk Kurutma)	38	4-8
Çay Yaprakları(Kurutma)	70-110	1-2

Ayrıca, kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan birim miktardaki su başına harcanan enerji de kurutucuların seçiminde önemli bir kriterdir. Çizelge 2.2’de ise kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan birim su başına harcanan enerjiler verilmektedir[45].

Çizelge 2.2 Farklı kurutucu tiplerine göre enerji tüketim değerleri[45]

Kurutucu Tipleri	Birim Su Miktarı için Harcanan Enerji (MJ/kg)
Isı Pompalı Kurutucu	0,5-0,8
Direkt Egzoz Gazları ile Çalışan Kurutucu	3,2-3,8
Hava ile Çalışan Kurutucu(70-100 ⁰ C)	4,5-5,5
Kazandan Alınan Egzoz Gazları ile Kurutma(400 ⁰ C)	5,0-6,0
Kazandan Alınan Egzoz Gazları ile Kurutma(200 ⁰ C)	9,0-12,0
Bantlı ve Tünel Kurutucular	
Ters Akışlı Tepsili-Bantlı	8,0-16,0
Ters Akışlı Rafli-Tünel	6,0-16,0
Arasından Akışlı Tepsili-Bantlı	5,0-12,0
Vakumlu Tepsili-Bantlı-Levhalı	3,5-8,0

Yukarıda belirtilen temel bilgiler kurutma cihazlarının seçiminde bazı ölçütlerin oluşmasına yardım etmektedirler. Bunları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

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

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

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

Kurutucu seçimine karar verme: Kurutma testlerinden ve belirtilen özelliklerin değerlendirilmesiyle kurutucu seçimine karar verilebilir[10].

3.1 Kurutulacak Ürünün Belirlenmesi

Dünya'da her geçen gün kuru meyve mamullerine yönelik ihracatta sürekli büyüme gözlenmektedir. Kuru meyve olarak en çok ihraç edilen ürünlerin başında ise kayısı, üzüm, incir, erik ve elma gelmektedir. Türkiye bu ürünlerin ihracatı konusunda 2014 yılı verilerine göre ilk sırada yer almaktadır. 2023 yılında dünyadaki kuru meyve ihracatının 12 milyar USD mertebesinde bir büyüklüğe ulaşacağı öngörülmektedir. Bu çerçevede, 2023 yılında dünya tüm kuru meyve ve mamulleri ihracatında Türkiye'nin payının 4 milyar USD' ye çıkması beklenmektedir.

Özellikle kuru elma son yıllarda nihai tüketici tarafından doğrudan ve daha çok gıda endüstrisinde hammadde olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kuru elma bisküvi, pasta, kek, çikolata, kahvaltılık buğday gevrekleri, bitkisel çaylarda, bebek maması üretiminde ve kozmetik sanayinde tercih edilmektedir. Yaş meyve kadar kuru meyve de sağlık açısından önemli bir gıda ürünü olduğu için kuru elma nefes darlığı, astım ve kalp rahatsızlıklarına karşı koruyucu etkiye sahip olmasından, vücuttaki toksinleri atmaya yardımcı olmasından ve zengin bir lif yapısına sahip olduğu için bağırsakları temizleme özelliğinden dolayı özellikle son yıllarda çok tüketilen bir ürün haline gelmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sisteminde kurutulacak ürün olarak elma tercih edilmiştir. Bu çalışmanın

uygulama sürecinde özellikle elmanın tercih edilme sebeplerinin başında dört mevsim boyunca yetişen türlerinin olması gelmektedir. Diğer önemli bir sebep ise diğer meyve ve sebze türlerine göre ürün/girdi maliyetinin daha ucuz olmasıdır. Ayrıca tüm bu gerekçeler ışığında elde edilecek veri miktarının daha fazla olmasına oranla girdi maliyetlerinin daha düşük olacağı da öngörülmektedir.

Tüm bu öngörüler değerlendirildiğinde kuru meyve üretiminin artması ile yurtdışı pazarda yer bulma potansiyelinin artacağı da muhtemeldir. Kurutulmuş meyve ihracatında Türkiye hali hazırda iyi konumdadır. Dünya piyasasında rekabet şansını daha iyi konuma getirmenin en belirgin yolu ise ilgili tarım uygulamalarını uygulayarak, AB standartlarında ürün kalitesini yakalamaktır. Yeni tarım politikaları ile bu yönde plan ve programlar yapılmaktadır. Bu uygulamalarla Türkiye kurutulmuş meyve üretimi konusunda daha avantajlı konuma geçecektir.

Elmaların kurutulmasında genellikle iki kontrol yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kütle değişimine bağlı olarak ürünlerdeki nem kontrolü, ikincisi ise kurutma esnasında ve sonrasında yapılan duyu kontrolüdür.

Elmalar çekirdek evleri temizlendikten sonra ortalama 5 mm kalınlığında dilimlenir. Elmada tannin asit vardır. Elmanın kesik yüzeyi hava ile temas ettiğinde tannin asit havanın oksijeniyle tepkimeye gireceğinden kahverengi renkte polifenollerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu renk değişiminin önlenmesi için elma dilimleri kurutma işleminin öncesinde askorbik asit, askorbik-sitrik asit karışımı, askorbik asit sakaroz karışımı, limon suyu ya da sitrik asitli su içerisinde bekletilebilmektedir. Bu sayede, kurutma sonrasında gerçekleştirilen duyu kontrollerde elmalardaki renk değişimi göz ile görülebilmektedir. 5 mm kalınlıktaki elma dilimleri kurutulduktan sonra ikiye katlandığında elastik bir yapıya sahip olmalı ve kırılmamalıdır. Oradan ikiye bölünüp bakıldığında merkez bölgesinde nem olmamalıdır. Ağırlık değişimine göre ürünlerdeki nem kontrolünün belirlenebilmesi için tam kuru ağırlığının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için kurutma işlemine başlamadan önce elmalar yaklaşık 70 °C' de sabit tutulan bir fırında belirli aralıklarla tartılarak kurutulur, birbirini takip eden iki işlem sonucunda ağırlığın %1'den daha az olması durumunda elmalar tam kuru sayılır. Elma dilimi için kurutma sonrasında uygun olan su oranı 0.18 gr.su /gr.kuru ağırlıktır.

Elma dilimi içindeki su oranlarını yaş ve kuru esasa göre sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla hesaplamak mümkündür:

Yaş Ağırlığa Göre Su Oranı Hesabı:

$$SO = \frac{YA - KA}{YA} \quad (3.1)$$

Kuru Ağırlığa Göre Su Oranı Hesabı:

$$SO = \frac{KA - YA}{KA} \quad (3.2)$$

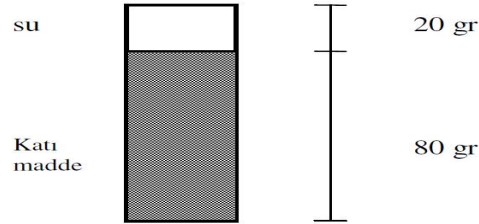
TSE elma kurusu için standart değerler oluşturmuştur. TSE 3688 olarak adlandırılan bu standartlarda kurutulacak ürünün ilk ve son nem değerleri, kurutma sonrası renk ve biçim yönünden kıstaslar ve elma kurusunda olabilecek katkı maddelerinin maksimum değerleri verilmektedir. TSE 3688 standartlarına göre kurutulmuş bir elmada aranan özellikleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- 1.)Sağlam, ezilmemiş, parçalanmamış, temiz ve etli kısımları esnek bir yapıya sahip olmalıdır.
- 2.)Yabancı tat ve koku almış olmamalıdır.
- 3.)Canlı böcek ve/veya akarlar ve çürüklük bulunmamalı, toleranslar dışında gözle görülebilir yabancı madde, ilaç artıkları, ölü böcek ve kalıntıları ile böcek zararları olmamalıdır.
- 4.)Renk, çeşide özgü olarak, kesik kenarlar hafifçe esmerleşmiş parlak krem (sarımsı-beyaz) veya açık kahverengi bulunmalıdır.
- 5.)Rutubet miktarı % 24'ü, SO₂ miktarı % 0.2'yi (2000 ppm) geçmemelidir.

Kurutma işlemlerinde öncelikle kurutulacak katıların yüzeylerindeki suyun başlangıçta sıvı fazda olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle ilk olarak bu suyun sıvı fazdan buhar fazına dönüştürülmesi gerekmektedir. Kurutulacak ürünü çevreleyen yüzeyden söz konusu sıvının uzaklaştırılması için ısı enerjisi gereklidir[46].

Su hemen hemen bütün gıda ürünleri için çok önemli bir bileşendir ve bilinen fiziksel ve kalite özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Söz konusu bu su (yaş baza göre % 50'nin altında bulunmadıkça) gıda ürünlerinde genellikle saf suyun fiziksel

özelliklerini gösterecektir. Nem miktarı azalmaya devam ettikçe ürünün içindeki su daha az aktif olacak ve saf su özelliklerinden uzaklaşacaktır. Örneğin donma veya kaynama sıcaklıkları değişecektir. Gıda maddeleri içindeki bu su, bu aşamada bağlı su olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak gıdaların nem içeriği, ürünün içindeki nemin yüzdesi olarak ifade edilir. Şekil 3.1'deki gösterimde, su içeriğini kuru ve yaş baz olarak ifade edilmesi görülmektedir.



Şekil 3.1 Elma dilimi içerisindeki su içeriğinin kuru ve yaş baza göre değişimi

Örnek kütle yaş baza göre %20 su içeriğindedir (yaş baz). Aynı örnek kütle, kuru baza göre %25 su içeriğindedir (kuru baz).

Elmanın kurutma öncesi hesaplamalarında, kurutma öncesi su içeriği % 85,3 kurutma sonrası su içeriği % 24 (yaş baza göre) olarak alınmıştır (TSE 3688). Bazı uygulamalarda elma kurutulmasında kurutma sonrası su içeriği %3 (yaş baz) değerine kadar inmektedir[51]. Bu çalışmanın kapsamındaki deneylerde % 20 su içeriği değerine (yaş baz) kadar kurutma yapılmıştır. Ayrıca kurutma denemelerinden önce, elma numuneleri kuru madde tayini için etüvde kurutularak kuru madde miktarı tespiti yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan kurutma sisteminde golden cinsi sarı ve yeşil renkte elma kurutulmuştur. Elmaların tam kuru haldeki su oranı kuru esasa göre eşitlik 2'den 5,4 g su/g kuru ağırlık olarak belirlenmiştir. Elmaların tam kuru haldeki su oranı yaş esasa göre ise eşitlik 1'den 0.85 g su/g yaş ağırlık olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda genellikle 5-7,5 kg arasında değişen miktarlarda elma kurutulması esnasında elmalar çekirdek yuvalarının temizlenmesi ve dilimlenmesi sırasında çok bekletilmediği için herhangi bir renk değişimi gözlemlenmemiştir. 30 kg elmanın kurutulduğu, tam kapasite olarak gerçekleştirilen, deneyde ise elmaların

bekleme süresinden dolayı kararmasını önlemek için dilimlendikten sonra yaklaşık 5 dakika kadar limonlu suda bekletilmiştir.

3.2 Kurutma Sistemlerinde Verim Tanımı

Kurutma sistemlerinin etkinliğinin belirlenebilmesi için özgül nem alma hızı, kuruma hızı ve nem alma verimlerinden yararlanılmaktadır. Aşağıda bunların tanımları verilmiştir:

Özgül Nem Alma Hızı (SMER):

Bir kurutma sisteminin enerji verimliliği genellikle özgül nem uzaklaştırma (SMER: Specific Moisture Extraction Rate) hızı ile belirlenir. Bu büyüklük, birim kWh enerji kullanımı için, kurutulacak üründen uzaklaştırılan su kütlesini göstermektedir. Bir kurutma sisteminin işletme maliyetleri enerji verimliliği için önemli bir parametredir[10]. SMER için $SMER_{hp}$ (üründen uzaklaşan nem oranı) ve $SMER_{ts}$ (üründen uzaklaşacak nem oranı) şeklinde iki tanımlama yapılabilir.

$$SMER_{hp} = \frac{M_{wa}}{E_g} \text{ (kg}_{H_2O}\text{/kWh)} \quad (3.3)$$

$$SMER_{ts} = \frac{M_{wb}}{E_g} \text{ (kg}_{H_2O}\text{/kWh)} \quad (3.4)$$

Nem Alma Verimi(Hızı)(MER):

Kurutucudan birim zamanda uzaklaştırılan nemin kütlesi olarak tanımlanır (MER: Moisture Extraction Rate).

$$MER = \frac{M_{wc}}{t_a} \eta \text{ (kg}_{H_2O}\text{/h)} \quad (3.5)$$

Nem Alma Verimi (η) :

Kurutma havası tarafından alınan nemin kurutma havasınca alınabilecek maksimum neme oranı olarak tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{w_2 - w_1}{w_a - w_1} \quad (3.6)$$

Bir başka nem alma verimi de kütle ve hava debisi ölçümlerinden yararlanılarak yapılan tanımdır.

$$\eta = \frac{m_0 - m_t}{V \rho t_k (w_a - w_1)} \quad (3.7)$$

3.3 Kurutma İşlemi Sırasında Meydana Gelen Kütle Transferinin Modellenmesi

Kütle transferinin modellenmesinde 2. Fick Kanunu tarafından nem difüzyonu olan tanımlanan etkin difüzyon katsayısı ile ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2(X) \quad (3.8)$$

(3.8) nolu eşitlik dilim, küp vb. farklı geometriler için uygulanabilmektedir. l kalınlığına ve sabit difüzyona sahip bir dilim için ortalama nem değerini veren bu çözüm aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$X_i^* = \frac{x_i - x_e}{x_0 - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4x l^2} \right) x t_k \right) \quad (3.9)$$

X_i^* elma dilimi için ortalama nem değeri olup kuruma süresi boyunca zamana bağlı nem içeriğini ifade etmektedir. Nem difüzyonunun nem ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu nedenle, değişken nem difüzyonu ile nem değişimini nümerik olarak ifade etmek gerekir[47-48].

Elma dilimi için difüzyon katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı değerleri sırasıyla 3.10, 3.11 ve 3.12 nolu eşitlikler ile hesaplanabilir:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R(T + 273)}\right) \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da yer alan Arrhenius eşitliği, Simal ve ark.[47] tarafından elma dilimi üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen optimum parametreler ile difüzyon katsayısını eşitlik 3.10a gösterildiği gibi hesaplamışlardır:

$$D_{eff} = 2,74 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{24034,2}{R(T + 273)}\right) \quad (3.10a)$$

$$\rho = 770 + 16.18X - 295,1e^{-X} \quad (3.11)$$

$$c_p = 1,675 + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{X} + 1} 2,5 \right) \quad (3.12)$$

Katı bir fazda nem difüzyonu kütle transfer mekanizmasının temelidir ve bir ürünün yüzeyindeki iletimsel nem transferini takip etmektedir. Isı transferi mekanizması ise iç ısı oluşumunu ve hava ile kurutma esnasında yüzeyde meydana gelen iletimsel ısı transferini içermektedir. Elma dilimleri içindeki sıcaklık ve nem profilini tanımlamak için bu çalışma kapsamında gerçekleştirdiğimiz matematiksel modelde yapılan kabulleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

1. Kurutulan madde içindeki nem ve sıcaklık dağılımları uniform bir şekilde gerçekleşmektedir.
2. Sadece iletim ve taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir.
3. Sıcaklık ve nem, nem difüzyonuna bağlıdır.
4. Sıvı fazda nem transferi maddenin içinde, buharlaşma ise sadece buharlaşma yüzeyinde meydana gelmektedir.
5. Kurutulan madde içindeki sıcaklık dağılımı uniformdur.

3.4 Kurutma İşlemi Sırasında Meydana Gelen Isı Transferinin Modellenmesi

Isı transferinin modellenmesi, Datta [49] tarafından verilen enerji dengesi düzenlenerek hesaplanabilmektedir:

$$\frac{d(MC_p \bar{T})}{dt} = Q_u + hA(T_a - \bar{T}) + \lambda \frac{dM}{dt} \quad (3.13)$$

Yazılan bu enerji dengesi kısaca şu anlama gelmektedir: Sıcaklık artış oranı; güneş kolektöründen gelen faydalı ısı miktarı(Q_u), taşınım yoluyla kazanılan ya da kaybedilen

ısı miktarı ve buharlaşmadan dolayı meydana gelen ısı miktarının toplamına eşittir.

Başlangıç koşulu olarak; $t_k=0$ anında, $\bar{T} = T_0$ ve $\bar{X} = X_0$ olarak alınabilir.

Taşınım ısı transfer katsayısı (h_s) ise Ranz ve Marshal [50] tarafından verilen eşitlik ile hesaplanabilmektedir:

$$\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = \exp \left[- \left(\frac{h_s A}{\rho C_p V} \right) t_k \right] \quad (3.14)$$

Nem içeriğinin bir fonksiyonu olan özgül ısı kapasitesi değeri eşitlik 3.12 ile hesaplanabilmektedir.

Elma diliminin kurutulması süresince geçirdiği ısı ve kütle transfer değişimleri sonlu farklar metodu kullanılarak modellenmiştir.

Kütle transferi modellemesi için eşitlik 3.9 sonlu farklar metoduna uyarlanarak kullanılmış ve buna bağlı olarak elma diliminin kuruma esnasında nem miktarındaki değişim denge nem miktarına gelinceye kadar zamana bağlı olarak incelenmiştir.

Isı transferi modellemesine geçmeden önce elma diliminin kuruması esnasında kütle değişimini ortalama nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak tanımlamak gerekir. Eşitlik 3.15’de ortalama nem içeriğinin sonlu farklar metoduna göre hesaplandığı bağıntı, eşitlik 3.16’da ise kütle değişimini nem içeriğine bağlı olarak hesaplayan bağıntı verilmektedir:

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_{n+1} + \bar{X}_n}{2} \quad (3.15)$$

$$M = M_s(1 + \bar{X}) \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.16’da yer alan M ve M_s sırasıyla kg cinsinden kuruyan elma diliminin ve kurumuş elma diliminin kütle değerini, $\bar{X}$ ise ortalama nem değerini ifade etmektedir. Isı transferi ise kütle değişimi ve özgül ısı değişimi kullanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}}{dt} + \frac{2,5Ms(d\bar{X}/dt) + hA\bar{T}}{Ms(1,675 + 2,5\bar{X})} \\ = \frac{Qu + hATa + \lambda Ms(d\bar{X}/dt)}{Ms(1,675 + 2,5\bar{X})} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.17'de yer alan ortalama sıcaklık ve nem değişiminin sonlu farklar metoduna göre hesaplanması aşağıdaki bağıntılar kullanılarak yapılabilir:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \frac{\bar{X}_{n+1} - \bar{X}_n}{\Delta t} \quad (3.18)$$

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{\bar{T}_{n+1} - \bar{T}_n}{\Delta t} \quad (3.19)$$

$$\bar{T} = \frac{\bar{T}_{n+1} + \bar{T}_n}{2} \quad (3.20)$$

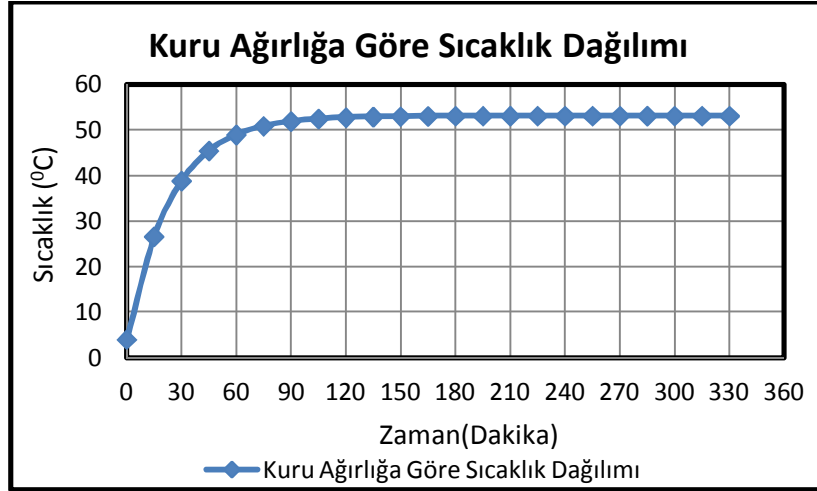
$\bar{X}$ eşitlik 3.15 kullanılarak hesaplanmıştır.

Eşitlik 3.15, 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20 kullanılarak kurutma esnasındaki sıcaklık dağılımı hesaplanabilmektedir.

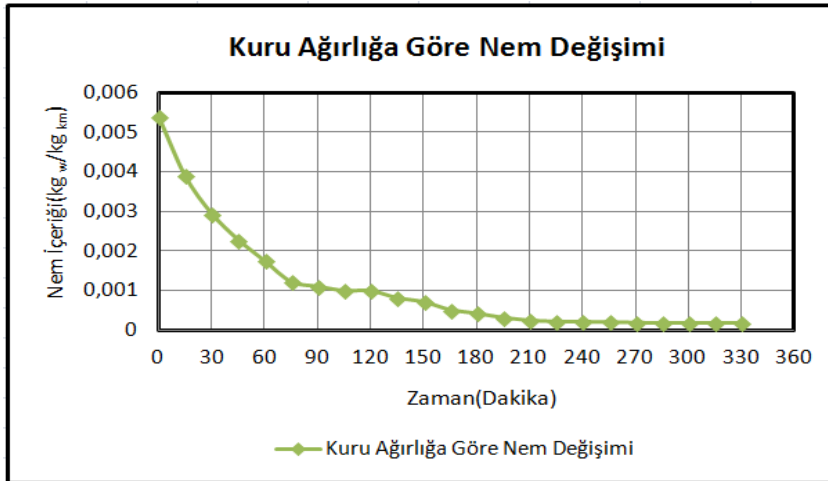
3.5 Simülasyon çalışması

Bu çalışmada java programlama dilinde sonlu farklar metodu kullanılarak elma diliminin kurutulması esnasında meydana gelen sıcaklık ve nem değişimlerini inceleyen "kurutma_sistemi. java" adlı simülasyon programı geliştirilerek yukarıda verilen denklemlerin çözülmesi sağlanmıştır. Geliştirilen bu simülasyon çalışması deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve bu simülasyon çalışmasının deneysel verilerle uyum sağladığı gözlemlenmiş olup doğruluğu deneysel olarak da kanıtlanmıştır. Bu deneysel çalışma kapsamında daha önce de bahsedildiği gibi başlangıçta ortalama 20°C sıcaklığındaki elmalar 5 mm kalınlığında dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiştir. Elmalar havalı güneş kolektöründen gelen sıcak hava ile kurutulmuştur. Kurutma işleminin başlamasından itibaren her 30 dakikada bir

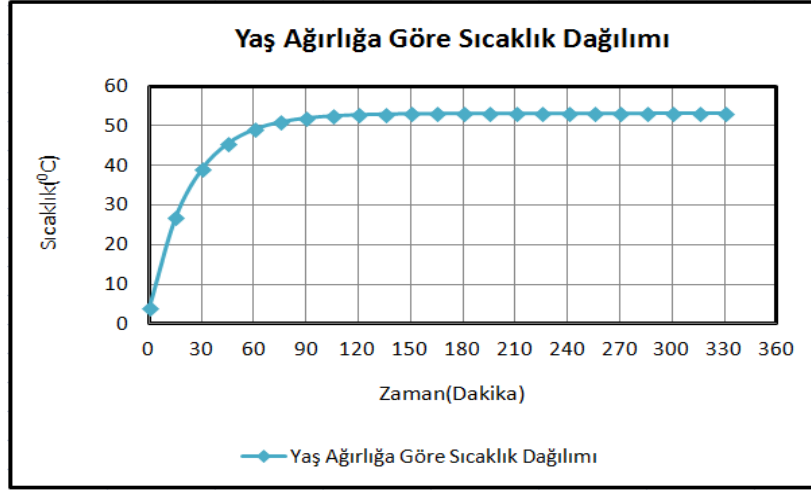
elmaların ağırlıkları ölçülmüştür. Elmalar 70°C ' de yaklaşık 8 saat süren kurutma işlemi sırasında belirlenen tam kuru ağırlığı olan 0.18 gr. su/gr. kuru ağırlık değerine ulaşınca kurutma işlemi sonlandırılmıştır. Bu simülasyon çalışmasında sonucunda elde edilen veriler Şekil 3.2- 3.5 'te yer alan grafiklerde gösterilmiştir:



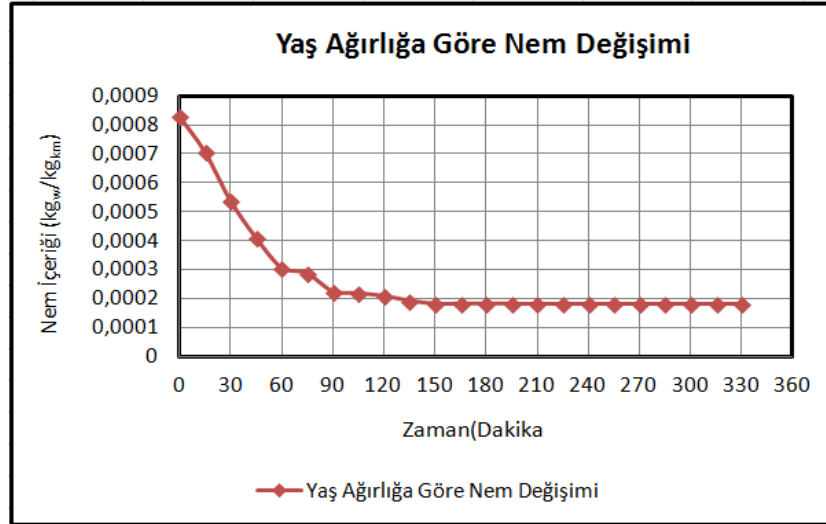
Şekil 3.2 Kuru ağırlığa göre elma dilimi üzerinde sıcaklık dağılımının gösterilişi



Şekil 3.3 Kuru ağırlığa göre elma dilimi üzerinde nem değişiminin gösterilişi



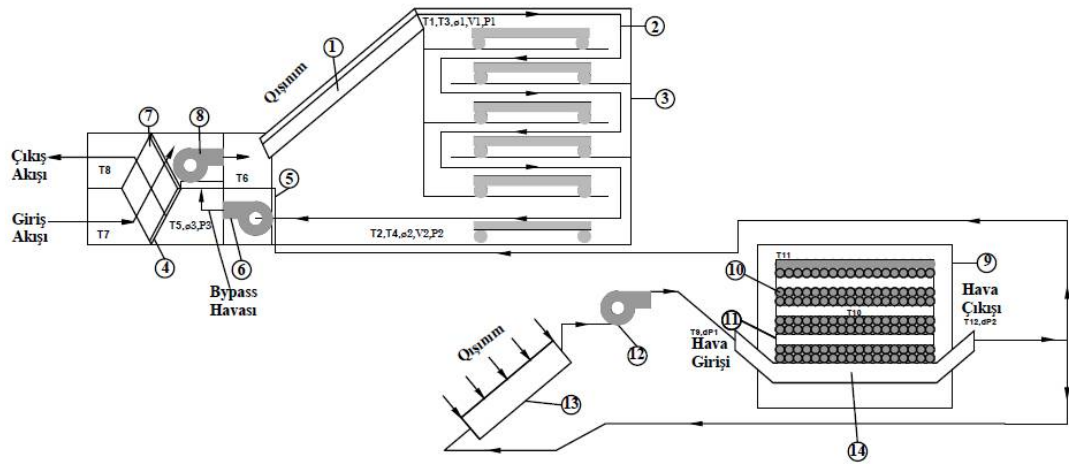
Şekil 3.4 Yaş ağırlığa göre elma dilimi üzerinde sıcaklık dağılımının gösterilişi



Şekil 3.5 Yaş ağırlığa göre elma dilimi üzerinde nem değişiminin gösterilişi

GÜNEŞ ENERJİLİ VE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLİ ZİRAİ ÜRÜN KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI

Bu çalışma kapsamında tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen güneş enerjili ve enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi deney düzeneğine ait akış şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



- | | | |
|--------------------------|--------------------|---------------------|
| 1. Güneş Toplayıcı | 6. Üfleme Fanı | 11. Delikli Izgara |
| 2. Kurutma Çekmecesini | 7. Isı Değiştirici | 12. Üfleme Fanı |
| 3. Kurutma Kabini | 8. Emiş Fanı | 13. Güneş Toplayıcı |
| 4. Açılır Kapanır Panjur | 9. İzolasyon | 14. Delikli Izgara |
| 5. Filtre | 10. Çakıl Taşı | |

Şekil 4.1. Güneş enerjili ve enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi akış şeması

Şekil 4.1'de akış şeması verilen Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b'de montaj resmi gösterilen bu deney düzeneğinin çalışma prensibi kısaca aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Güneş toplayıcısına gelen enerji fan yardımıyla kurutma kabinine girmekte ve üstten alta doğru dolaşarak kurutma kabini içerisindeki tepsilerde genellikle dilimler halinde yer alan elmaların nemini ısı ile buharlaştırarak kurutma havasına karışmasını sağlamaktadır. Böylece nem miktarı artan kurutma havasının zamanla nem alma yeteneği azalmaktadır. Nem miktarı artan kurutma havası fan yardımıyla reküperatör ünitesine gönderilerek, bu üniteye taze hava ile karıştırılmakta ve böylelikle atık ısının yaklaşık %50-60 oranında geri kazanılması sağlanmaktadır. Ayrıca, deney düzeneğinden bağımsız olan hassas terazi ile her raftan alınan elma dilimi numunelerinin ağırlıkları 30 dakikada bir ölçülerek ağırlık değişimleri gözlemlenmektedir. Bunun dışında güneş ışığının olmadığı zamanlarda kurutma işleminin sürekliliğini sağlayan çakıl taşı enerji depolama sistemi kurutma sisteminden bağımsız olarak çalışmakta olup şekilde de görüldüğü üzere enerji depolama sisteminin hava çıkışı noktasından bir fan yardımıyla bünyesinde tuttuğu enerjiyi kurutma kabinine aktarmaktadır. Çakıl taşı enerji depolama sistemi deney düzeneğinden bağımsız olup havalı güneş kolektörüne gelen enerjiyi bir fan vasıtasıyla çakıl taşı enerji yatağına ileterek burada enerjinin depolanması sağlamaktadır. Çakıl taşı enerji yatağında hava ile ısı transferinin hızlı ve kolay bir şekilde olmasını sağlamak için şekil üzerinde de görüldüğü gibi çakıl taşları arasında belirli aralıklarla delikli ızgara şeklinde plakalar yer almaktadır. Akış şeması üzerinde yer alan T, ϕ , V ve P simgeleri sırasıyla sistem üzerinde ölçüm alınan sıcaklık, bağıl nem, hava hızı ve hava basıncı değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.2a Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi montaj resmi (önden görünüş)

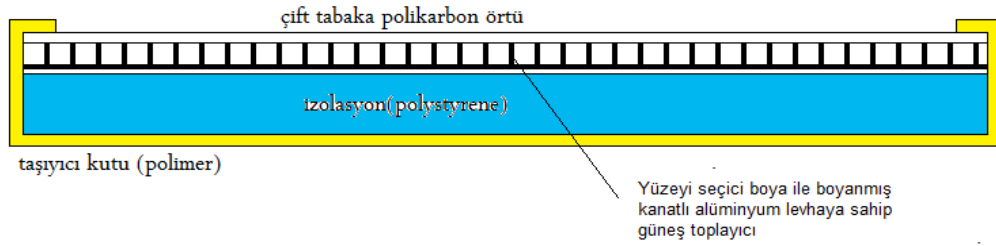


Şekil 4.2b Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli zirai ürün kurutma sistemi montaj resmi (arkadan görünüş)

Deney düzeneği, güneş toplayıcı olarak havalı kolektör sistemi, çakıl taşı enerji depolama sistemi, kurutma kabini, düzenek içindeki hava akışını sağlayan fan sistemi, düzenek içindeki atık ısının geri kazanımını sağlayan reküperatör ünitesi ve test ünitelerinden oluşmaktadır. Bu sistemler ile ilgili tasarım ve malzeme seçim kriterleri geliştirilen bilgisayar benzeşimlerinden yararlanılarak belirlenmiştir. Deney düzeneğinde yer alan bu sistemlerle ilgili kriterleri her bir sistem için aşağıdaki gibi açıklamak mümkündür:

4.1 Güneş Toplayıcı Sistem

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon çalışması ile güneş toplayıcısına gelen enerji miktarı güneş açılarına ve zamana bağlı olarak herhangi bir şehir için hesaplanabilmektedir. Bu simülasyon programından yola çıkılarak güneşten elde edebilecek enerji miktarına göre güneş toplayıcısı olarak kullanılan havalı kolektör sisteminin boyutları belirlenmiş ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarıma ilişkin şematik resim Şekil 4.3'de, montaj resmi ise Şekil 4.4'de verilmiştir. Güneş toplayıcı olarak kullanılan havalı güneş kolektörü, sistemin kanatlı bir yapıda olmasının daha uygun olacağı göz önüne alındığında sistemin temel olarak iki ucu tamamen açık olan toplayıcıların ana gövdesi polikarbon malzemeden kalıpta hazırlanmış bir ana parçanın içine yerleştirilmiş izolasyon(polystyrene), güneş toplayıcı levha ve iki katlı polikarbon tabakadan oluşan ve güneş ışığını geçiren tabakadan meydana gelmektedir. Bu çalışmada 2 adet kurutma sisteminde, 3 adet de çakıl taşı enerji depolama sisteminde olmak üzere toplamda 5 adet güneş toplayıcı sistem(havalı güneş kolektörü) kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Güneş toplayıcı sistemin şematik resmi



Şekil 4.4 Güneş toplayıcı sistem(Havalı güneş kolektörü) montaj resmi

4.2 Kurutma Kabini

Bu çalışma kapsamında geliştirilen deney düzeneğinde elma kurutulması işlemi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, kurutma kabinine tepsilere genellikle 5 mm kalınlıkta kesilerek dilimler halinde tepsilere yerleştirilen elma dilimlerinin sıcaklık ve nem miktarının zamana bağlı değişimini hesaplayan bilgisayar benzeşimi oluşturulmuştur. Geliştirilen bu programdan yola çıkılarak bu çalışma için ihtiyaç duyulan kurutma kabininin boyutları belirlenmiş ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Kurutma kabini için polimer malzeme kullanılmıştır. Güneşi toplayacak olan seçici boya ile boyanmış metal (alüminyum) hariç tüm sistem polimer malzemeden oluşmaktadır. Temel kabin malzemesi olarak izoboard kullanılmıştır. Taşıyıcı çerçeve malzemesi olarak da alüminyum profil kullanılmıştır. Göreceli küçük boyutlardaki kabin tipi kurutucularda hiçbir boru bağlantısı olmadığı için tüm akış birbirinden ayrılmış odacıklar halindeki yapının içinde oluşmaktadır. Çekmecelere ulaşım kabin arkasında bulunan kapak tarafından yapılmaktadır. Kurutma kabininin şematik resmi Şekil 4.5'te, montaj resmi ise Şekil 4.6a ve Şekil 4.6b'de verilmiştir:



Şekil 4.5 Kurutma kabini şematik resmi



Şekil 4.6a Kurutma kabini montaj resmi (yapım aşaması)



Şekil 4.6b Kurutma kabini montaj resmi (son hali)

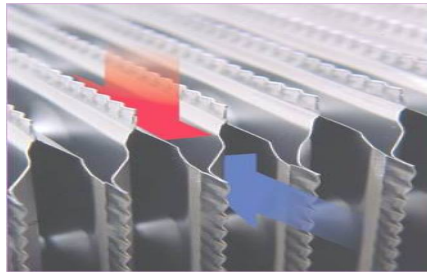
4.3 Atık Isı Geri Kazanım Sistemi(Rekuperatör Ünitesi)

Bu çalışma kapsamında geliştirilen deney düzeneğinde meydana gelen atık ısının yaklaşık %50-60 oranında geri kazanılmasını sağlayan rekuperatör ünitesi çapraz akışlı ısı değiştiricidir. Çapraz akışlı bu ısı değiştiricilerinin iki boyutlu sonlu farklar modeli ile ısı değiştirici üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hesapları yapılarak modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çapraz akışlı ısı değiştiricileri birbirine paralel levhalardan oluşur ve bir levhadan sıcak akışkan akarken bir sonraki levhadan soğuk akışkan çapraz olarak akar. Bu yapı birçok levha halinde tekrarlanır. Diferansiyel denklem sonlu farklar denklemi haline getirildikten sonra iki giriş sıcaklığının bilindiği köşeden başlamak suretiyle satırlar halinde çözülerek ilerlenir ve bu şekilde tüm ısı değiştiricinin sıcaklık

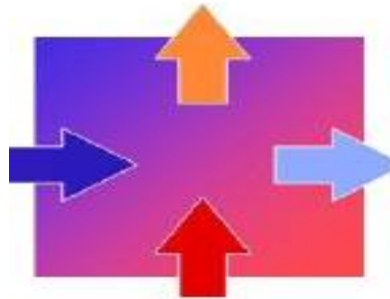
profiline ulaşılır. Isı değıştiriciden çıkan gazın sıcaklığı çıkış profilinin karışımı olacağından ortalama çıkış sıcaklıkları hesaplanarak çıkış profili oluşturulur. Bu modelleme çalışmasında soğuk akışkan olarak tüm analizlerde hava alınmıştır. Sıcak akışkan olarak ise hava ve nümerik çalışma için yanma gazları(baca ısı geri kazanımı) alınarak ısı değıştiricinin performansı irdelenmiştir. Yanma gazlarının ve havanın termodinamik ve termofiziksel özellikleri(viskozite,ısı iletkenlik katsayısı vb.) hal denklemleri ve polinom denklemleri elde edilmiş veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemler kullanılarak da java programlama diliyle bir benzeşim programı geliştirilmiştir.

4.3.1 Reküperatör Ünitesinin Isıl Analizi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de çapraz akışlı reküperatör ünitesi üzerinde sıcaklık dağılımı verilmektedir. Bu kesitlerde görüldüğü üzere sistemde yer alan kurutmadan çıkan hava aşağıdan girmekte, yukarıdan çıkmaktadır. Taze hava ise sol taraftan girmekte, sağ taraftan çıkmaktadır.

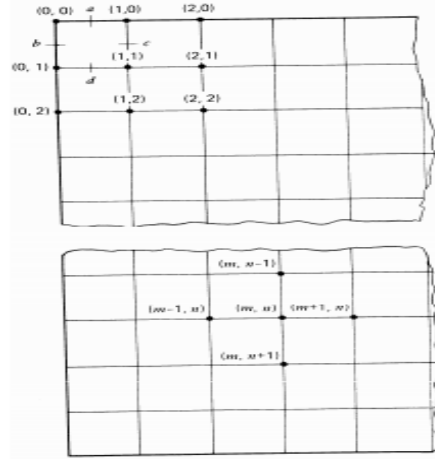


Şekil 4.7 Reküperatör üzerindeki sıcaklık dağılımının şematik gösterimi



Şekil 4.8 Çapraz akışlı ısı değıştirici üzerindeki genel sıcaklık dağılım konfigürasyonu

Sayısal olarak sıcaklık dağılımının bulunması, Şekil 4.9'da da gösterildiği gibi sıcaklıkları belli olmayan her düğüm noktasında uygun denge eşitliğinin yazılmasını gerektirmektedir. Bulunan eşitlik takımı, her noktadaki sıcaklık için birbirlerine bağlı olarak çözülebilir. Bu çözümü sağlamak için reküperatör plakaları yüzeyinden geçen ısı transfer miktarının hesaplanması gerekmektedir.



Şekil 4.9 Reküperatör plaka kesitinde sonlu fark gösterimi

Temel ısı transfer bağıntısı yazıldığında;

$$Q = UA(T_h - T_c) \quad (4.1)$$

olacaktır. Her bir plaka yüzeyinden geçen ısı miktarı ise;

$$dQ = U dA(T_h - T_c) \quad (4.2)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Toplam ısı transfer katsayısını hesaplamak için hem iç akışkan hem de taze akışkana ait ısı taşınım katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Her iki taraftaki ısı taşınım katsayılarının hesaplanabilmesi için her iki akışkana ait hız değerlerinin, Reynold's sayılarının ve sürtünme faktörünün hesaplanması gerekmektedir. Yapmış olduğumuz bu çalışmada akışımız dik (çapraz) olduğu için x yönünde iç akışkan girişi ve y yönünde taze akışkan girişi olduğu kabul edilmiştir. Buna göre x yönündeki hız değerini;

$$V_x = \frac{\dot{m}}{\rho_a A} \quad (4.3)$$

hesaplamak mümkündür.

Burada;

$$\dot{m} = \frac{d \dot{m}_h}{2} \quad (4.4)$$

olup plaka üzerinde bölünen her bir nokta üzerindeki kütleli debiyi ifade etmektedir.

Plaka üzerinde x yönünde bölünen her bir yüzeyin alanı A_x ile ifade edilmekte olup;

$$A_x = \frac{W dz}{2} \quad (4.5)$$

bağıntısıyla verilmektedir.

Benzer şekilde y yönündeki hız değeri de ;

$$V_y = \frac{\dot{m}}{\rho_a A} \quad (4.6)$$

hesaplamak mümkündür.

Burada;

$$\dot{m}_c = \frac{d \dot{m}_c}{2} \quad (4.7)$$

olup plaka üzerinde bölünen her bir nokta üzerindeki kütleli debiyi ifade etmektedir.

Plaka üzerinde y yönünde bölünen her bir yüzeyin alanı A_y ile ifade edilmekte olup

$$A_y = \frac{L_a dz}{2} \quad \text{bağıntısıyla verilmektedir.} \quad (4.8)$$

x yönündeki Reynold's (Re_x) Sayısının hesaplanması:

Rekuperatör ünitesi dikdörtgensel bir geometriye sahip olduğundan Re_x sayısının hesaplanması için hidrolik çap değerinin bilinmesi gerekmektedir. Hidrolik çap değeri;

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (4.9)$$

bağıntısıyla verilebilir.

Bu bağıntıda;

A- Plaka üzerindeki her bir parçanın x yönündeki yüzey alanı olup $A = \frac{Wdz}{2}$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

P-Plaka üzerindeki her bir parçanın x yönündeki çevresel uzunluğu olup;

$$P = 2(W + dz) \quad (4.10)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Buna göre;

$$Re_x = \frac{\rho V_x D_h}{\mu} \quad (4.11)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte yer alan μ değeri akışkanın viskozitesini ifade etmektedir.

Benzer şekilde y yönündeki Reynold's(Re_y) sayısı da hesaplanabilir:

Hidrolik çap değeri eşitlik 4.9 ile hesaplanabilir. Bu bağıntıda;

A- Plaka üzerindeki her bir parçanın x yönündeki yüzey alanı olup

$$A = \frac{L_a dz}{2} \text{ bağıntısıyla hesaplanmaktadır.} \quad (4.12)$$

P-Plaka üzerindeki her bir parçanın x yönündeki çevresel uzunluğu olup

$$P = 2(L_a + dz) \quad (4.13)$$

olarak bulunur. Buna göre;

$$Re_y = \frac{\rho V_y D_h}{\mu} \quad (4.14)$$

Sürtünme faktörünün hesaplanması

Yapmış olduğumuz bu çalışmada sürtünme faktörünün hesaplanması için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Bu eşitliklerde yer alan g harfi m/s^2 cinsinden yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a \left[\ln\left(\frac{d}{q}\right) + D_{CFA} \right] \quad (4.15)$$

Bu eşitlikte;

$$a = \frac{2,0}{\ln(10)} \quad (4.16)$$

$$d = \frac{\ln(10) Re}{5,02} \quad (4.17)$$

$$q = s^{s/s+1} \quad (4.18)$$

$$s = bd + \ln(d) \quad (4.19)$$

$$b = \frac{\varepsilon/D}{3.7} \quad (4.20)$$

$$D_{CFA} = D_{LA} \left(1 + \frac{z/2}{(g+1)^2 + (z/3)(2g-1)} \right) \quad (4.21)$$

$$D_{LA} = z \frac{g}{g+1} \quad (4.22)$$

$$g = bd + \ln\left(\frac{d}{q}\right) \quad (4.23)$$

$$z = \frac{\ln(q)}{g} \quad (4.24)$$

Isı taşınım katsayılarının(h_x ve h_y) hesaplanması

Hem x hem de y yönündeki ısı taşınım katsayılarının hesaplanması Reynold's sayılarının büyüklüğüne bağlıdır.

$Re_x / Re_y < 2300$ ise laminar akış olduğu için Nusselt Sayısı (Nu) sabittir ve 3.66 değerini alır. Fakat $Re_x / Re_y > 2300$ ise akış türbülanslıdır ve bu durumda Nu sayısı aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilir:

x yönündeki akışkan için;

$$Nu = \frac{(f/8)(Re_x - 1000) * Pr}{(1 + 12,7\sqrt{f/8})(Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.25)$$

y yönündeki akışkan için;

$$Nu = \frac{(f/8)(Re_y - 1000) Pr}{(1 + 12,7\sqrt{f/8})(Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.26)$$

$$h_x, h_y = \frac{Nu_k}{D_h} \quad (4.27)$$

k-Akışkan için ısı iletim katsayısı(W/mK)

Toplam ısı transfer katsayısının hesaplanması:

x yönündeki ısı taşınım katsayısını iç ısı taşınım katsayısı ve y yönündeki ısı taşınım katsayısını dış ısı taşınım katsayısı olarak kabul ettiğimizde toplam ısı transfer katsayısını aşağıdaki eşitliği kullanarak hesaplayabiliriz:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_d} + \frac{L_m}{k_t} + R_{hg} + R_{sg}} \quad (4.28)$$

Bir bilgisayar modeli oluşturabilmek için ek olarak suyun ve havanın termodinamik ve termofiziksel özelliklerini de hesaplayabilmek gerekir. Havanın termodinamik denklemlerini oluştururken havanın ideal gaz olduğu kabul edilir. Burada hava özgül ısı

değerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değiştiği ancak basınç veya yoğunluğun fonksiyonu olarak değişmediği varsayılmıştır. Ayrıca özgül ısı kısmi devamlı denklemler olarak verilmiştir. Bunun sebebi hava entalpi denkleminin tablolarda verilen denklemlerle daha uyumlu olmasının sağlanmasıdır. Kuru hava için özgül ısı denklemi:

$$c_{p_i}(T) = A_i + B_i \times 10^{-3} T + C_i \times 10^5 / T + D_i \times 10^{-6} T^2 \quad (4.29)$$

$$T_{Li} > T > T_{Hi}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Bu denklemde yer alan A_i , B_i , C_i ve D_i denklemin T_{Li} , T_{Hi} sıcaklık bölgesinde geçerli olan katsayılarıdır. Çeşitli sıcaklık aralıkları için farklı katsayılar tanımlamak mümkündür. Bu katsayılar gerçek tablo değerlerinden nümerik yöntemler yardımıyla elde edilebilirler. Bu durumda en küçük kareler yöntemi genelde en yaygın kullanılan yöntemidir. Hava için kullanılan bu katsayılar Çizelge 4.1'de verilmiştir:

Çizelge 4.1. Hava için özgül ısı değeri kısmi devamlı denklem katsayıları

A_i (KJ/kmol K)	$B_i \times 10^3$ (KJ/kmol K)	$C_i \times 10^{-5}$ (KJ/kmol K)	$D_i \times 10^6$ (KJ/kmol K)
9.0471613138	-0.43371335025	-0.00000234324	1.81771922391
7.2078049754	2.82769845957	0.65953188644	3.73015894390
3.1528875054	13.57204518133	1.77125763993	-3.8619139522
2.6263656207	2.90565403695	-21.5949288411	-0.4261720791
4.2818729959	1.66394564405	-30.4616728115	-0.1631941480
0.9090769614	-0.88928617682	-166.788901058	0.11814251617

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü üzere verilen özgül ısı denklemi KJ/kmol K birimine sahiptir. Fakat hesaplamalarda KJ/kg K birimine dönüştürmek gerekmektedir. Bu dönüşümü gerçekleştirmek için denklem 4.29'u havanın moleküler ağırlığına (kg/kmol) bölerek elde etmek mümkündür.

4.3.1.1 Reküperatörde Plaka Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

Plaka yüzeylerinde, üzerinden geçen farklı iki hava akımının sıcaklıklarına bağlı olarak, farklı sıcaklıklarda bölgeler oluşur. Bu sıcaklık dağılımı aşağıda yer alan şekilde gösterilen simülasyonda kırmızı ve mavi tonları ile verilmiştir. En soğuk köşe; soğuk hava akımına en yakın, sıcak hava akımına en uzak olan köşedir. En sıcak köşe ise, sıcak hava akımına en yakın, soğuk hava akımına en uzak köşedir. Çapraz akışlı reküperatörlerde bu iki köşe zıt taraflarda yer alır. Diğer iki köşe ise nerede ise eşit sıcaklıklarda ve en soğuk ile en sıcak köşenin ortalama sıcaklığına sahip olurlar. Yoğuşmanın başladığı bölge en soğuk köşe olarak ifade edilir. Yukarıda da belirtildiği gibi, ünite içi konfigürasyonda reküperatör, en soğuk köşesi aşağıya gelecek şekilde monte edilmelidir. Aksi halde ılık hava akımı, içinden ayrılan su buharını su olarak yukarı taşımaya çalışacak ve beklenmeyen basınç düşümlerinin yaşanmasına sebebiyet verecektir. Yatay plakalı kullanımlarda ise, suyun plaka yüzeyinde birikmeden akabilmesi için reküperatör, ünite içine plakaları yatay ile 4-7 ° açı yapacak şekilde yerleştirilmelidir.

Sayısal olarak sıcaklık dağılımının bulunması için her noktadaki sıcaklığın birbirine bağlı olduğunu göz önüne alındığında ilk önce iç akışkanın ve taze akışkanın giriş sıcaklıklarını tayin etmek gerekmektedir. Burada iç akışkan sıcaklık değeri T_h ve taze akışkan sıcaklık değeri T_c olarak ifade edilmiştir. Reküperatörde ısı transferi iki boyutlu olduğu için;

Başlangıç koşulları;

$$T_h(0,y)=T_{h_in} \quad (4.30)$$

$$T_c(x,0)=T_{c_in} \quad (4.31)$$

olarak belirtilir.

Reküperatör plakası üzerindeki sıcaklık dağılımını, plaka üzerinde bölünen her bir parçanın yüzeyinden geçen ısı miktarını belirleyerek hesaplamak mümkündür. Bir önceki bölümde belirtilen bu eşitlik sonlu farklar metoduna göre yeniden düzenlendiğinde;

$$dQ = U dA (T_c(i, j) - T_h(i, j)) \quad (4.32)$$

olarak karşımıza çıkacaktır.

İç ve taze akışkanın giriş sıcaklık değerini belirlediğimizde bir sonraki adımda karşılaşacağımız sıcaklık değerini (4.32) nolu eşitliği kullanarak hesaplanabilir.

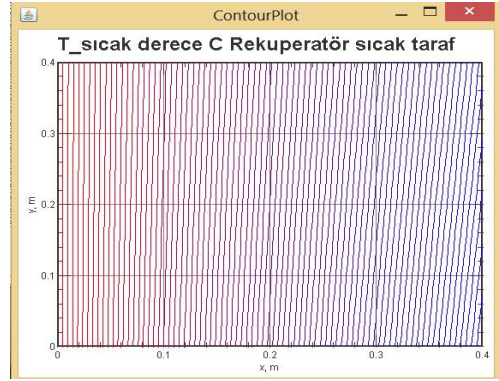
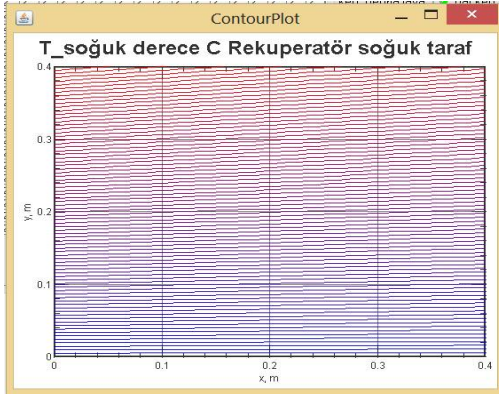
İç akışkan için;

$$Th(i+1, j) = Th(i, j) + \frac{dQ}{c_{p_h} \frac{dm_h}{2}} \quad (4.33)$$

Taze akışkan için;

$$Tc(i, j+1) = Tc(i, j) - \frac{dQ}{c_{p_c} \frac{dm_c}{2}} \quad (4.34)$$

Yukarıda da bahsedildiği üzere çapraz akışlı reküperatör(ısı değiştirici) modeli için java programlama dilinde programlar geliştirilmiştir. Gazların termodinamik ve termofiziksel özellikleri için "Gas.java", gaz karışımlarının termodinamik özellikleri için "Gmix.java", hava- hava reküperatör modeli için "recuperator1.java", yanma gazı -hava reküperatör modeli için ise "recuperator2.java" programları hazırlanarak önceki bölümde verilen denklemlerin çözülmesi sağlanmıştır. Bu modelleme çalışmasından yola çıkılarak bu çalışma kapsamında istenilen kapasiteye sahip reküperatör ünitesi için veri olarak $m_{sıcak,gaz} = 0,635 \text{ kg/s}$ ve $m_{soğuk,gaz} = 0,54 \text{ kg/s}$, levha boyutu $= 0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$, kanal yüksekliği $= 2,25 \text{ mm}$, levha sayısı $= 140$ olarak ve hava giriş sıcaklıklarını soğuk hava 20°C ve sıcak hava için 75°C alındığında bu durumda oluşabilecek modelleme çıktıları Şekil 4.10- 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.10 Isı değıştirici sonlu eleman analizi sıcaklık profili kontur grafiğı

data output(veri çikış) :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.21881062	20.21772444	20.21664419	20.21556982	20.21450132	20.21343683	20.21238172	20.21133056	20.21028511	20.209245349	20.20821122	20.207182702	20.206159075	20.205142350	20.20413045	20.203124022	20.20212303	20.201127451	20.20013724	20.199152374	20.19817281
20.43682894	20.4346428	20.43251141	20.43037027	20.42824077	20.42612235	20.42401644	20.42192147	20.41983768	20.41776553	20.41570447	20.413654546	20.41161571	20.409587895	20.40757105	20.405565092	20.40356995	20.40158574	20.39961188	20.397648829	20.39569633
20.65405962	20.65082116	20.64760330	20.64440293	20.64121995	20.63805424	20.63490951	20.63177424	20.62865284	20.625550294	20.62248120	20.619436928	20.616413866	20.613338066	20.61032219	20.607324569	20.60434210	20.601375990	20.59842623	20.59549048	20.59257182
20.87049534	20.86719674	20.86392148	20.86066942	20.85744042	20.85423435	20.851045105	20.84788939	20.844767231	20.841683948	20.838635223	20.83562428	20.83264419	20.829694227	20.826773823	20.823883	20.820943809	20.8180444081	20.81518498114	20.79567859	20.792677108
20.88146675	20.88079264	20.879546755	20.878171132	20.876490377	20.874566472	20.8724545400	20.870192143	20.867741185	20.865190885	20.862559085	20.85994614	20.857338906	20.854746191	20.852177497	20.849633756	20.847110804	20.8446161	20.8421386741	20.839695157	20.8372719108
20.130101250	20.29461049	20.28824314	20.28191023	20.27561156	20.26934691	20.26311608	20.25691887	20.25076506	20.24462466	20.23852686	20.2324602073	20.226422988	20.220430098	20.21446252	20.208528966	20.20262323	20.196751123	20.19081045	20.1848101035	20.17832287
20.151509424	20.150765193	20.150024984	20.149288773	20.148555535	20.147828246	20.147103882	20.146383420	20.145668035	20.1449541049	20.1442425204	20.1435401121	20.142838803	20.1421412568	20.141447448	20.1407573565	20.140070958	20.1393882310	20.138709153	20.1380337027	20.137361657
20.172839362	20.171991857	20.171148825	20.170310639	20.169476669	20.168647290	20.1678222373	20.167001892	20.166185819	20.1653741287	20.164566793	20.1637637867	20.1629659082	20.162170559	20.161380479	20.1605945290	20.159812778	20.1590352015	20.158261774	20.15749204716	20.156727288
20.194091225	20.193141202	20.192196297	20.191256478	20.190321714	20.189381976	20.1884467231	20.1875147451	20.1865832605	20.1856522628	20.1847187594	20.1837917319	20.1828731944	20.18196321944	20.181061425480	20.18016843469	20.1792847913	20.1783961526	20.17749035	20.1765885353	20.175682823
20.215265178	20.214213389	20.213167257	20.212126747	20.211091825	20.210062456	20.209038608	20.208020246	20.207007338	20.2059999514	20.204997752	20.204001080	20.203005907	20.2020234571	20.201042568	20.2000698429	20.199096485	20.1981312131	20.197171064	20.1962160188	20.195265045
20.236361383	20.235206579	20.234061985	20.232921503	20.231787154	20.230658883	20.229539852	20.228420425	20.227310166	20.2262050387	20.225107408	20.2240148352	20.222928088	20.2218471318	20.220771930	20.2197024491	20.218638654	20.2175805114	20.216527986	20.2154810488	20.214439657
20.257380002	20.256126933	20.254880579	20.253640901	20.252407857	20.251181409	20.249961515	20.248748136	20.247541234	20.2463407883	20.245148700	20.2439589930	20.2427771606	20.2416025036	20.240433948	20.2392708973	20.238114519	20.2369641754	20.235819928	20.2346817432	20.233549882
20.278321188	20.276988609	20.275623256	20.274265097	20.272924088	20.271630184	20.270313345	20.269003526	20.267700686	20.2664047837	20.265115775	20.2638336209	20.262558278	20.2612897080	20.260027868	20.2587727191	20.257524220	20.2562823329	20.255047016	20.2538162321	20.252594940
20.299185132	20.297733767	20.296290155	20.294854027	20.293425698	20.292005382	20.290592292	20.289186743	20.287788070	20.2863980279	20.285014772	20.283638854	20.282270242	20.2809108802	20.279554729	20.2782071458	20.276878807	20.2755531114	20.274239374	20.2729380374	20.2716578855
20.319971966	20.318425568	20.316881432	20.315348506	20.313823742	20.312307091	20.310789504	20.309287933	20.307803238	20.3063240440	20.304843831	20.3033748034	20.301913633	20.3004601553	20.299014362	20.2975782088	20.296146549	20.2947226382	20.293307130	20.2918998024	20.290494948
20.340681862	20.339035171	20.337397244	20.335768029	20.334147473	20.332535525	20.330932132	20.329337243	20.327750807	20.3261727748	20.324603094	20.3230417158	20.321488590	20.3199436861	20.318405800	20.3168782369	20.315356734	20.3138450405	20.312344048	20.3108436905	20.309354840
20.361314861	20.359571735	20.357837750	20.356112672	20.354397344	20.352690813	20.350993323	20.349304820	20.347625251	20.3459545831	20.344292701	20.3426396140	20.340995248	20.3393595534	20.337732478	20.3361139668	20.334503973	20.3329024452	20.331308332	20.3297245851	20.328148153
20.381871484	20.380032418	20.378203106	20.376383488	20.374573508	20.372773106	20.370982226	20.369200812	20.367428805	20.3656661514	20.363912793	20.362168766	20.360433745	20.3587079459	20.356991223	20.3552835234	20.353584793	20.3518949782	20.350214028	20.3485418891	20.346876508
20.402351533	20.40047381	20.398493469	20.396579734	20.394678117	20.392782556	20.390898891	20.389025363	20.387161813	20.3853078823	20.383453511	20.3816029420	20.37984217	20.378088800	20.376343372	20.374607394	20.372880223	20.371163276	20.369455965	20.367758256	20.366064028
20.422755290	20.420726783	20.418708896	20.416701864	20.414705324	20.412719312	20.410743766	20.408778822	20.406823820	20.404879284	20.402944994	20.401020489	20.399106800	20.3972027804	20.395308758	20.393424453	20.391550392	20.3896859426	20.387831236	20.3859860275	20.384158828

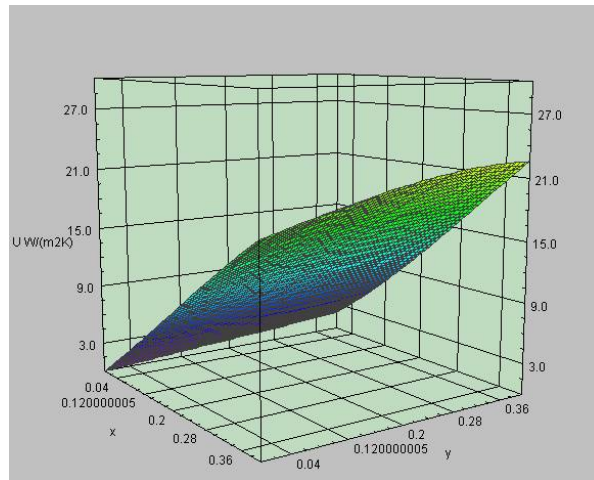
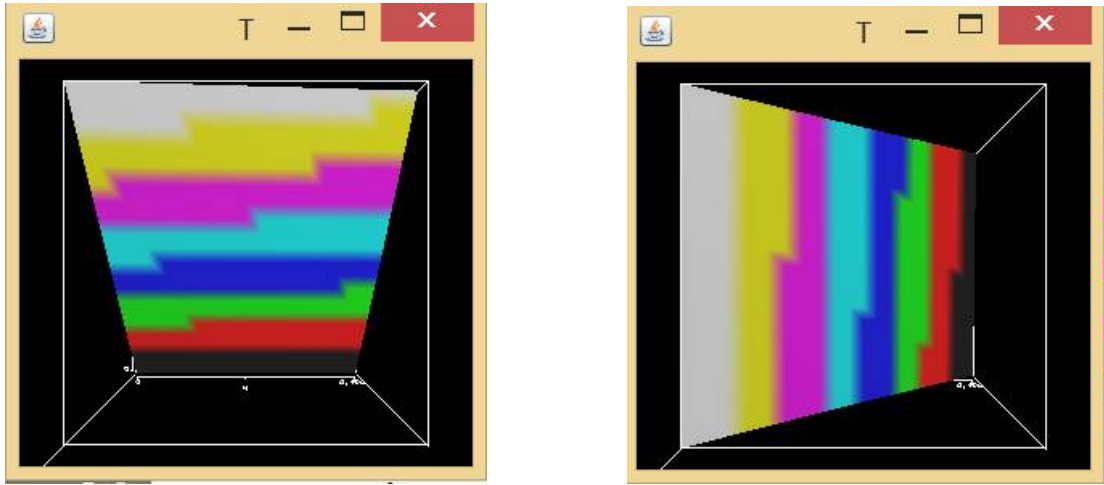
Şekil 4.11 Isı değıştirici sonlu eleman analizi soğuk hava profili

data output(veri çıkışı) :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
75.0	74.74387550	74.48981680	74.23541706	73.98308498	73.73196730	73.48210382	73.23347235	72.98608625	72.739878949	72.4940388	72.251134490	72.00859435	71.767187005	71.52699805	71.287985137	71.05014792	70.813478142	70.57798953	70.343615881	70.11041102
75.0	74.74479758	74.49085205	74.23815663	73.98670458	73.73648923	73.48750392	73.23874205	72.99319704	72.747862377	72.50373155	72.260179833	72.01905569	71.778487862	71.53911830	71.300910721	71.06386885	70.827986470	70.59325738	70.359675469	70.12723458
75.0	74.74571178	74.49268235	74.24008881	73.99032991	73.74099902	73.49288956	73.24598498	73.00308880	72.758624543	72.51253578	72.2670436134	72.023951925	71.789778821	71.55120867	71.313802273	71.07755371	70.842456751	70.60859524	70.375931111	70.14001429
75.0	74.74663427	74.49450769	74.24361361	73.99394545	73.74549865	73.49828701	73.25222114	73.00740150	72.763795418	72.52131651	72.280048463	72.03995499	71.801029851	71.56328683	71.326659577	71.09102048	70.856888845	70.62371304	70.391688761	70.16075010
75.0	74.74754887	74.49632806	74.24604100	73.99571190	73.74988212	73.50361736	73.25845048	73.01447513	72.7719583202	72.53800737	72.299195895	72.06074290	71.823441982	71.58728716	71.352272379	71.11838162	70.88538913	70.65400831	70.423493822	70.19407995
75.0	74.74846096	74.49814346	74.24904100	74.00114712	73.75449541	73.50895949	73.26465301	73.02152967	72.779830202	72.53800737	72.299195895	72.06074290	71.823441982	71.58728716	71.352272379	71.11838162	70.88538913	70.65400831	70.423493822	70.19407995
75.0	74.74937055	74.4995388	74.25114358	74.00473324	73.75891651	73.51428709	73.27083869	73.02865609	72.787480695	72.54751745	72.308731143	72.07108502	71.834603041	71.59824917	71.362027447	71.12591189	70.889595811	70.66090571	70.433943348	70.21068371
75.0	74.75027783	74.50175932	74.25443873	74.00830851	73.76338540	73.51980014	73.27700752	73.03558137	72.795315545	72.55620394	72.318245059	72.08141820	71.845734835	71.61117894	71.377474007	71.14543593	70.91423088	70.68414289	70.455159618	70.22725348
75.0	74.75118219	74.5035977	74.25712045	74.0167595	73.76780207	73.52488863	73.28315947	73.04257649	72.803149619	72.56486881	72.327724069	72.09171542	71.856343943	71.62307873	71.390349625	71.15809389	70.928477248	70.69914882	70.470195892	70.24376916
75.0	74.75208425	74.50535523	74.25980073	74.01543253	73.77222651	73.53018253	73.28928452	73.04895644	72.81082266	72.57350603	72.337187195	72.10198365	71.867905737	71.63494221	71.403087270	71.17233514	70.942880114	70.71411546	70.486385531	70.26024068
75.0	74.75298379	74.50714569	74.26247956	74.01897825	73.77863870	73.53545184	73.29541267	73.05551519	72.818753465	72.58212158	72.346813863	72.11222386	71.878846388	71.64677544	71.415705308	71.18573026	70.956844632	70.72904278	70.502319097	70.27668600
75.0	74.75388800	74.50893115	74.26514493	74.02251810	73.78103863	73.54070654	73.30151388	73.06345472	72.82652194	72.59071344	72.356019648	72.12243603	71.889858867	71.65857641	71.428289010	71.19908899	70.970870767	70.74382873	70.517957354	70.29305110
75.0	74.75477530	74.51071159	74.26780284	74.02604306	73.78540363	73.54509482	73.30795519	73.07307532	72.83471434	72.59908158	72.36599728	72.13280154	71.90037147	71.67034508	71.440383328	71.2141131	70.98558476	70.75877429	70.53355294	70.30939893
75.0	74.75567732	74.51187052	74.27045328	74.02856013	73.78981686	73.55117206	73.31356942	73.07727608	72.841998916	72.60782599	72.374753875	72.14216271	71.911887201	71.68208143	71.45332378	71.22599721	70.99905878	70.77357942	70.54917692	70.32588445
75.0	74.75656572	74.51425743	74.27309925	74.03309730	73.79416777	73.55638265	73.31791579	73.08415788	72.849703367	72.61634664	72.384082070	72.15290494	71.922807004	71.69378541	71.465833787	71.23894864	71.013118545	70.78634409	70.564617905	70.34193464
75.0	74.75744363	74.51650222	74.27571374	74.03654455	73.79851555	73.56157897	73.32514743	73.09102036	72.857387022	72.62484352	72.393528420	72.16300379	71.93369551	71.70457042	71.47479844	71.25218596	71.02789802	70.80068268	70.580058768	70.35914045
75.0	74.75832011	74.51783188	74.27837931	74.04005169	73.80280402	73.56870404	73.33175495	73.0983655	72.865094111	72.63315569	72.400659514	72.16909221	71.940555518	71.71090222	71.480991412	71.26533598	71.04024557	70.8175190	70.596512749	70.37431485
75.0	74.75920886	74.51935385	74.28039820	74.04352930	73.80710616	73.57192718	73.33747618	73.10486743	72.87288916	72.64178586	72.411907120	72.18311877	71.955384564	71.72870299	71.50036475	71.27845800	71.054971927	70.83234949	70.60894471	70.38491882
75.0	74.76008818	74.52108789	74.28209010	74.04699677	73.811445397	73.57707923	73.34376406	73.11149187	72.88030522	72.65019128	72.421134868	72.19338795	71.9658183025	71.74027730	71.51541002	71.29157906	71.06877182	70.84697948	70.62623574	70.40404151
75.0	74.76096956	74.52304363	74.28389664	74.05045430	73.81579543	73.58212658	73.34791123	73.11827717	72.887905818	72.65898268	72.43033299	72.20319922	71.979951386	71.75181913	71.52779870	71.30485471	71.082594258	70.86185938	70.64153692	70.42521930
75.0	74.76184019	74.52472423	74.28619676	74.05349187	73.82006453	73.58733919	73.35569047	73.12504400	72.895481466	72.66997056	72.439505034	72.21039693	71.98768974	71.76332846	71.539992525	71.31763753	71.09593132	70.87608002	70.65670204	70.43830275

data output(veri kıtlısı) :																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
22.62474182	22.62474182	22.61775879	22.61080345	22.60387570	22.59697545	22.59010262	22.58325710	22.57643880	22.56964764	22.56288352	22.55614631	22.54943003	22.54275248	22.53609561	22.52946532	22.52286152	22.51628412	22.50977304	22.50320817	22.49670943
22.62474182	22.61775879	22.61080345	22.60387570	22.59697545	22.59010262	22.58325710	22.57643880	22.56964764	22.56288352	22.55614631	22.54943003	22.54275248	22.53609561	22.52946532	22.52286152	22.51628412	22.50977304	22.50320817	22.49670943	22.49020069
22.63333339	22.62632762	22.61934865	22.61239039	22.60547674	22.59858160	22.59171389	22.58487352	22.57806038	22.57127435	22.56451544	22.557783454	22.55107833	22.54438898	22.53774831	22.531123239	22.52452465	22.517962475	22.51140680	22.50488869	22.49839539
22.64188710	22.63485895	22.62785871	22.62088629	22.61394158	22.60702450	22.60011944	22.59322782	22.58643804	22.57963093	22.57289511	22.566096781	22.55937040	22.552627096	22.54598917	22.539352129	22.53273266	22.526119703	22.51957313	22.51303288	22.49839539
22.65040310	22.64335293	22.63633078	22.62933954	22.62237013	22.61543144	22.60852037	22.60163684	22.59478075	22.58795200	22.58115049	22.574378135	22.56762883	22.560908490	22.55421501	22.547548307	22.54090827	22.534294830	22.52770787	22.521147306	22.49839539
22.65880154	22.65180970	22.64478598	22.63775928	22.63076250	22.62380254	22.61687031	22.60996571	22.60308863	22.59623897	22.58941669	22.582621634	22.57585371	22.569112851	22.56239893	22.555711882	22.54905158	22.542417961	22.53581090	22.529230328	22.49839539
22.66732255	22.66022940	22.65310447	22.64597265	22.63891884	22.63193795	22.62501849	22.61825954	22.61156181	22.60494915	22.59837488	22.59183394	22.584404518	22.577284101	22.57055006	22.563824990	22.55716270	22.550505199	22.54388234	22.537282049	22.49839539
22.67572628	22.66861216	22.66152638	22.65444876	22.64743927	22.64043719	22.63349422	22.62651846	22.61960041	22.612709973	22.60584704	22.599011531	22.59220333	22.585422362	22.57866848	22.571941651	22.56524173	22.55858849	22.55192229	22.545302599	22.49839539
22.68405286	22.67695813	22.66985180	22.66277377	22.65572393	22.64870219	22.64170845	22.63474260	22.62780495	22.620894193	22.61401142	22.607158160	22.60032828	22.593527714	22.58675433	22.580008060	22.57328878	22.566596413	22.55993084	22.553291988	22.49839539
22.69242244	22.68526744	22.67814092	22.67104279	22.66397295	22.65693128	22.64991769	22.64293208	22.63597435	22.629044391	22.62214210	22.615267395	22.60842016	22.601600298	22.59480770	22.588042295	22.58130395	22.574582595	22.56790811	22.561250405	22.49839539
22.70071516	22.69354023	22.68639386	22.67927587	22.67218844	22.66512518	22.65808207	22.65108702	22.64410992	22.637160687	22.63023919	22.623345353	22.61647906	22.609640214	22.60282871	22.596044482	22.58928735	22.582552795	22.57585418	22.569177917	22.49839539
22.70897115	22.70177662	22.69461075	22.68747343	22.68036455	22.67328401	22.66623171	22.65920754	22.65221141	22.645243198	22.63830281	22.631390144	22.62450509	22.617647571	22.61081746	22.604014955	22.59723908	22.590490617	22.58376916	22.577074623	22.49839539
22.71719055	22.70997677	22.70279173	22.69563530	22.68850740	22.68140782	22.67433674	22.66729377	22.66027891	22.653292040	22.64633306	22.639401882	22.63249838	22.625622478	22.61877405	22.611953009	22.60515824	22.598392660	22.59165315	22.584940620	22.49839539
22.72537349	22.71814080	22.71093691	22.70376172	22.69661512	22.68949701	22.68240728	22.67534583	22.66831254	22.661307332	22.65433007	22.647380679	22.64045903	22.633565044	22.62669859	22.619859900	22.61304794	22.606263525	22.599506024	22.592776004	22.49839539
22.73352012	22.72626884	22.71904644	22.71185281	22.70468784	22.69755142	22.69044345	22.68336383	22.67631244	22.66928918	22.66229395	22.655328648	22.64838715	22.641475378	22.63459120	22.627734540	22.62090957	22.614103313	22.60732854	22.60058873	22.49839539
22.74163057	22.73436104	22.72712045	22.71990870	22.71272567	22.70557127	22.69844538	22.69134790	22.68427871	22.67723774	22.67022482	22.663239899	22.65628285	22.649353582	22.64245197	22.635577934	22.62873135	22.621912123	22.61512014	22.608355321	22.49839539
22.74974907	22.74241751	22.73515907	22.72792952	22.72072876	22.71355988	22.70641318	22.69928915	22.69227147	22.68527104	22.67829422	22.67132043	22.66434824	22.657398768	22.65048101	22.643538984	22.63659268	22.629669055	22.62288115	22.616094448	22.49839539
22.75747436	22.75043940	22.74318242	22.73591539	22.72869721	22.72150778	22.71434698	22.70721470	22.70011084	22.693035295	22.68598794	22.678968692	22.67197742	22.665014041	22.65807843	22.651170484	22.64429012	22.637437207	22.63061164	22.623813342	22.49839539
22.76574617	22.75842384	22.75113063	22.74388644	22.73663117	22.72942468	22.72224689	22.71509768	22.70797893	22.700884559	22.69382043	22.686784454	22.67977651	22.67279507	22.66584432	22.658918695	22.65202301	22.645153678	22.63831174	22.631487105	22.49839539
22.77371323	22.76637395	22.75906384	22.75178281	22.74453074	22.73730752	22.73011384	22.72294719	22.71580867	22.708700959	22.70162035	22.694567939	22.68754361	22.680547272	22.67357880	22.666638098	22.65972505	22.65283956	22.64598152	22.639150828	22.49839539
22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539	22.63895539

Şekil 4.13 Isı değıştirci sonlu eleman analizi toplam ısı transferi katsayısının (W/m^2K) yerel değışimi



Şekil 4.14 Isı değıştirci sonlu eleman analizi sıcak ve soğuk hava toplam ısı transferi katsayısı profillerinin 3 boyutlu görünümü

Giriş ve ortalama çıkış sıcaklıkları:

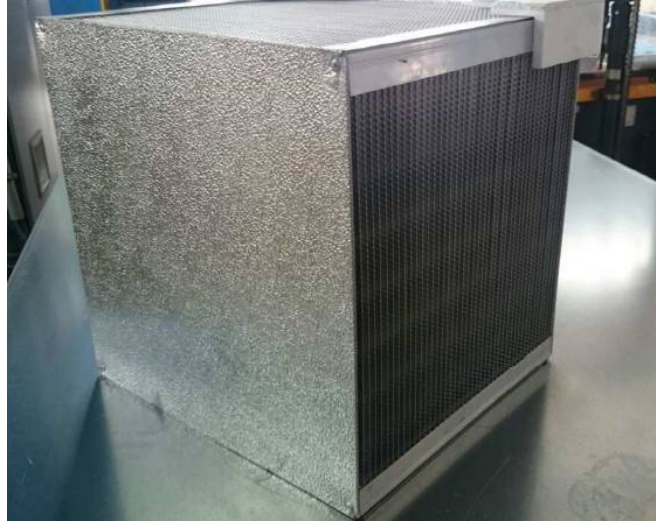
Tsıcak giriş=75,0 °C, Tsıcak çıkış=24,03°C

Tsoğuk giriş=20,0 °C, Tsoğuk çıkış=70,28°C

Toplam Isı Transferi:

$Q=26986,29$ W olarak bulunmuştur.

Tüm bu sonuçlar göz önüne alınarak reküperatör ünitesi için tasarım çalışması yapılmış ve bu çalışmada alüminyum malzemeden imal edilen ve Şekil 4.15'de gösterilen reküperatör kullanılmıştır.

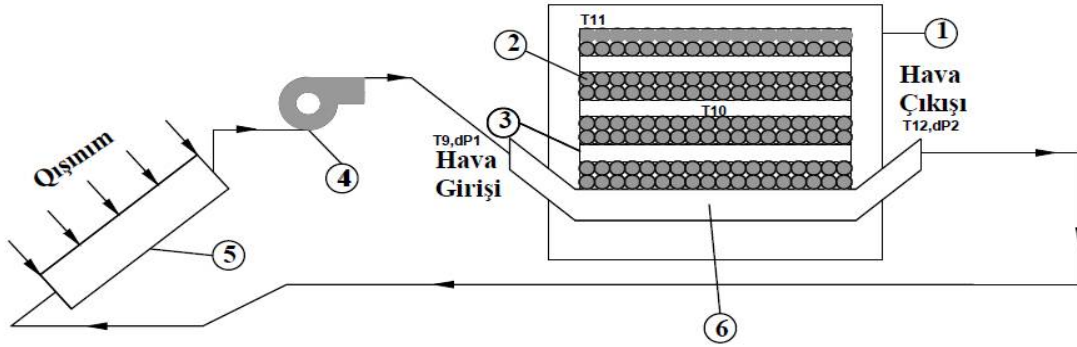


Şekil 4.15- Reküperatör(Isı Değiştirici) Resmi

4.4 Güneş Enerjili Kurutucu Enerji Depolama Sistemi

Bu çalışma kapsamında güneş enerjisini depolamak için çakıl taşı enerji depolama sistemi kullanılmıştır. Çakıl taşı enerji depolama sistemi içerisindeki hava sıcaklığının ve yatak içindeki ortalama sıcaklığın değişimi, çakıl taşı yatağı içerisinde oluşan ısı enerjisi ve kullanılabilir enerjinin değişimini, çakıl taşı yatağı içerisinde oluşabilecek basınç düşümü ve bu basınç düşümünü karşılayacak olan fan gücü geliştirilen simülasyon programı ile hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalardan yola çıkılarak kurutma sistemi için ihtiyaç duyulan ısı enerjisi miktarı ve buna bağlı olarak bu ihtiyacı karşılayan çakıl taşı miktarı ve yatak boyutları belirlenerek tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16'da çakıl taşı enerji depolama sisteminin çalışma prensibine ait akış şeması şekil

4.19'da ise çakıl taşı enerji depolama sisteminin montaj resmi verilmiştir. Çakıl taşı enerji dolgusunu oluşturabilmek için, Şekil 4.17'de açık şekilde ve Şekil 4.18'de kapalı halde gösterildiği gibi, çakıl taşlarının toplanıp, doldurabileceği bir depo imal edilerek giriş-çıkış bağlantıları oluşturulmuştur.



- | | |
|----------------------------------|--------------------|
| 1. İzolasyonlu Çakıl Taşı Yatağı | 4. Fan |
| 2. Çakıl Taşı | 5. Güneş Toplayıcı |
| 3. Delikli Izgara | 6. Delikli Izgara |

Şekil 4.16 Çakıl taşı enerji depolama sistemine ait akış şeması



Şekil 4.17 Çakıl taşı enerji depolama sistemi açık hali



Şekil 4.18 Çakıl taşı enerji depolama sistemi kapalı halı



Şekil 4.19 Çakıl taşı enerji depolama sistemi montaj resmi

4.4.1 Çakıl Taşı Enerji Depolama Sisteminin Isıl Analizi ve Modellenmesi

Çakıl taşı güneş enerjisi depolama sisteminin kapalı bir çevrim halindeki akış şeması Şekil 4.16'da verilmiştir.

Bu çalışmada, akış şemasında da görüldüğü üzere enerji deposunun şarj süresi boyunca, kolektörlerdeki hava bir fan yardımıyla çakıl taşı enerji deposuna iletilecek ve

bu durumda kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı ile çakıl taşı yatağı girişindeki hava sıcaklığı yaklaşık olarak eş sıcaklık değerlerine sahip olacaktır. Çakıl taşı yatağının çıkışı da kolektöre bağlı olacağından havanın çakıl taşı yatağından çıkış sıcaklığı ile kolektöre giriş sıcaklığı da birbirine eşit olacaktır. Ayrıca, çakıl taşlarını muhafaza edeceğimiz çakıl taşı yatağı izolasyonlu bir yapıya sahip olduğundan bulunduğu çevre ortama ısı geçişi ve dolayısıyla herhangi bir ısı kaybı söz konusu olmamaktadır. Bu çalışmada, kullandığımız çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili parametre ve değerler Çizelge 4.2'de verilmektedir. Çakıl taşı yatağı için, güneşli bir günde ortalama 8 saatlik bir şarj süresi göz önünde bulundurularak hem çakıl taşı yatağı hem de havalı kolektör sistemi için Java programlama dilinde bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2 Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili işletme parametreler

S.No	Parametre	Değeri
1	Çakıl Taşı Yatağı Hacmi(V_b)	2 m ³
2	Çakıl Taşı Yatağı Uzunluğu(L)	2 m
3	Çakıl Taşı Yatağı Başlangıç Sıcaklığı (T_{bi})	25 °C
4	Çakıl Taşı Çapı(D_e)	50 mm
5	Yuvarlaklık Oranı (φ)	0,55-1,00
6	Boşluk Oranı(ε)	0,31-0,63
7	Çakıl Taşı Yoğunluğu(ρ_s)	1920 kg/m ³
8	Hava Yoğunluğu(ρ_{hava})	1,20 kg/m ³
9	Çakıl Taşı Özgül Isı Değeri(c_{ps})	835 J/kgK
10	Havanın Özgül Isı Değeri(c_{ph})	1008 J/kgK

Çizelge 4.2 Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili işletme parametreler(Devamı)

11	Havanın Dinamik Viskozitesi(μ)	$18,5 \times 10^{-5}$ kg/s.m
12	Çevre Sıcaklığı (T_{amb})	25 °C
13	Hava Giriş Sıcaklığı(T_{ai})	25 °C
14	Kolektör Alanı(A_c)	6.9 m ²
15	Kolektör İçindeki Hava Sıcaklığı(T_i)	25 °C
16	Zaman Aralığı (Δt)	15 dak.

4.4.1.1 Çakıl Taşı Yatağının Boyutlandırılması

Genellikle istenilen sıcaklıkta depolanan enerji miktarına karşılık gelen çakıl taşı yatağı boyutlarının belirlenmesi gerekmektedir. Şarj süresince, hava akışı tarafından taşınan absorbe edilmiş enerji miktarının çakıl taşı yatağı boyutu ile uyumlu olması gerekmekte ve çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık değeri şarj süresi sonunda hemen hemen iç hava sıcaklığına eşit olmalıdır. Bu yüzden, çakıl taşı yatağı boyutlarını belirlemek için, aşağıdaki enerji dengesini yazmak mümkündür:

$$(m * Cp)_a * (T_{ai} - T_{bi}) * t = (\rho * Cp)_s * (1 - \varepsilon) * V_b * (T_{bm} - T_{bi}) \quad (4.35)$$

Simülasyon çalışmasında, çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığı (T_{ai}) ve yatak içindeki ortalama sıcaklık (T_{bi}) sırasıyla 55 °C ve 25 °C olarak alınmıştır. t ise çakıl taşı yatağının saniye zaman birimi cinsinden şarj (doldurma) süresidir. Çakıl taşı yatağı boyutlandırılması esnasında, şarj süresi boyunca, havanın yataktan çıkış sıcaklığının yatak içindeki ortalama sıcaklığa (T_{bi}) ve yatak içindeki hava sıcaklığının (T_{ai}) ise kolektörden çıkan havanın sıcaklığına (T_0) eşit olduğu kabul edilmiştir.

4.4.1.2 Havalı Güneş Kolektörünün Modellenmesi

Kolektör tarafından iletilen enerji miktarı kolektör alanına, gelen ışınlam değerine, hava akış oranına ve çevre koşullarına bağlıdır. Bu çalışmada havalı güneş kolektör modeli çakıl taşı enerji modeline adapte edilmiştir. Kolektör çıkış sıcaklığı değişimi, sabit gelen ışınlam değeri ve sabit çevre sıcaklığı şartları altında kolektör iç sıcaklığı değişimi ile belirlenebilir. Yine de kolektör çıkış sıcaklığı hava akış oranı değişimi tarafından sabit şekilde korunabilir. Hava akış oranı, Duffie ve Beckman [29] tarafından verilen kolektörde yararlı enerji kazanımı bağıntısı eşitlik 4.36 ile hesaplanabilir.

$$Qu = Ac[IF_R(\tau\alpha) - F_R U_l(T_i - T_{amb})] \quad (4.36)$$

Yararlı enerji kazanımı(Q_u) aynı zamanda aşağıdaki bağıntı ile de hesaplanabilmektedir:

$$Qu = (mc_p)_a(T_0 - T_i) \quad (4.37)$$

Eşitlik 4.36 ve 4.37 birleştirilerek hava akış oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$m_a = \frac{Ac[IF_R(\tau\alpha) - F_R U_l(T_i - T_{amb})]}{c_{p_a}(T_0 - T_i)} \quad (4.38)$$

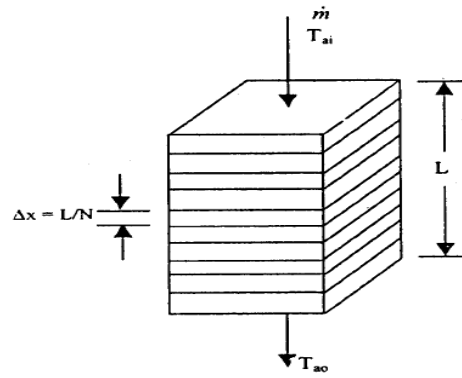
Burada T_i kolektör içindeki hava sıcaklığı olup çakıl taşı yatağının ortalama sıcaklığı(T_{bi}) ile eş değerde olduğu kabul edilebilir. Benzer şekilde, T_0 , kolektördeki havanın çıkış sıcaklığı olup bu değer de yaklaşık olarak çakıl taşı yatağı içindeki havanın sıcaklığına (T_{ai}) eşit olarak alınabilir.

4.4.1.3 Çakıl Taşı Yatağının Modellenmesi

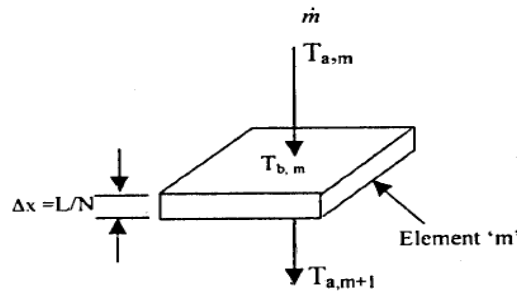
Güneş enerjisi destekli kapalı bir çevrime sahip çakıl taşı enerji depolama sisteminde, kolektörden ayrılan sıcak hava çakıl taşı yatağına girmektedir. Bu yüzden, kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı ile çakıl taşı yatağına giriş sıcaklığı aynı olacaktır. Şarj süresince, çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık yavaş yavaş artmaya başlayacağından kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı değişebilmektedir. Abbud ve ark. [30] yapmış olduğu çalışmada, çakıl taşı yatağı içinde kolektörden gelen sıcak havanın değişen hava akış oranına göre sabit bir sıcaklıkta kalmasını sağlamak için çakıl taşı yatağının iç kısmını

katmanlara bölmeyi önermiştir. Bu çalışmada, çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığını sabit tutmak için şarj süresi boyunca, hava akış oranının değişimine izin verilmiştir.

Bir çakıl taşı yatağında ısı performansını önceden belirleyebilmek için, literatürde birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Yine de, çoğu araştırmacı Mumma ve Marvin [31] tarafından geliştirilen modeli kullanmışlardır. Bu çalışmada, Şekil 4.20a ve Şekil 4.20b'de gösterilen, Mumma ve Marvin tarafından geliştirilen model kullanılarak 2 metre uzunluğundaki çakıl taşı yatağı 10 cm aralıklarla toplam 20 eşit parçaya bölündüğü varsayılmış ve yatak içindeki hava sıcaklığının ve ortalama yatak sıcaklığının değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.20a Çakıl taşı yatağında N tane elementin şematik gösterimi



Şekil 4.20b Çakıl taşı yatağında "m." elementin şematik gösterimi

Çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığının dağılımı aşağıdaki bağıntı kullanılarak elde edebilir:

$$T_{a,m+1} = T_{b,m} + (T_{a,m} - T_{b,m}) \exp(-\phi_1) \quad (4.39)$$

Burada,

$$\phi_1 = \frac{h_v AL}{N(mc_p)_a} = \frac{NTU}{N} \quad (4.40)$$

$$N = \frac{L}{\Delta X} \quad (4.41)$$

Δt zaman aralığında çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık değişimi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$T_{b,m(t+\Delta t)} = T_{b,m(t)} + \left[\phi_2(T_{a,m} - T_{a,m+1}) - \phi_3(T_{b,m} - T_{amb}) \right] \Delta t \quad (4.42)$$

Bu bağıntıda,

$$\phi_2 = \frac{(mc_p)_a N}{\rho_s AL(1-\varepsilon)c_{ps}} \quad (4.43a)$$

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \quad (4.43b)$$

$$\phi_3 = \frac{(U\Delta A)_m}{(mc_p)_a} \phi_2 \text{ 'dir.} \quad (4.43c)$$

Nusselt Sayısı ile ilgili korelasyon Singh[27] tarafından ifade edilmiş olup hacimsel ısı transferi katsayısını değerlendirmek için kullanılmıştır.

$$Nu = 0,437(Re)^{0,75}(\varphi)^{3,35}(\varepsilon)^{-1,62} \left[\exp(29,03(\log \varphi)^2) \right] \quad (4.44)$$

Bu bağıntıda:

$$Nu = \frac{h_v De^2}{K} \quad (4.45a)$$

$$Re = \frac{GDe}{\mu_a} \quad (4.45b)$$

$$\varphi = \frac{a_s}{a_e} \text{ 'dir.} \quad (4.45c)$$

$$G = \rho_{hava} V = m/A \quad (4.46)$$

Çakıl taşı yatağında depolanan ısı enerji miktarı aşağıdaki genel eşitliği kullanarak hesaplanabilir:

$$Q_t = \int_0^L (\rho c_p)_s (1-\varepsilon) A (T_{mm} - T_{im}) dx \quad (4.47)$$

Denklem 4.47'nin çözümü sonlu farklar metodu kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edebilir:

$$Q_t = (\rho c_p)_s (1-\varepsilon) A \frac{L}{N} \left(\sum_{n=1}^N T_{nm} - N T_{bi} \right) \quad (4.48)$$

Çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerji miktarının dönüşümü ise denklem 4.49'de verilen genel ifade ile elde edebilir:

$$Q_a = \int_0^L (\rho c_p)_s (1-\varepsilon) A \left[(T_{mm} - T_{mi}) - T_{mi} \ln \left(\frac{T_{mm}}{T_{mi}} \right) \right] dx \quad (4.49)$$

Denklem 4.49'un çözümü sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözüldüğünde;

$$Q_a = (\rho c_p)_s (1-\varepsilon) A \frac{L}{N} \left[\left(\sum_{n=1}^N T_{nm} - N T_{bi} \right) - T_{bi} \ln \left(\frac{T_{1m} T_{2m} T_{3m} \dots T_{Nm}}{T_{bi}^N} \right) \right] \quad (4.50)$$

Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili en önemli kavramlardan bir olan basınç düşümünü aşağıdaki bağıntı ile hesaplamak mümkündür:

$$\Delta P = \frac{f G^2}{\rho_{hava} D e} \quad (4.51)$$

Sürtünme faktörünü (f) Singh [27] tarafından verilen eşitlik ile belirleyebiliriz:

$$f = 4,466(\text{Re})^{-0,2}(\varphi)^{0,696}(\varepsilon)^{-2,945}\left[\exp(11,85(\log \varphi)^2)\right] \quad (4.52)$$

Burada,

Basınç düşümünü karşılamak için kullanılacak olan fan ünitesinin enerji tüketimini hesaplamak için ise denklem (4.53) kullanılabilir.

$$\dot{W}_{fan} = \frac{\dot{m}_a \Delta P t}{\rho_a} \quad (4.53)$$

Kolektörün ısı verimi ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c I} 100 \quad (4.54)$$

Bu çalışmada, daha önce de tablo 4.2'de belirtildiği üzere, çakıl taşları arasındaki boşluk oranı ve yuvarlaklık oranları olarak aşağıda yer alan ve Singh [28] tarafından deneysel olarak elde edilen veriler kullanılmıştır.

Yuvarlaklık Oranı(φ): 0,55, 0,63, 0,72, 0,80 ve 1,0

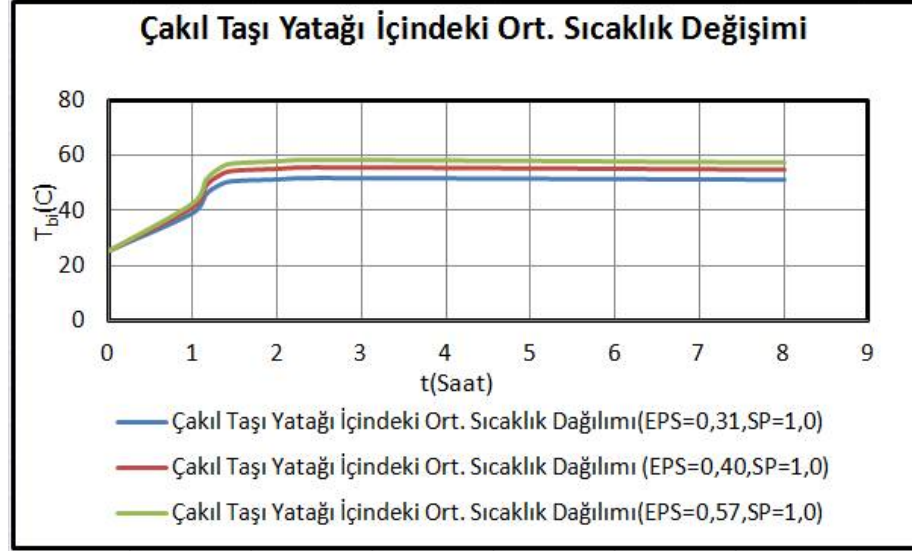
Boşluk Oranı(ε): 0,31, 0,40, 0,45, 0,54 ve 0,63

Yuvarlaklık oranı ve boşluk oranı değerleri geliştirmiş olduğumuz simülasyon programında geliş güzel bir şekilde kullanılmıştır. Fakat bu değerler birbirine karşılık gelecek şekilde de kullanılabilir.

Çakıl taşı enerji depolama sisteminde her bir elementteki sıcaklık dağılımı, termal enerji değişimi, kullanılabilir enerjinin değişimi, kolektöre gelen enerji miktarı, kolektörün ısı verimi, çakıl taşı yatağında meydana gelen basınç düşümü ve bu basınç düşümünü karşılayan fan tarafından tüketilen enerji miktarının hesaplanması sağlamak amacıyla java programlama dili kullanılarak bir model(kurutma_sistemi.java) geliştirilmiştir. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan veriler her 15 dakikada ölçüm yapılacak şekilde göz önüne alınarak oluşturulmuş (Yapılan simülasyon programında veri alma süresi değiştirilebilmektedir.) ve sistemin tamamen şarj edildiği süreye kadar tekrarlanmıştır. Bu simülasyon çalışması kapsamında, İzmir ili verilerine göre çakıl taşı enerji depolama sistemine kolektörden üflenen havanın sıcaklığının başlangıçta 25 °C ve çakıl taşı

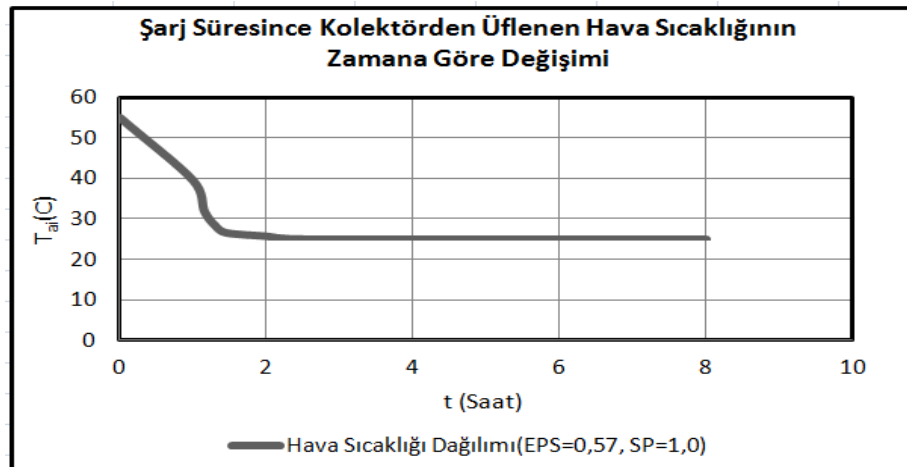
yatağının ortalama sıcaklığının da başlangıçta 25 °C civarında olduğu ve çakıl taşları arasındaki boşluk oranları ve yuvarlaklık oranları sırasıyla yukarıda verildiği gibi alındığında elde edilen veriler bir yaz günü için (08.00-16.00 saatleri arasında) tek tek aşağıda grafikler halinde gösterilmiştir:

Çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımının doldurma süresine göre değişimi şekil 4.21'de verilmiştir.



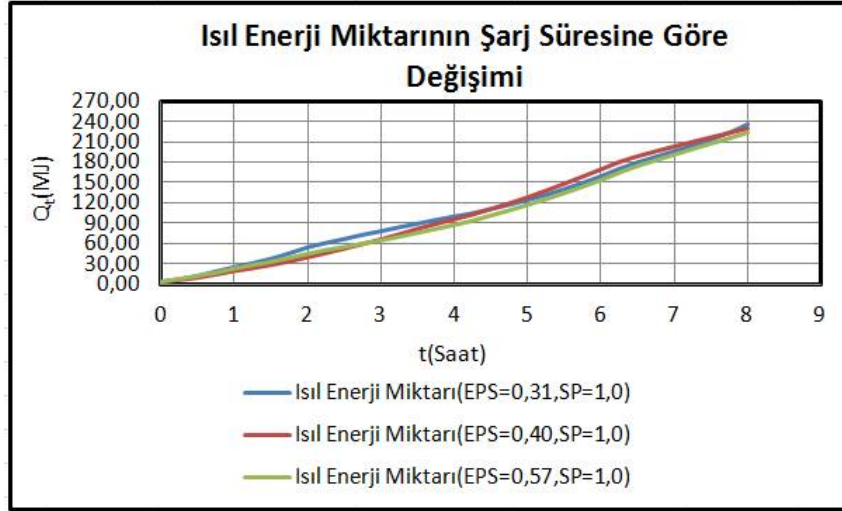
Şekil 4.21 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımındaki değişim

Kolektörden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının şarj süresine göre değişimi Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



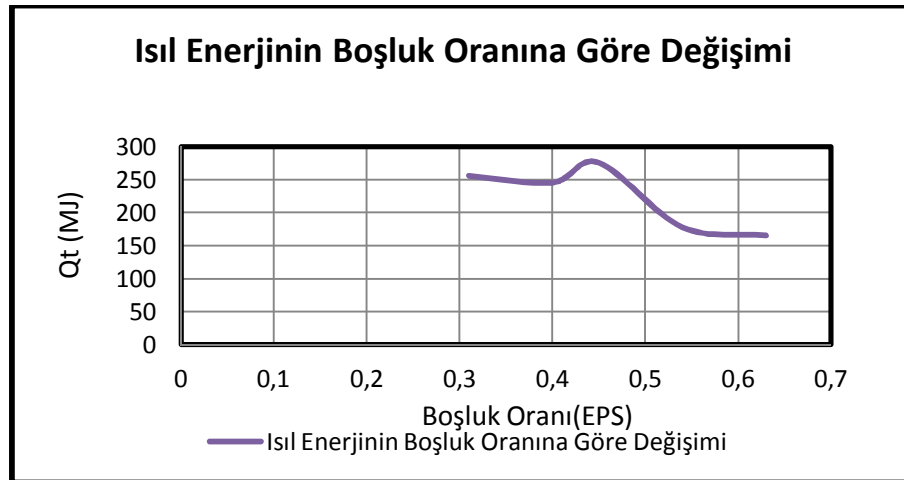
Şekil 4.22 Şarj süresi boyunca kolektörden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi

Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağı içinde oluşan ısı enerji miktarındaki değişim Şekil 4.23'de verilmiştir:



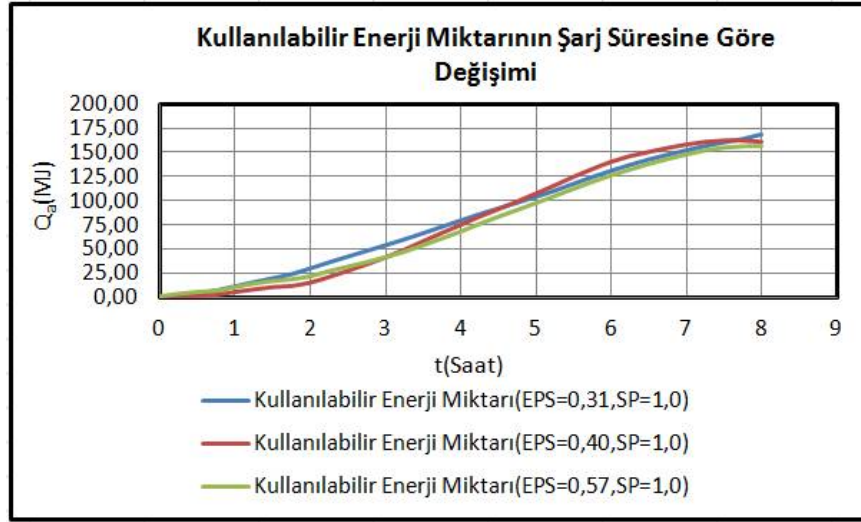
Şekil 4.23 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağındaki ısı enerji miktarı değişimi

Toplam ısı enerji miktarının boşluk oranına göre değişimini veren grafik Şekil 4.24'de gösterilmiştir:



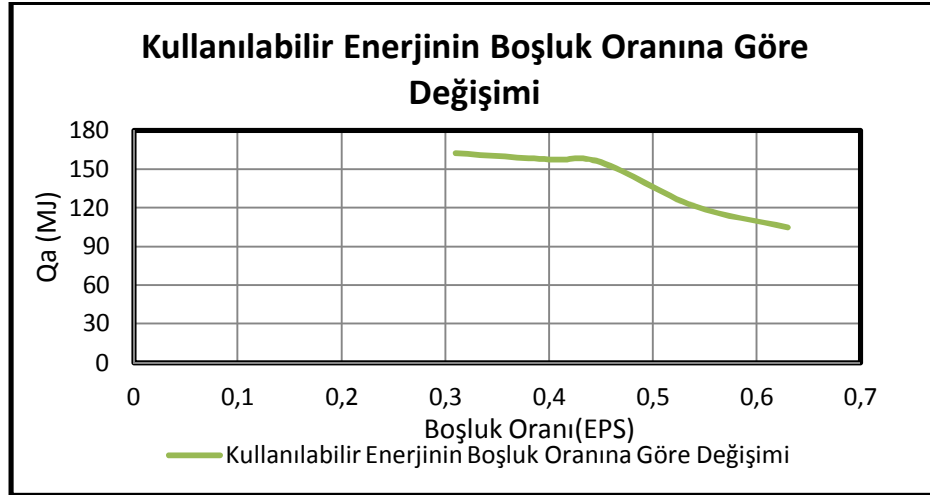
Şekil 4.24 Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağındaki toplam ısı enerji miktarındaki değişim

Çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerjinin değişen boşluk yuvarlaklık oranları göz önüne alınarak doldurma süresi boyunca göstermiş olduğu değişim Şekil 4.25'de verilmiştir.



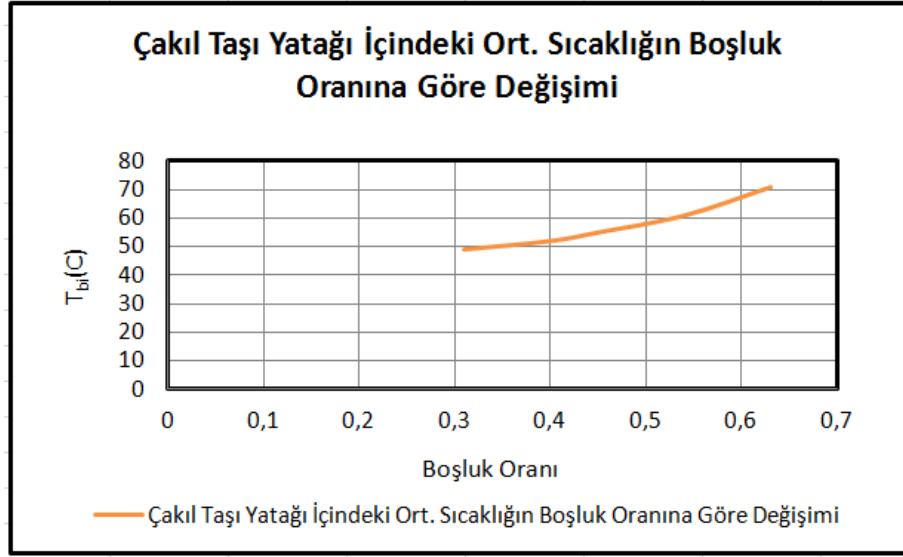
Şekil 4.25 Şarj süresi boyunca farklı boşluk ve yuvarlaklık oranlarına göre çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerji miktarı değişimi

Çakıl taşı yatağı içinde var olan toplam kullanılabilir enerji miktarının boşluk oranına göre değişimini veren grafik Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

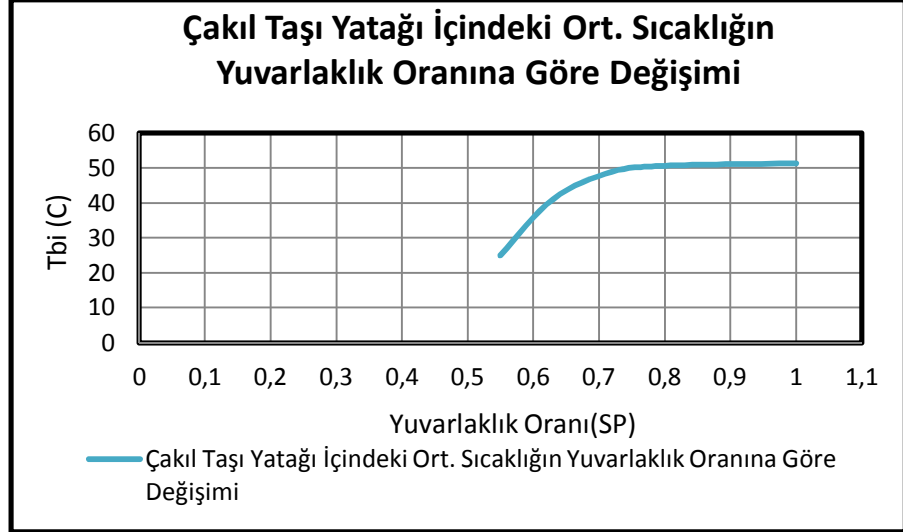


Şekil 4.26 Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağı içindeki toplam kullanılabilir enerji miktarındaki değişim

Çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımının boşluk oranına ve yuvarlaklık oranına göre değişimini veren grafikler sırasıyla Şekil 4.27a ve Şekil 4.27b'de gösterilmiştir.

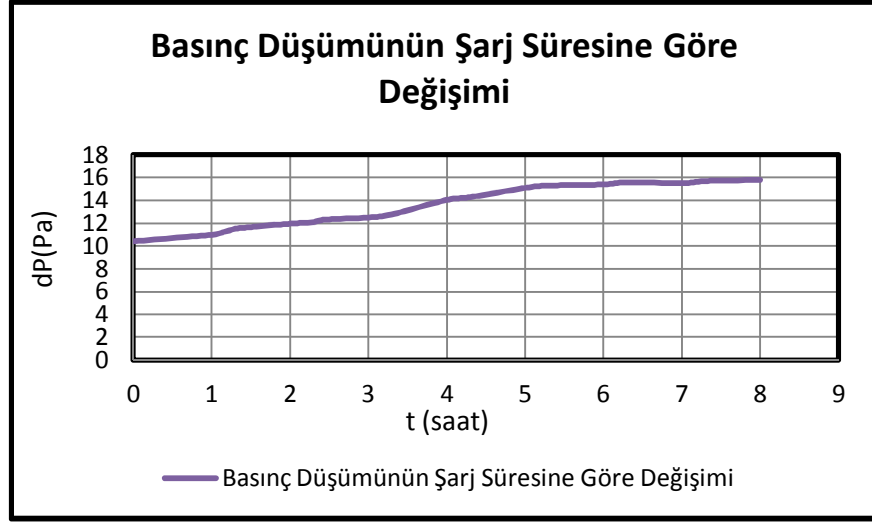


Şekil 4.27a Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağındaki ortalama sıcaklık değerindeki değişim



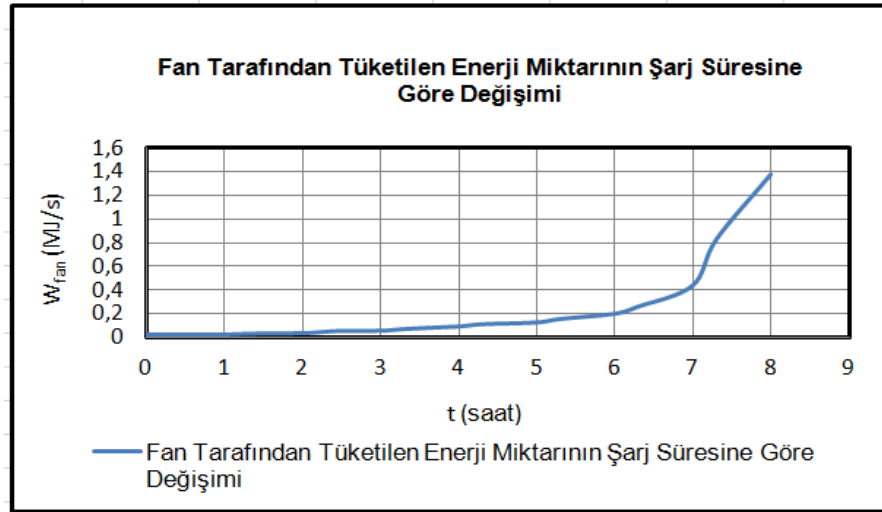
Şekil 4.27b Yuvarlaklık oranına göre çakıl taşı yatağındaki ortalama sıcaklık değerindeki değişim

Çakıl taşı yatağı içerisinde meydana gelen basınç düşümünün doldurma süresine göre değişimi Şekil 4.28'de yer alan grafikte verilmiştir:



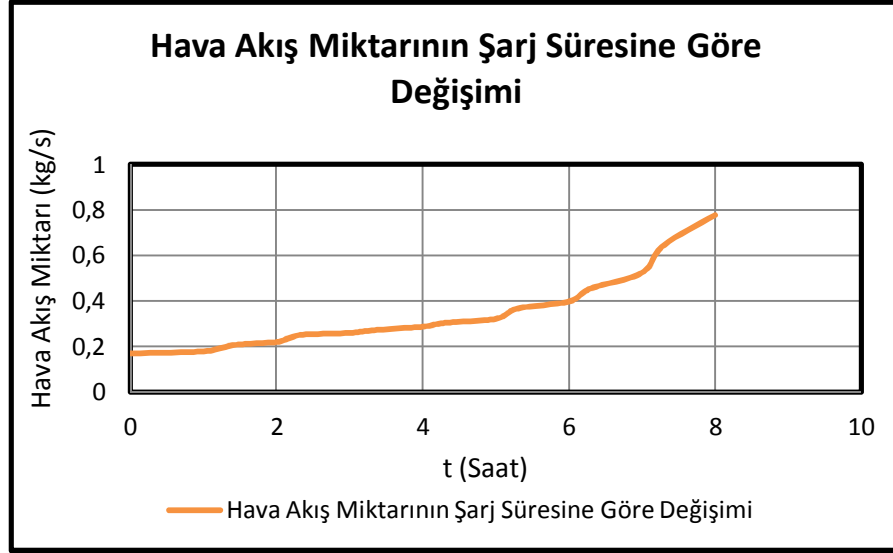
Şekil 4.28 Basınç düşümünün şarj süresi boyunca değişimi

Çakıl taşı yatağı içerisinde meydana gelen basınç düşümünü karşılayacak olan fanın tükettiği enerji miktarının doldurma süresine göre değişimi ise Şekil 4.29'da gösterilmiştir:



Şekil 4.29 Fan tarafından tüketilen enerji miktarının şarj süresi boyunca değişimi

Çakıl taşı yatağı içerisindeki hava akış miktarının doldurma süresine göre değişimi Şekil 4.30'da yer alan grafikte verilmektedir:



Şekil 4.30 Hava akış miktarının şarj süresi boyunca değişimi

Çakıl taşı enerji depolama sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda çakıl taşı yatağının giriş, çıkış ve orta noktalarından sıcaklık ölçümü yapılmış olup çakıl taşı yatağında meydana gelen sıcaklık değişimleri sürekli takip edilmiş ve gün içerisinde 08.00-17.00 saatleri arasında sistem şarj edilerek depoladığı enerji miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca çakıl taşı enerji depolama sistemine entegre edilen fark basınç sensörü ile yatak içerisindeki basınç düşümü belirlenmiştir. Çakıl taşları arasındaki boşluk oranı 0.57 yuvarlaklık oranı ise 1.0 olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler daha önce geliştirilen benzeşim programından elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Deşarj işlemi için kurutma sistemi ile çakıl taşı enerji depolama sistemi arasındaki klape açılarak depolanan enerjinin kurutma sistemine aktarılması sağlanmış ve bu sürenin ortalama 7-8 saat arasında değiştiği ve elmaların kuruması için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

4.5 Ölçüm ve Test Cihazları

Güneş enerji sistemlerinin testlerinin yapılabilmesi amacıyla, güneş enerjili zirai ürün kurutma test sistemi için gerekli olan ölçüm sistemleri sırasıyla, nem ölçme sistemleri, sıcaklık ölçme sistemleri, hava hızı ölçme sistemleri (pitot tüpü ve anemometre), basınç ölçme sistemleri, güneş enerjisi ölçme sistemleri (piranometre) vb. sistemlerdir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan ölçüm cihazlarının resimleri Şekil 4.31 ile Şekil 4.38 arasında gösterilmiştir. Bu sistemler kullanılarak güneşli hava ısıtıcılarının ve zirai ürün kurutucularının temel performansları ölçülmüştür. Ölçümler data logger üzerinden ölçülerek veri tabanına aktarılmakta ve oradan da bilgisayara gönderilerek veritabanı üzerinden işlenmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ölçüm ve test cihazları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir:



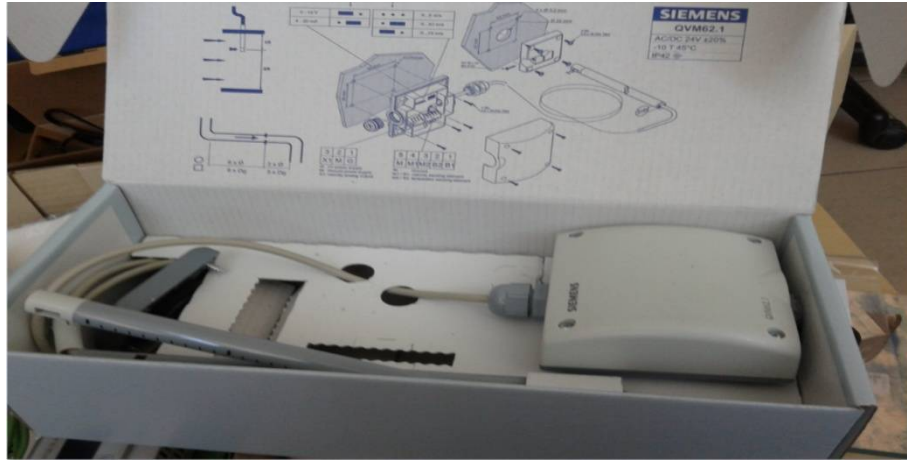
Şekil 4.31 Datalogger resmi



Şekil 4.32 Bağlı nem ölçüm sensörü resmi



Şekil 4.33 Thermocouple ve datalogger güç kaynağı resmi



Şekil 4.34 Anemometre(hava hızı ölçüm cihazı) resmi



Şekil 4.35 Fark basıncı sensörü resmi



Şekil 4.36 Basınç sensörü resmi



Şekil 4.37 Piranometre (güneş ışınlamı ölçümü cihazı) resmi



Şekil 4.38 Hassas terazi resmi

Çizelge 4.3 Ölçüm ve Test Cihazları ve Özellikleri

Ölçüm Cihazı	Model	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Türü	Hassasiyeti
PLC Datalogger	VTPLC		Veri Aktarma Cihazı	Kalibre Edildi.
Anemometre	SIEMENS	(0-5) m/s	Hava Hızı	0,03 m/s
Sıcaklık Hissedici Eleman	PT1000	(-40, +70 ⁰ C) Sıcaklık, (%5- 95 RH) Nem	Sıcaklık, Nem	DIN IEC751'e göre Klas B.
Basınç Farkı Sensörü	MS-121	25,50,100 Pa(0,1",0,5",0,5") 4-20 MA	Basınç Farkı	
Basınç Transmitter	XMLP010BC21	0-10 Bar, 4-20 MA	Basınç	
Pronem	PMD-X-H0-T0-1-0-X	(-20,+80 ⁰ C) Sıcaklık, (0-100%RH) Nem	Sıcaklık ve Nem	$\pm 0.3^0 C$ $\pm \%2RH$
Piranometre	APOGEE MP-200	Max.1750 W/m ²	Güneş Enerjisi Ölçümü	$\pm \%5$
Hassas Terazi	METTLER TOLEDO	Max. 3.2 kg	Ağırlık Ölçer	0.01 gr

Sıcaklık ölçümü ile ilgili cihazlar şekil 4.39'da gösterilen -30°C - 200°C arasında çalışma sıcaklığına ve $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$ ısı kararlılığı ve $0,01^{\circ}\text{C}$ çözünürlüğe sahip Julobo FK30-SL kalibrasyon banyosu ile kalibre edilmiştir. Deneylerde kullanılan sıcaklık ölçerler deney öncesi bu kalibrasyon termometresi ile 0 ila 75°C arası sıcaklıklar için kalibre edilmiş ve ölçüm sonuçları bu kalibrasyon değerlerine getirilmiştir.



Şekil 4.39 Sıcaklık ölçüm cihazlarını kalibre etmek için kullanılan
Julobo FK30- SL kalibrasyon banyosunun resmi

Nem ölçümü için kullanılan cihazlar TESTO HUMINATOR nem kalibrasyon cihazı kullanılarak kalibre edilmiştir. Şekil 4.40'da gösterilen bu kalibrasyon cihazı 15°C ile 40°C sıcaklık ve %5 ile %95 RH bağıl nem aralığında çalışmaktadır. %10 – %85 RH arasında %2 RH nem ve $0,5^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassasiyetine sahiptir.



Şekil 4.40 Nem kalibrasyon cihazı TESTO HUMINATOR

Basınç ölçümü için kullanılan cihazlar şekil 4.41'de gösterilen GE DRUCK PV622+DPI620+PM620 basınç kalibratör cihazı kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu cihaz

-10°C ile 40°C ortam 0.025% hassasiyetine sahiptir. Barometrik basınç hassasiyeti değeri $\pm 0,15$ mbar'dır.



Şekil 4.41 Basınç kalibratör cihazı GE DRUCK PV622+DPI620+PM620

Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler üç ayrı datalogger ile veritabanına ve oradan da bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için Java programlama dili kullanılarak ekte verilen "VebbsDT3.java" adı altında bir program geliştirilmiş ve bu sayede belirli bir zaman dilimi içerisinde bilgisayar ortamına periyodik olarak veri aktarımı ve depolaması söz konusu olmuştur. Ayrıca belirli zaman aralığında ürün numunelerinin kütle kaybı ölçümü yapılmıştır.

BÖLÜM 5

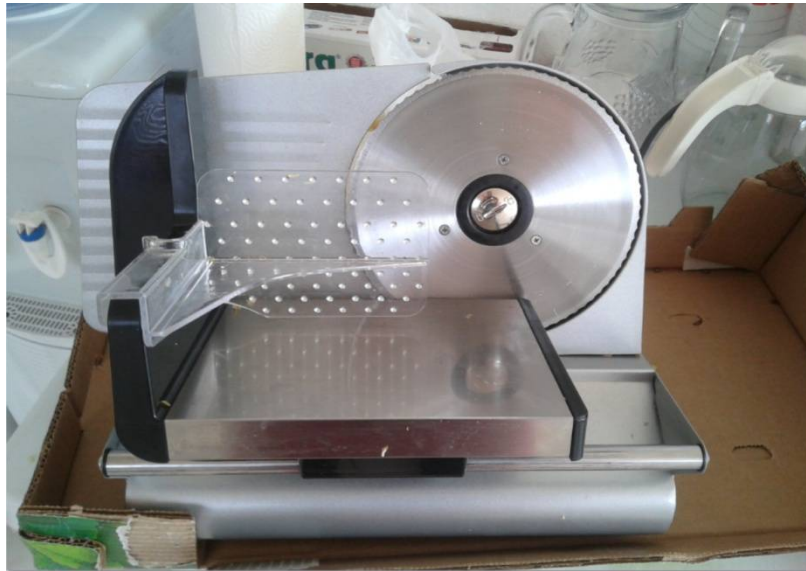
DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada su içeriği yüksek tarım ürünlerinin kurutulması üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle nem alma prensibine dayalı güneş enerjisi destekli bir kurutucunun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kurutma işleminin sürekliliğini sağlamak amacıyla kurutma sisteminden bağımsız olarak çalışan çakıl taşı enerji depolama sistemi tasarlanarak imalatı yapılmıştır. Sistemin imalat ve montaj işlemleri tamamlandıktan sonra her iki sisteme yönelik deneysel çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmanın önemli bir parçası da hem güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin hem de çakıl taşı enerji depolama sisteminin tasarımı ve çalışma parametrelerinin incelenmesidir.

Kurutulacak ürünün çeşidi ve miktarını belirlemek, kurutucu tipinin ve kapasitesinin belirlenmesi için ilk aşamadır. Bu çalışmada kurutulacak ürün olarak Golden cinsi elma (sarı ve yeşil elma) seçilmiştir. Elmalar yıkama, çekirdek kısmını temizleme ve dilimleme işlemleri sonrası kurutucu raflarına konarak kurutulmuşlardır. Elma dilimleri genellikle 5 ± 2 mm kalınlıkta olacak şekilde salam dilimleme makinesi kullanılarak hazırlanmıştır.(Şekil 5.1).

TSE elma kurusu için standart değerler oluşturmuştur. Bu standartlarda (TSE 3688) kurutulacak ürünün ilk ve son nem değeri, kurutma sonrasındaki renk ve biçim yönünden kıstaslar ve elma kurusunda olabilecek katkı maddelerinin en yüksek değerleri verilmektedir. Bu çalışmada, gıda kurutma işlemi gerçekleştiren bir firmadan, deneylerin tamamlanmasından sonra teslim edilmek üzere, ödünç olarak alınan 4 adet

kurutma tepsisi kullanılmış olup yapılan deneylerde sadece 4 rafta 5-7,5 kg arasında değişen miktarlarda elma kurutulmuştur. Sistemi tam kapasite çalıştırmak adına, bir güne mahsus olmak üzere, aynı firmadan 14 adet kurutma tepsisi talep edilmiş ve kabin içindeki toplam raf sayısı olan 18 raf kullanılarak toplamda 30 kg elma kurutulmuştur. Ayrıca, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarından ödünç olarak alınan bir adet anemometre kurutma kabini çıkışına yerleştirilmiş ve sistemin tam kapasite çalıştırıldığı gün ve diğer deneylerle benzer kapasitede çalıştırıldığı bir sonraki gün için giriş ve çıkış noktalarındaki hava hızı değerleri belirlenmiştir. 5- 7.5 kg arasında değişen miktarlardaki elmanın hazırlanma süreci uzun sürmediği için elmalarda herhangi bir kararma söz konusu olmamıştır. 30 kg elma ile deney yapıldığı gün hazırlık süreci daha uzun olduğundan dilimlenmiş elmaların bekleme anında kararmaması için 5 dakika limonlu suda bekletilmiştir[52].



Şekil 5.1 Elmaları dilimlemek için kullanılan salam dilimleme makinesi

İlk deneylerde 5mm kalınlığındaki elmaların kurutulması işlemi gerçekleştirilmiştir. İlerleyen deneylerde ise 5mm-10mm arasında değişen farklı kalınlıklara sahip elma dilimleri kurutulmuştur.

Kurutma deneyleri sırasında elma dilimlerinin kütle kaybı, kurutma sisteminin belirlenen noktalarından sıcaklık, bağıl nem, basınç ve hava hızı ölçümü yapılmıştır. Ölçümler datalogger üzerinden veri tabanına aktararak bilgisayar ortamına işlenmiştir. Elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için Java programlama dili

kullanılarak "VebbsDT3.java" adı altında bir program geliştirilmiş ve bu sayede belirli bir zaman dilimi içerisinde bilgisayar ortamına 10 dakikada bir veri aktarımı ve depolaması söz konusu olmuştur. Bunun dışında, kurutma sisteminden bağımsız olan piranometre ile her 10 dakikada bir güneş ışınlı değeri ölçülmüştür. Ayrıca, kurutma sisteminin dışında yer alan ve 0.01 gr. hassasiyete sahip terazi ile her bir rafta belirlenen numunelerin 30 dakika arayla ağırlık değişimleri ölçülmüştür.

Deney düzeneği İzmir Çiğli Atatürk Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Türkoğlu Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasının terasına kurulmuş olup deneyler de burada gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında kurutma sisteminin 8 farklı noktasından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Ayrıca kurutma kabininin giriş ve çıkış noktalarından bağıl nem, hava hızı ve basınç değişimi ölçümleri yapılmıştır. Deneyler sırasında çevre havasına ait sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri de yapılmıştır. Çakıl taşı enerji depolama sisteminin 4 farklı noktasından sıcaklık ölçümü yapılmış olup bu sayede depolanan ısı enerjisi miktarı belirlenmiştir. Ayrıca çakıl taşı yatağında meydana gelen basınç düşümünü belirleyebilmek için sistemin giriş ve çıkış noktasına fark basıncı sensörü yerleştirilmiştir. Ölçüm noktaları daha önce şekil 4.1'de verilen akış şemasında gösterilmiştir. Akış şeması üzerinde ölçüm alınan noktaları kısaca aşağıdaki gibi açıklamak mümkündür:

Sıcaklık sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

T1- Kabin giriş sıcaklık değeri (sağ kısım), T2- Kabin çıkış sıcaklık değeri (sağ kısım), T3- Kabin giriş sıcaklık değeri (sol kısım), T4- Kabin çıkış sıcaklık değeri (sol kısım), T5-Isı odası giriş sıcaklık değeri (sağ kısım), T6-Isı odası çıkış sıcaklık değeri (sağ kısım), T7-Isı odası giriş sıcaklık değeri (sol kısım), T8-Isı odası çıkış sıcaklık değeri (sol kısım), T9-Çakıl taşı yatağı giriş sıcaklık değeri, T10-Çakıl taşı iç sıcaklık değeri, T11- Çakıl Taşı yatağı iç sıcaklık değeri, T12-Çakıl taşı yatağı çıkışı sıcaklık değeri.

Bağıl nem sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

Φ_1 - Kabin girişi bağıl nem değeri, Φ_2 -Kabin çıkışı bağıl nem değeri, Φ_3 -Isı odası iç kısmı bağıl nem değeri.

Basınç sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

P1-Kabin girişi basınç değeri, P2- Kabin çıkışı basınç değeri, P3- Isı odası iç kısmı basınç değeri, dP1- Çakıl taşı yatağı girişi fark basıncı değeri, dP2-Çakıl taşı yatağı çıkışı fark basıncı değeri.

Hava hızı sensörlerinin yerleştirildiği noktalar aşağıda verilmiştir.

V1- Kabin girişi hava hızı değeri, V2- Kabin çıkışı hava hızı değeri.

5.1 Kurutma Denemeleri

Elma kurutması deneyleri için başlangıçta 10°C sıcaklığa sahip elmalar İzmir'in Çiğli ilçesinde bulunan bir alışveriş merkezi'nden bir gün önce alınarak güneş almayan bir yerde oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Elmalar deney öncesi yıkanıp, çekirdek yuvaları çıkarılarak salam dilme makinesi ile 5 ± 2 mm kalınlığında dilimlenmiştir. Toplamda 4 raf kullanılarak 5-7,5 kg arasında değişen miktarlarda elmanın kurutulduğu deneylerde elmalar uzun süre bekletilmediği için kararına gözlemlenmediğinden herhangi bir ek işleme tabi tutulmamıştır. Toplamda 18 rafın kullanıldığı ve 30 kg elmanın kurutulduğu deneyde ise elmaların hazırlık aşaması mevcut deneylere göre daha uzun sürdüğü için elma dilimleri 5 dakika kadar limonlu suda bekletilmiştir [52]. 5 ± 2 mm kalınlığında doğranan elma dilimleri tepsilere dizilmiştir (Şekil 5.2, Şekil 5.3). Her rafa konan elma dilimleri kurutma öncesi ve sonrası tartılarak kurumanın her rafta eşit olup olmadığına bakılmıştır. Ayrıca her rafta bulunan elma dilimlerinden belirlenen numuneler ayrıca tartılarak deney süresinde 30 dakika ara ile ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Böylece elmadan uzaklaşan su miktarının belirlenmesi sağlanmıştır. Ancak toplanması gereken su miktarı net olarak belirlenememiştir. Ayrıca, kurutma ve çakıl taşı enerji depolama sistemindeki hava kaçaqları nedeniyle sağlıklı kütle dengliği yapılması mümkün olmamıştır.



Şekil 5.2 Çekirdek yuvaları çıkartılmış elma numuneleri



Şekil 5.3 Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş elma numuneleri



Şekil 5.4 Kurutma işlemi sonrası elma dilimlerinin tepsideki görünüşü

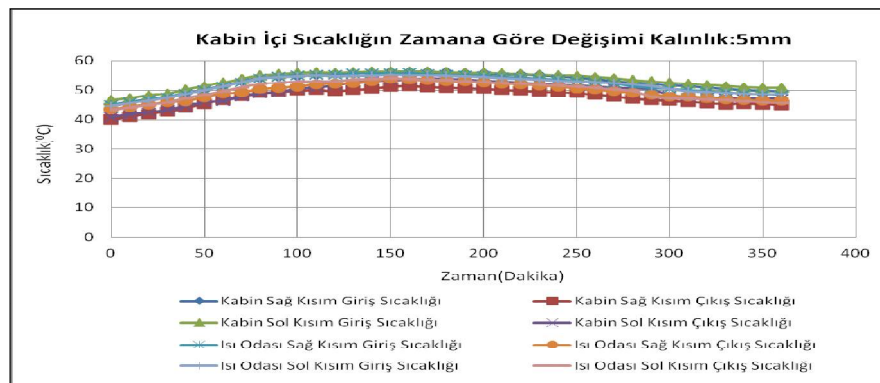
Kurutma işlemi sonucunda elma dilimlerinin tepsideki görünüşü Şekil 5.4'de verilmiştir. Farklı kalınlıklardaki (6mm, 7mm, 8mm, 9mm, 10mm) elma dilimlerinin kuruma davranışları ve kurutma süreleri tespit edilmiştir.

Bunun dışında, deney düzeneğine ilave edilen elektrik sayacı ile kullanılan elektrik enerjisi kWh cinsinden ölçülmüş ve tükettiği enerji miktarı belirlenerek kurutma işlemini sadece elektrik enerjisi kullanarak gerçekleştiren sistemlerle karşılaştırılmıştır.

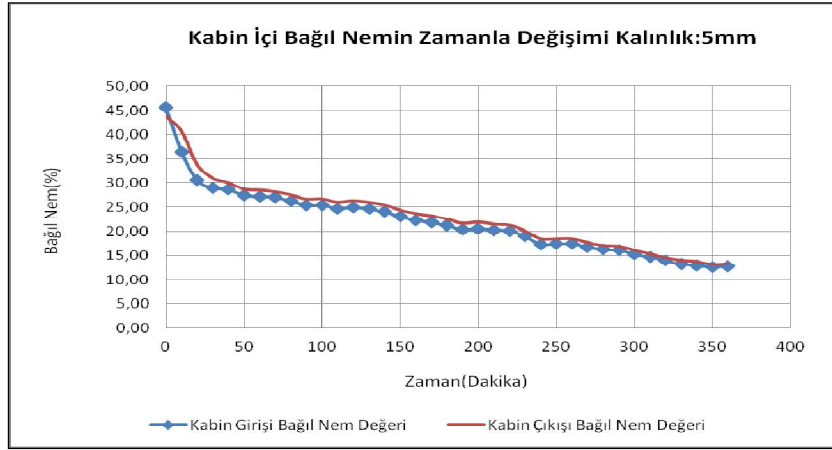
5.2 Kurutma Deneyi Sonuçları

5.2.1 1. Kurutma Deneyi Sonuçları:

Kurutma sisteminin montaj işlemlerinin tamamlanmasından sonra yapılan ilk deney çalışmasında kabinin sadece 3 rafı kullanılmış olup toplamda 5800 gr. golden cinsi elma 5 ± 2 mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Sistemde yer alan kaçaklar nedeniyle kabin içindeki sıcaklık 56.5°C 'yi geçememiş ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Aynı zamanda kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri de birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 516.64 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi $6.13 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.22 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.5'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.6'da, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.7'de , kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.8'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.9'da verilen grafikte gösterilmiştir.



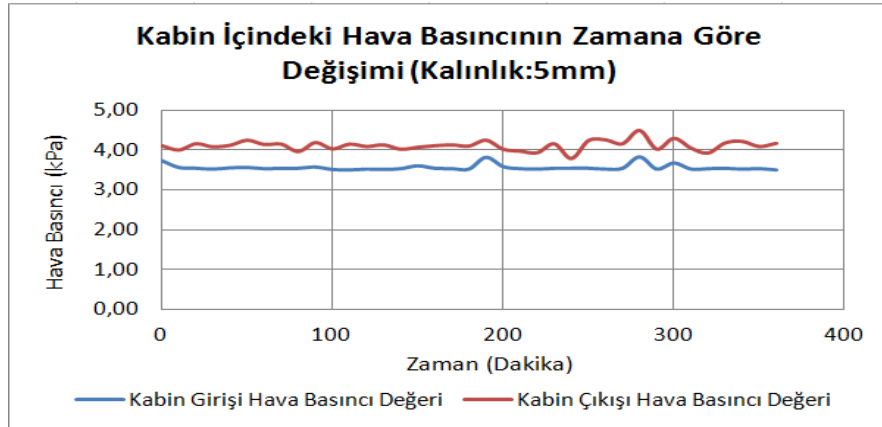
Şekil 5.5 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



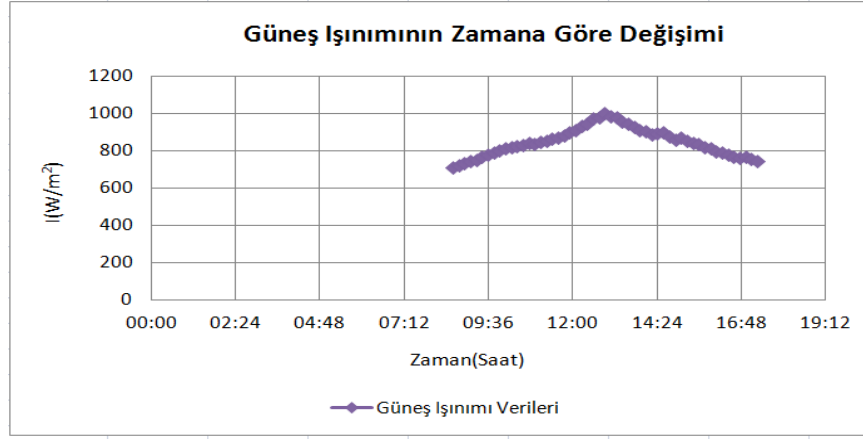
Şekil 5.6 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.7 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

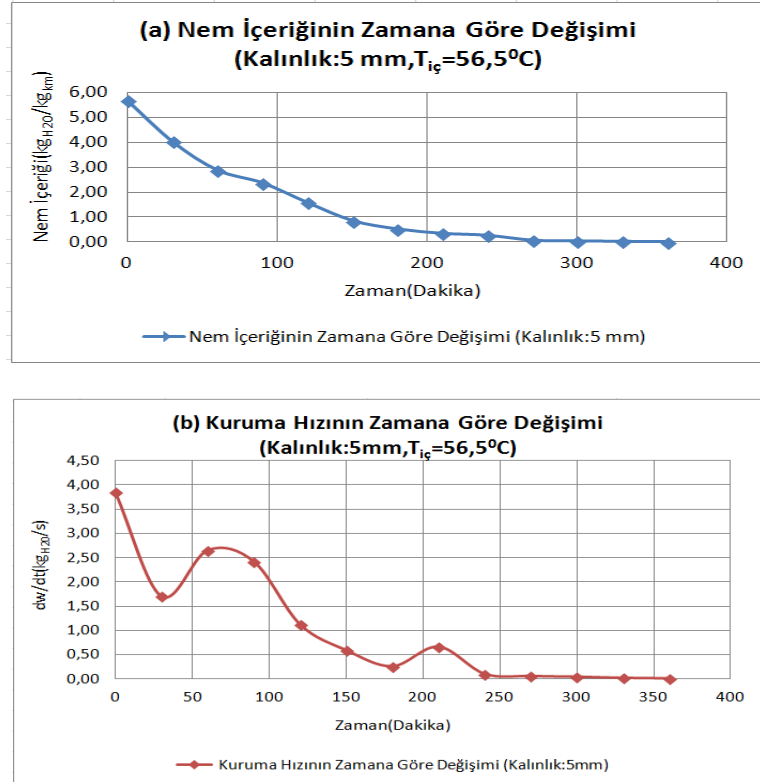


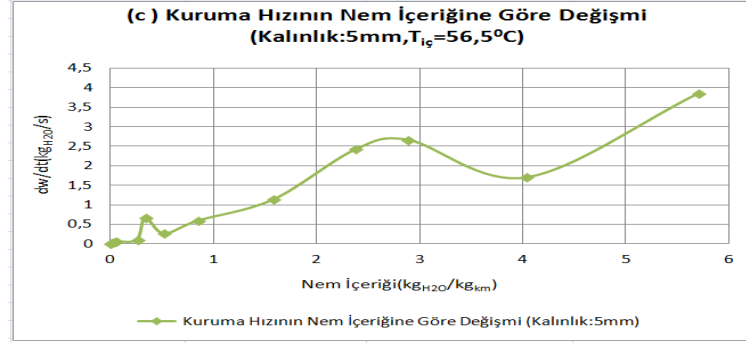
Şekil 5.8 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.9 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Birçok kurutma uygulamasında kurutma teorisinde belirtilen sabit ve azalan kuruma hızı periyotlarının gözlenemeyeceği bilinmektedir. Elma kurutma denemelerinde de bu periyotlara belirgin bir şekilde rastlanılamamıştır. Şekil 5.10'da elma dilimlerinin kuruma periyoduna ilişkin nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.

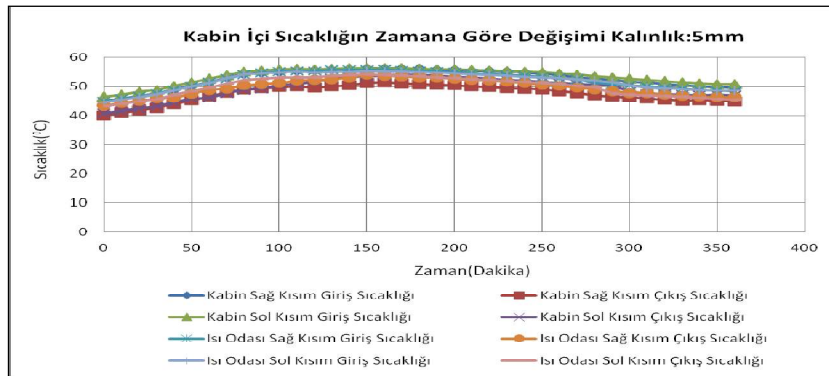




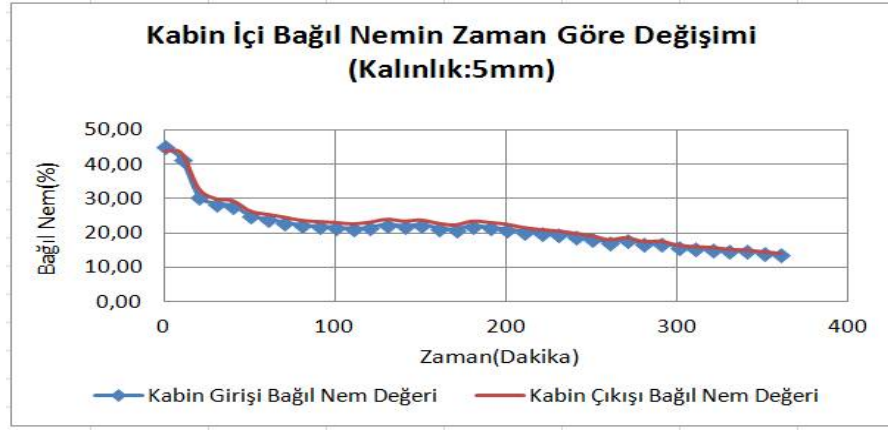
Şekil 5.10 5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

5.2.2 2. Kurutma Deneyi Sonuçları:

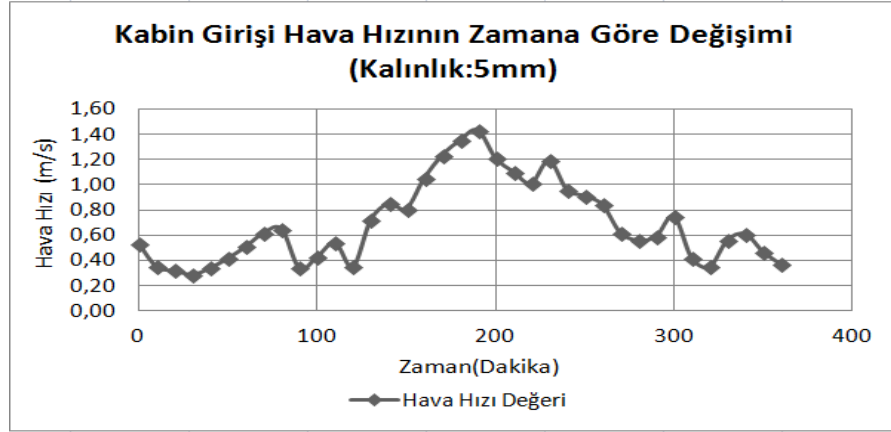
İkinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 6500 gr. golden cinsi elma 5 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Kurutma kabini içindeki sıcaklık bir önceki günde olduğu gibi 56.5°C 'yi geçememiş ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri de birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 614.45 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.87 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.21 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.11'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.12'de, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.13'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.14'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.15'de verilen grafikte gösterilmiştir.



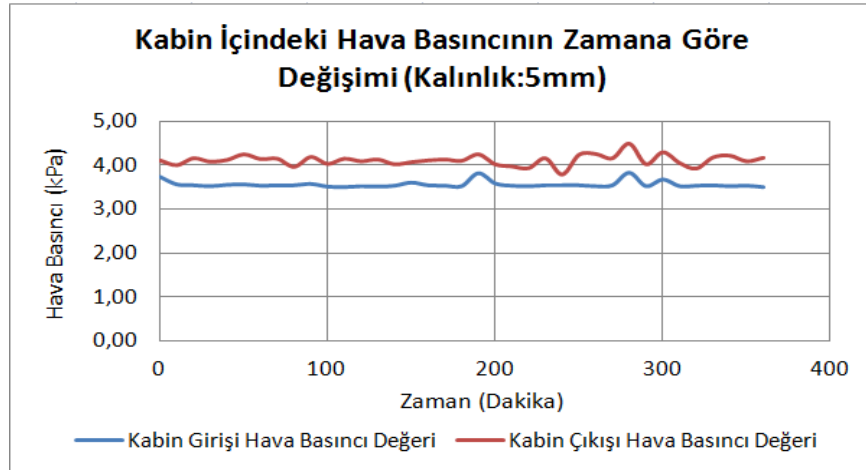
Şekil 5.11 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



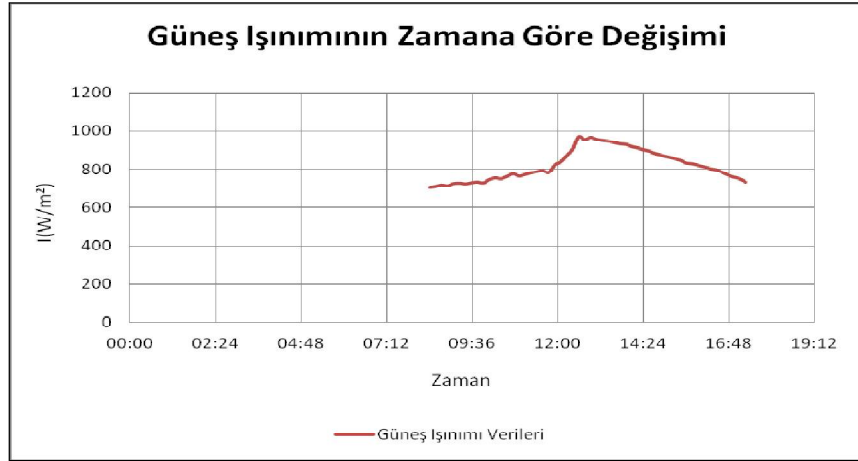
Şekil 5.12 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.13 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

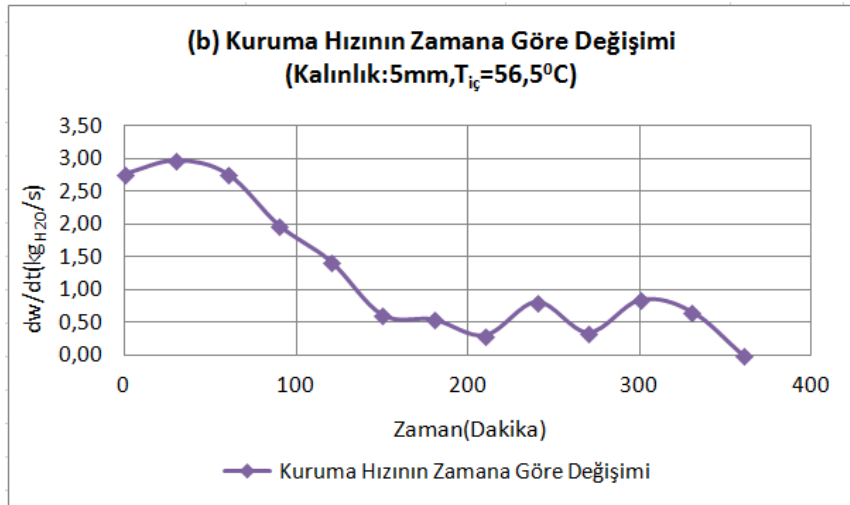
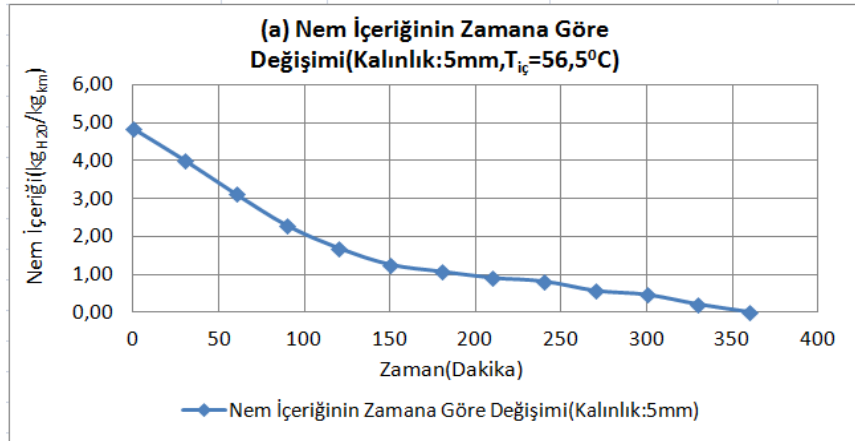


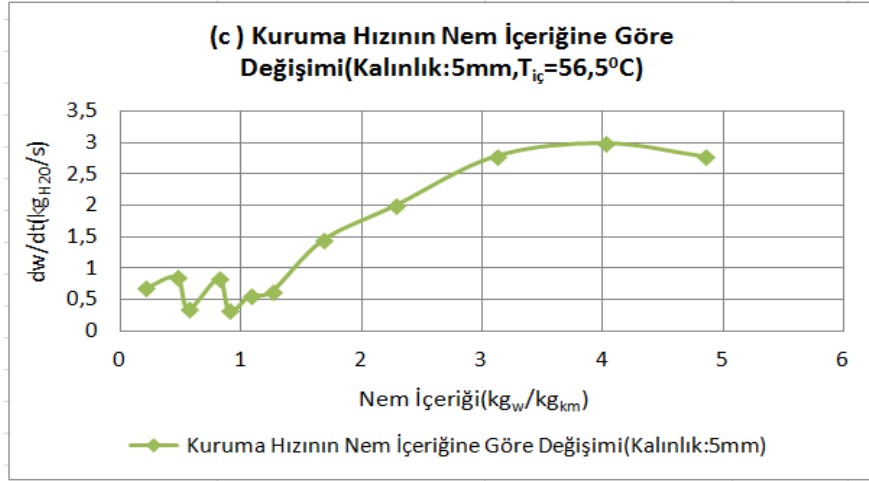
Şekil 5.14 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.15 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Şekil 5.16'da elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.

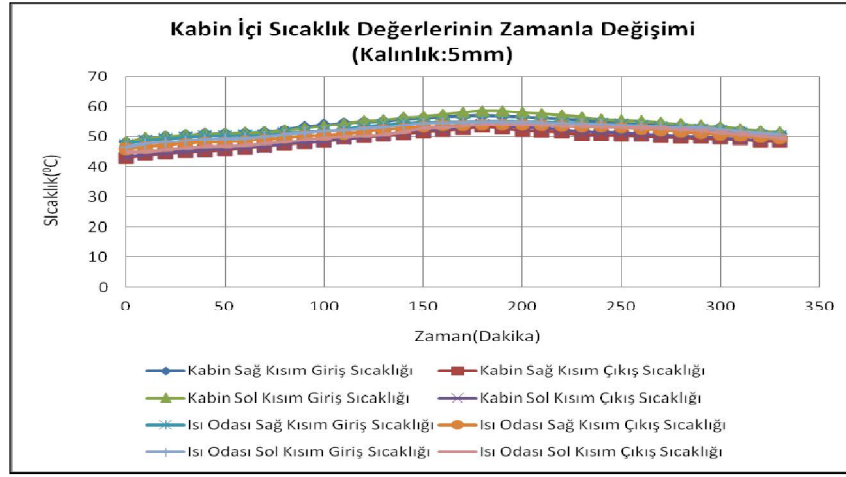




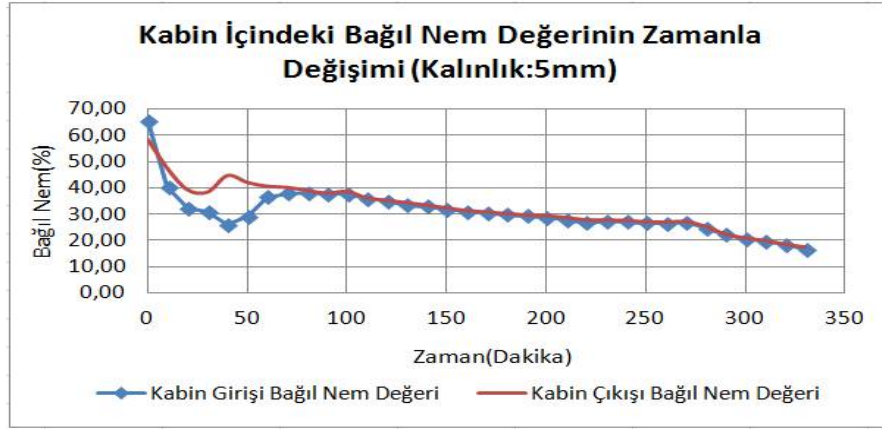
Şekil 5.16 5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

5.2.3 3. Kurutma Deneyi Sonuçları:

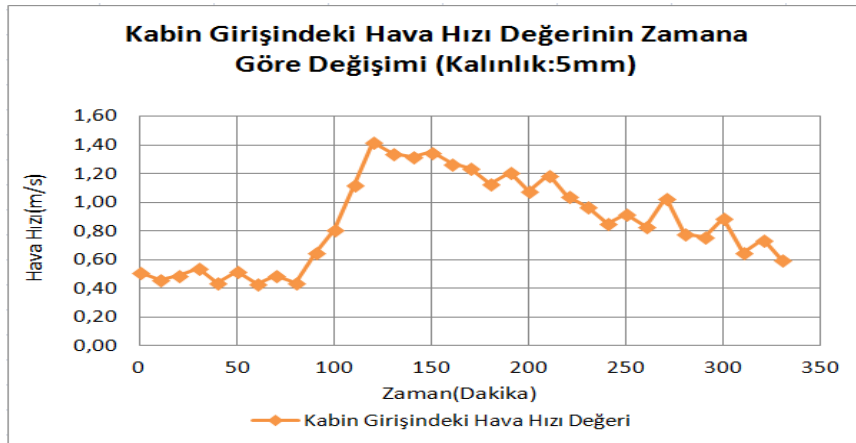
Üçüncü gün gerçekleştirilen deneylerde sistem üzerinde tespit edilen hava kaçaklarının giderilmesi sebebiyle kurutma işlemi normal başlama süresinden 1 saat geç başlatılmıştır. Bu deneysel çalışmada da kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 6200 gr. golden cinsi elma 5 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Kurutma kabini içindeki hava kaçakları giderildiği için sıcaklık 58°C 'ye kadar yükselmiş ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri de birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 5 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 656.44 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.87 \text{ gr}_{H_2O}/\text{gr}_{km}$ nem içeriğinden $0.21 \text{ gr}_{H_2O}/\text{gr}_{km}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.17'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.18'de, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.19'da, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.20'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.21'de verilen grafikte gösterilmiştir.



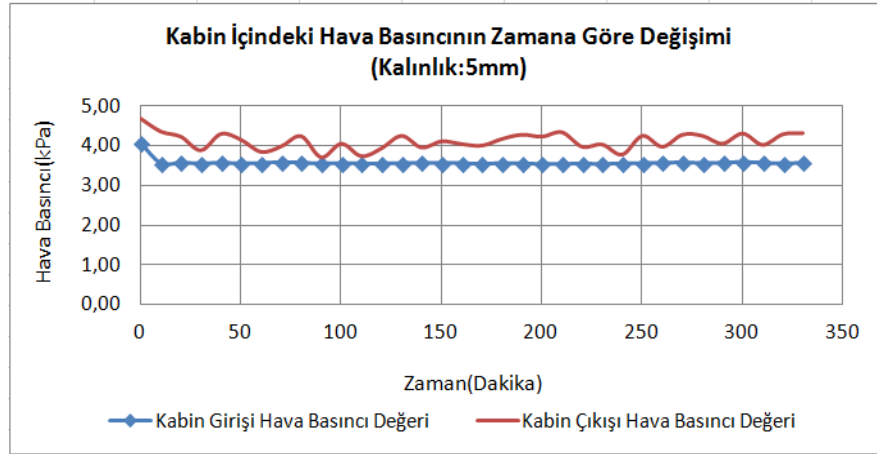
Şekil 5.17 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



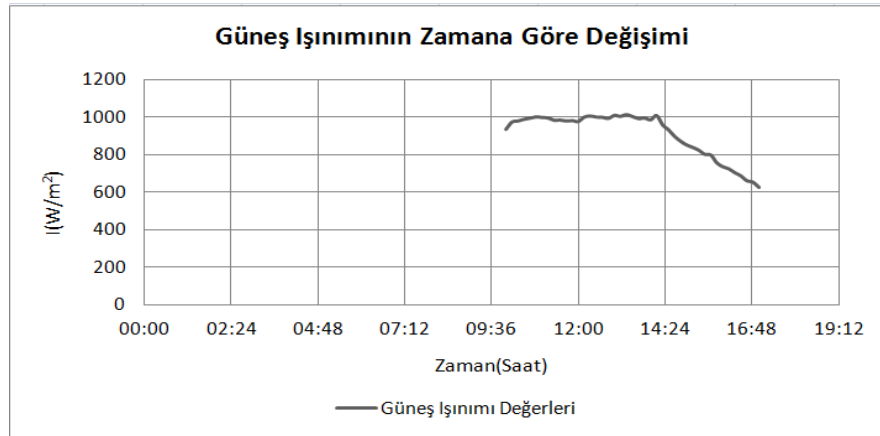
Şekil 5.18 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.19 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

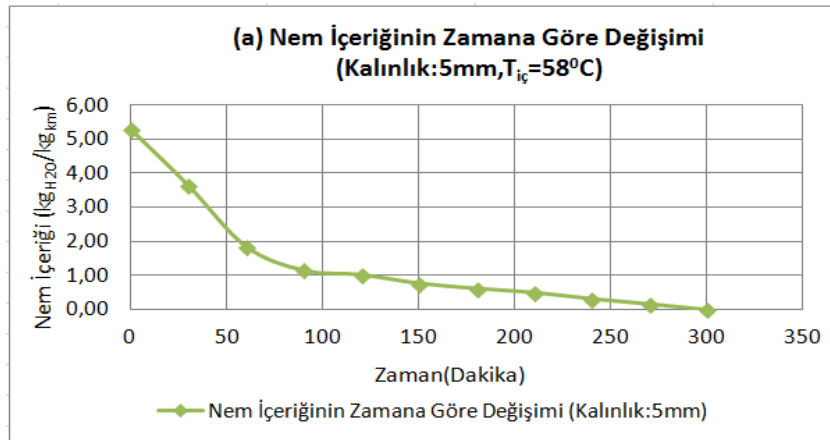


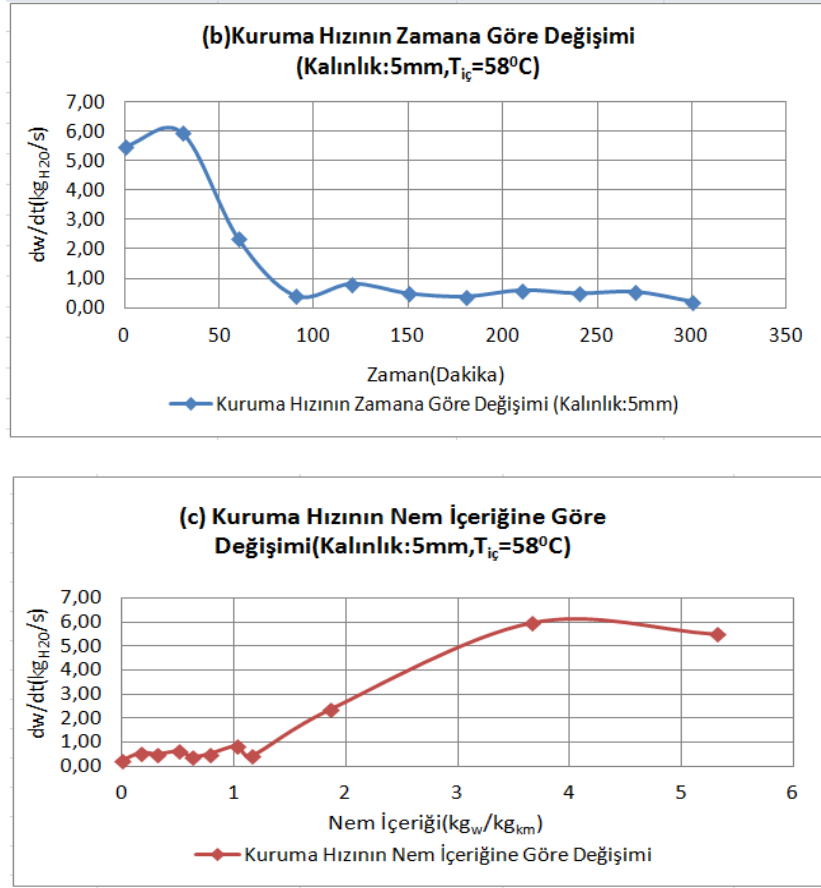
Şekil 5.20 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.21 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Şekil 5.22'de elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının (dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



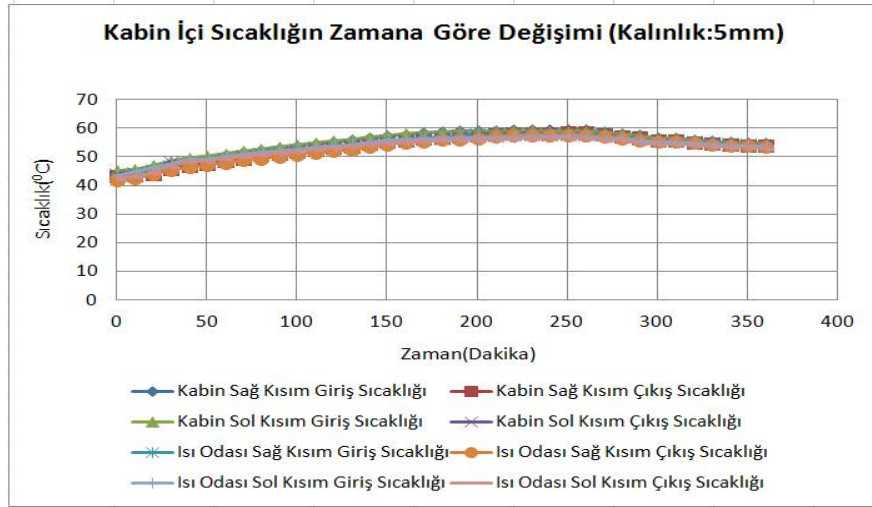


Şekil 5.22 5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

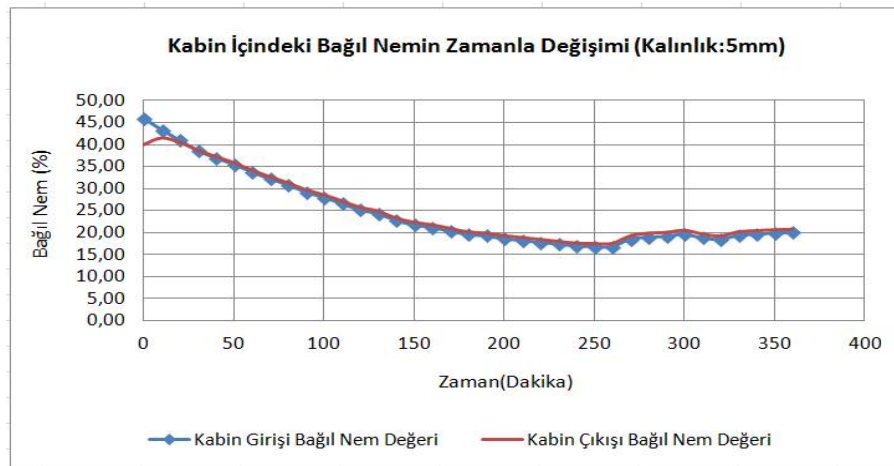
5.2.4 4. Kurutma Deneyi Sonuçları:

Dördüncü gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 6100 gr. golden cinsi elma 5 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Kabin içindeki hava kaçakları giderildiği için kurutma kabini içindeki sıcaklık 60°C 'ye ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının az olmasından dolayı kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri de birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 585.60 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.89 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.19 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.23'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.24'de, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.25'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.26'da ve

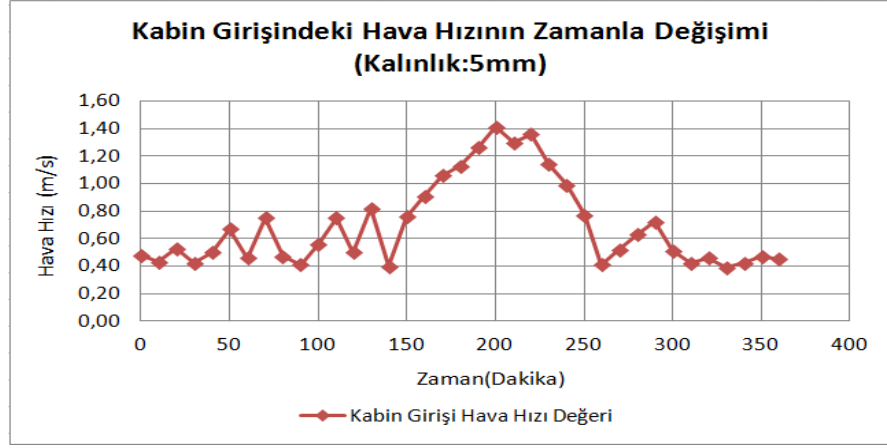
piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.27'de verilen grafikte gösterilmiştir.



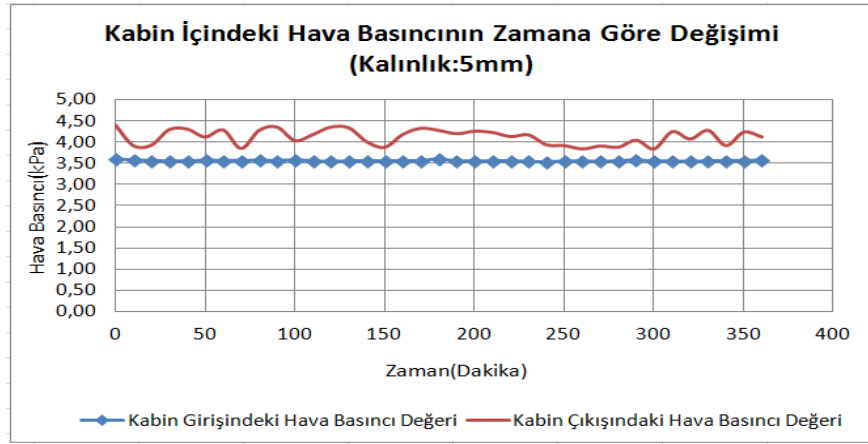
Şekil 5.23 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



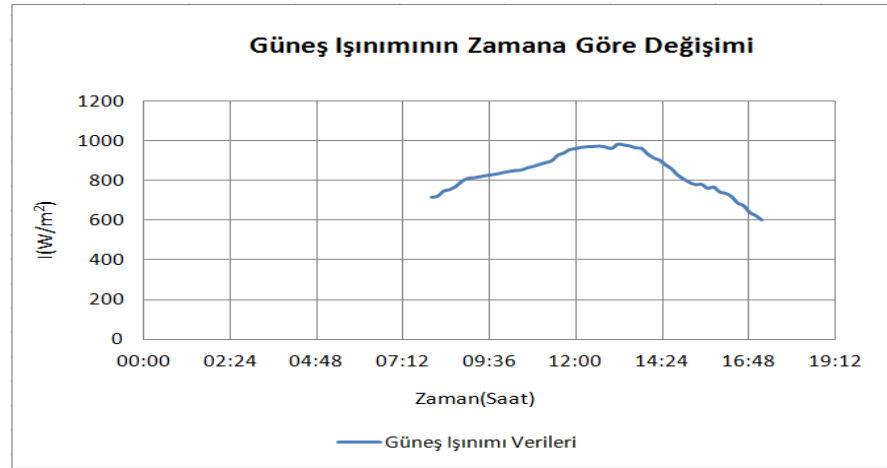
Şekil 5.24 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.25 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

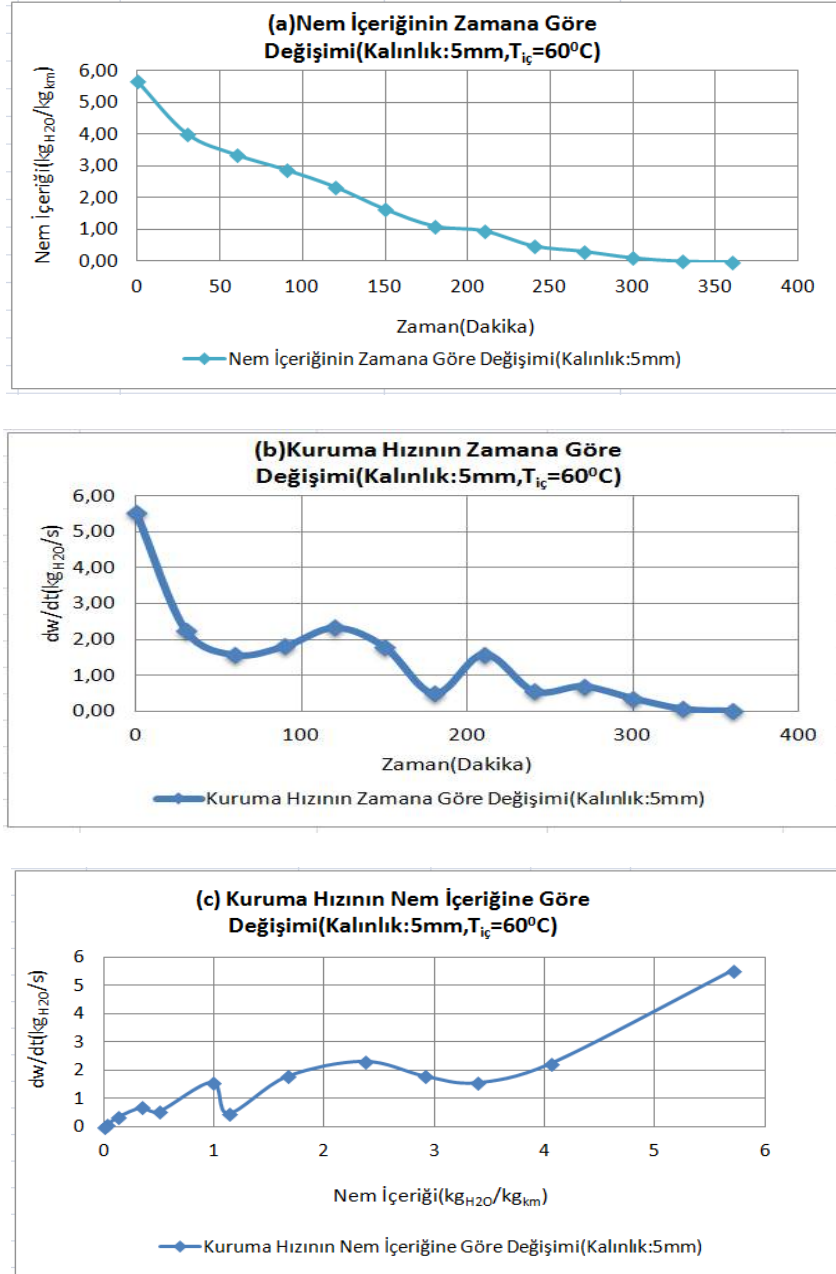


Şekil 5.26 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.27 Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değişimi

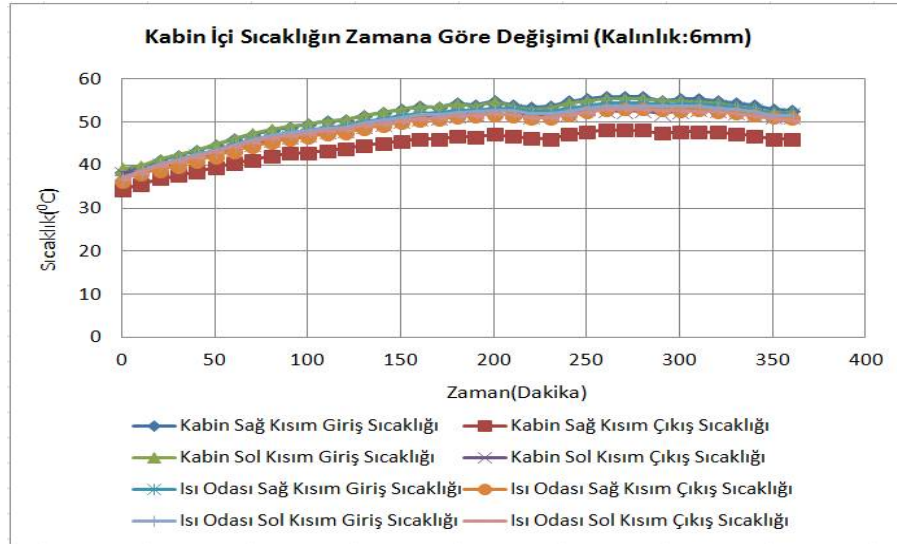
Şekil 5.28'de elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



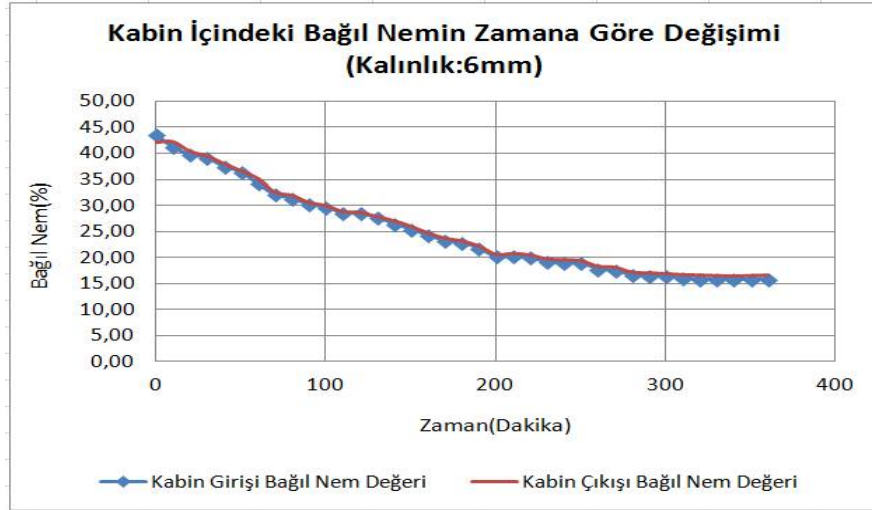
Şekil 5.28 5mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

5.2.5 5. Kurutma Deneyi Sonuçları:

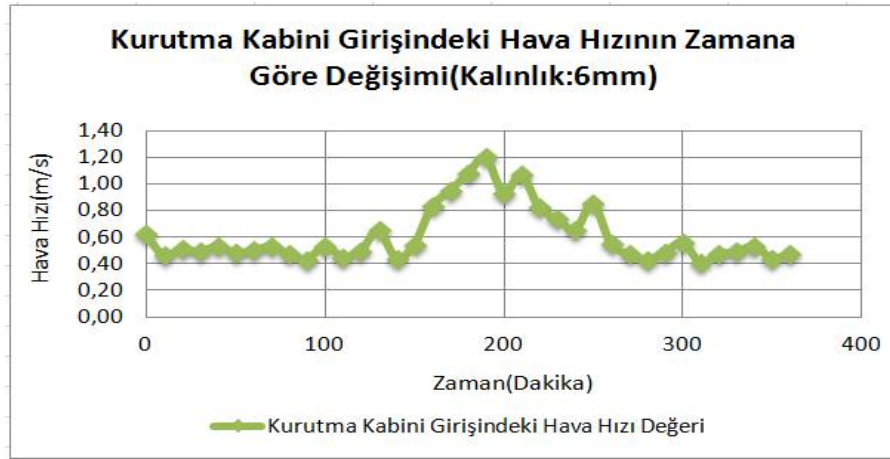
Beşinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 7000 gr. golden cinsi elma 6 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Deneyin yapıldığı gün hava bulutlu olduğu için kurutma kabini içindeki sıcaklık 55°C 'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının biraz daha fazla olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark diğer günlere göre %2 daha fazla çıkmıştır fakat ürün miktarının az olmasından dolayı yine birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 706.19 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 6 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.75 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.14 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.29'da, bağıl nem değerleri Şekil 5.30'da, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.31'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.32'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.33'de verilen grafikte gösterilmiştir.



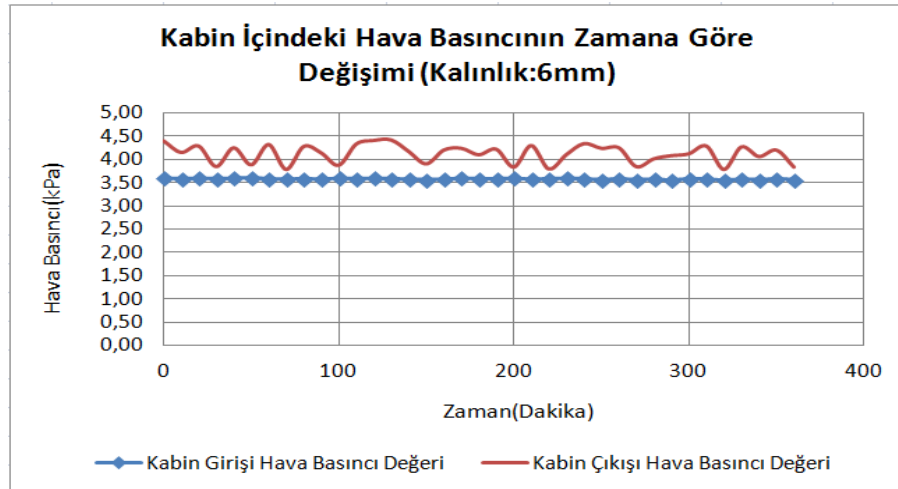
Şekil 5.29 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



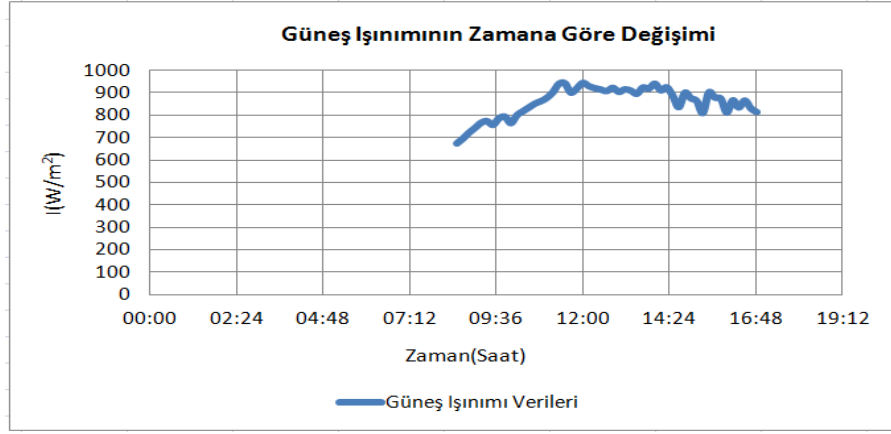
Şekil 5.30 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.31 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

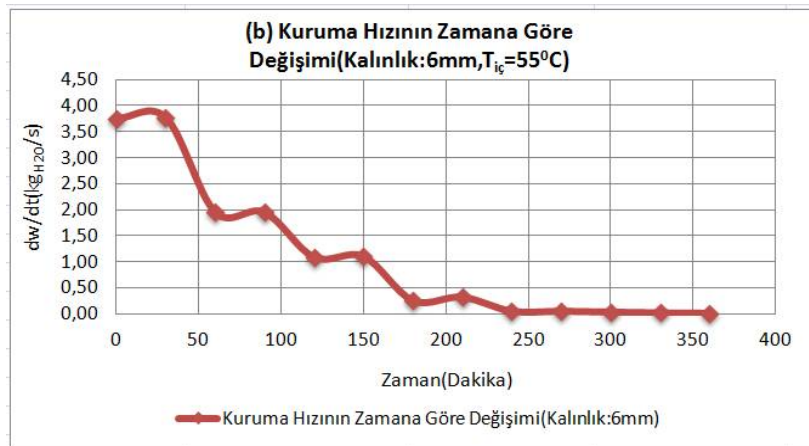
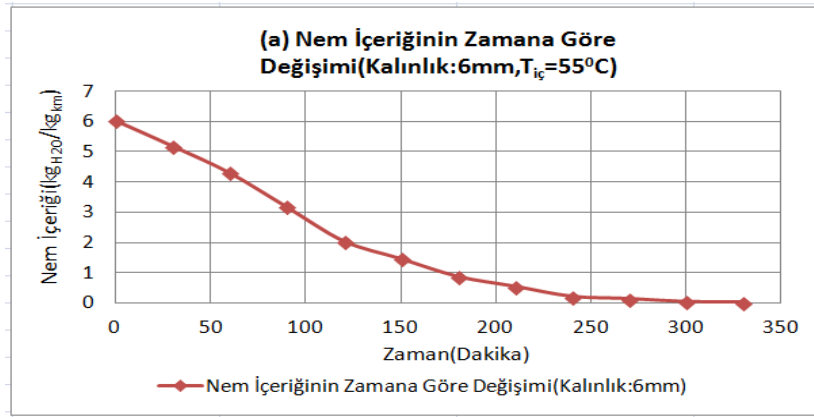


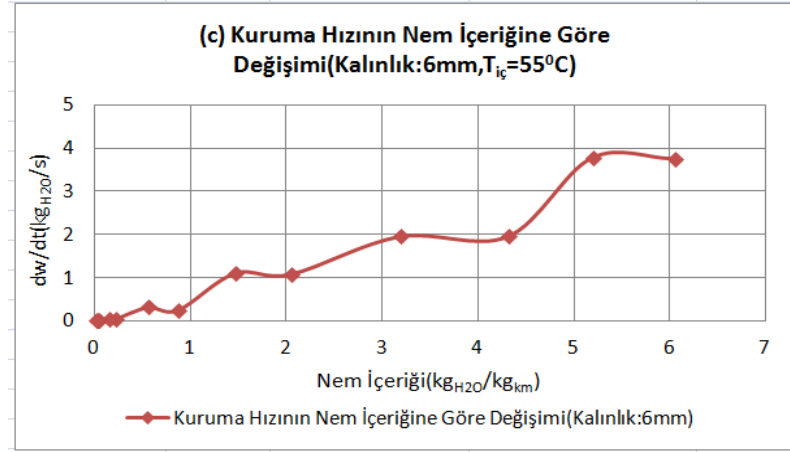
Şekil 5.32 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.33 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Şekil 5.34'de elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.

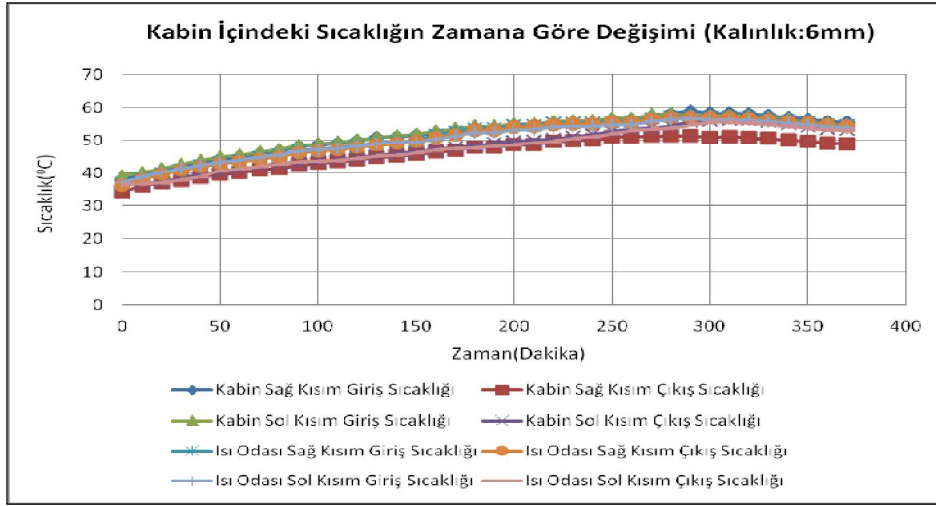




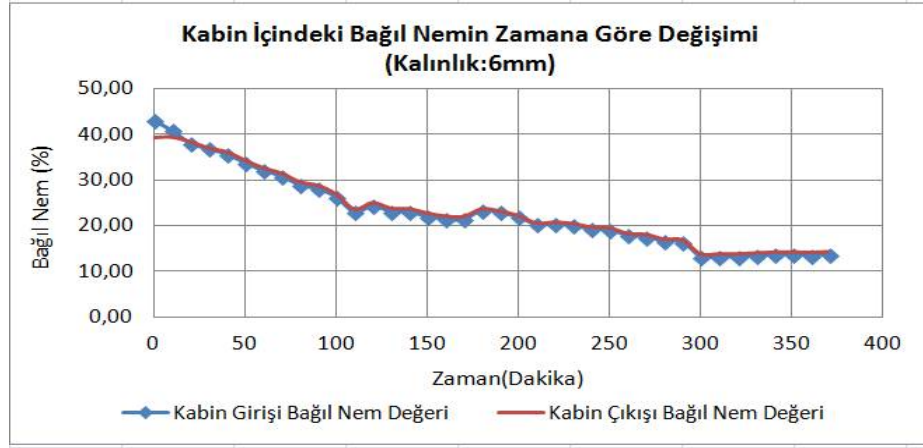
Şekil 5.34 6 mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

5.2.6 6.Kurutma Deneyi Sonuçları:

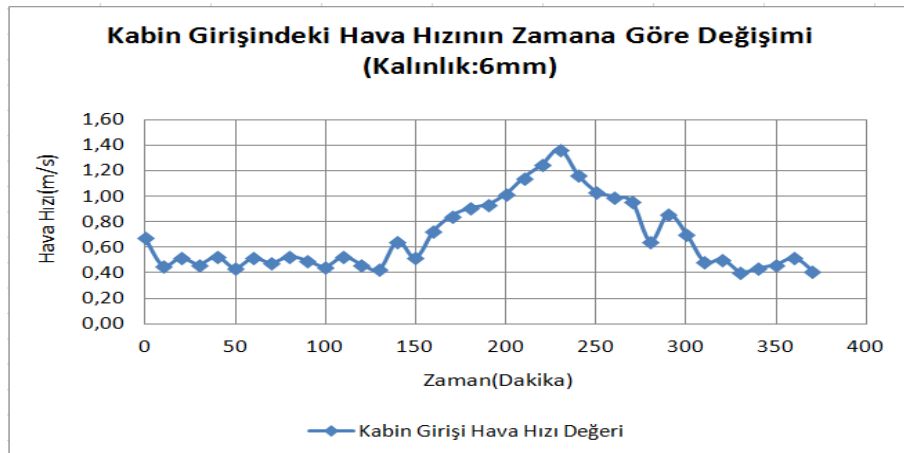
Altıncı gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 7300 gr. golden cinsi elma 6 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deney süresince kurutma kabini içindeki sıcaklık 59°C 'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının biraz daha fazla olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark diğer günlere göre %3 daha fazla çıkmıştır fakat ürün miktarının az olmasından dolayı yine birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat 10 dakika sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 801.66 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 6 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.21 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.17 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.35'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.36'da, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.37'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.38'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.39'da verilen grafikte gösterilmiştir.



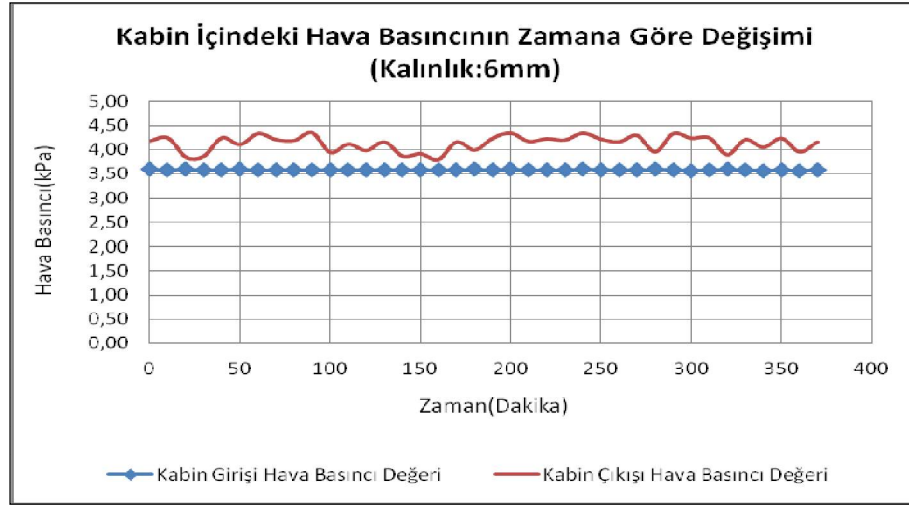
Şekil 5.35 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



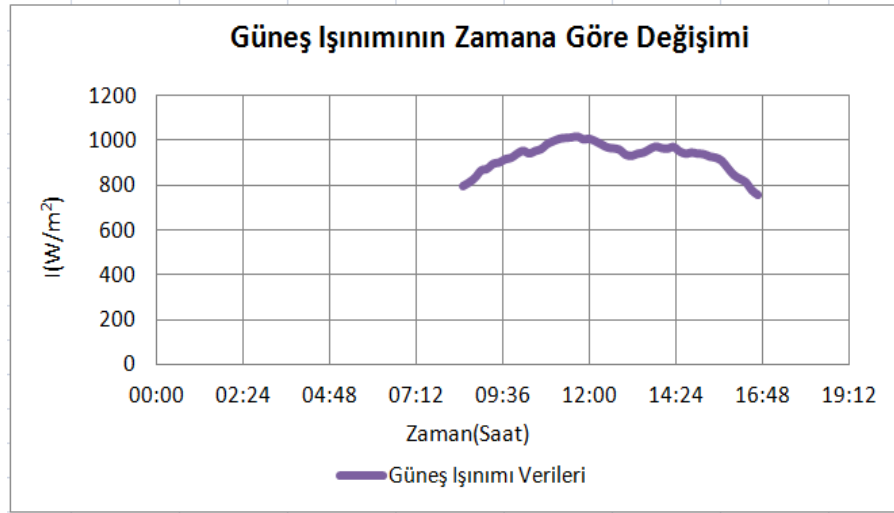
Şekil 5.36 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.37 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

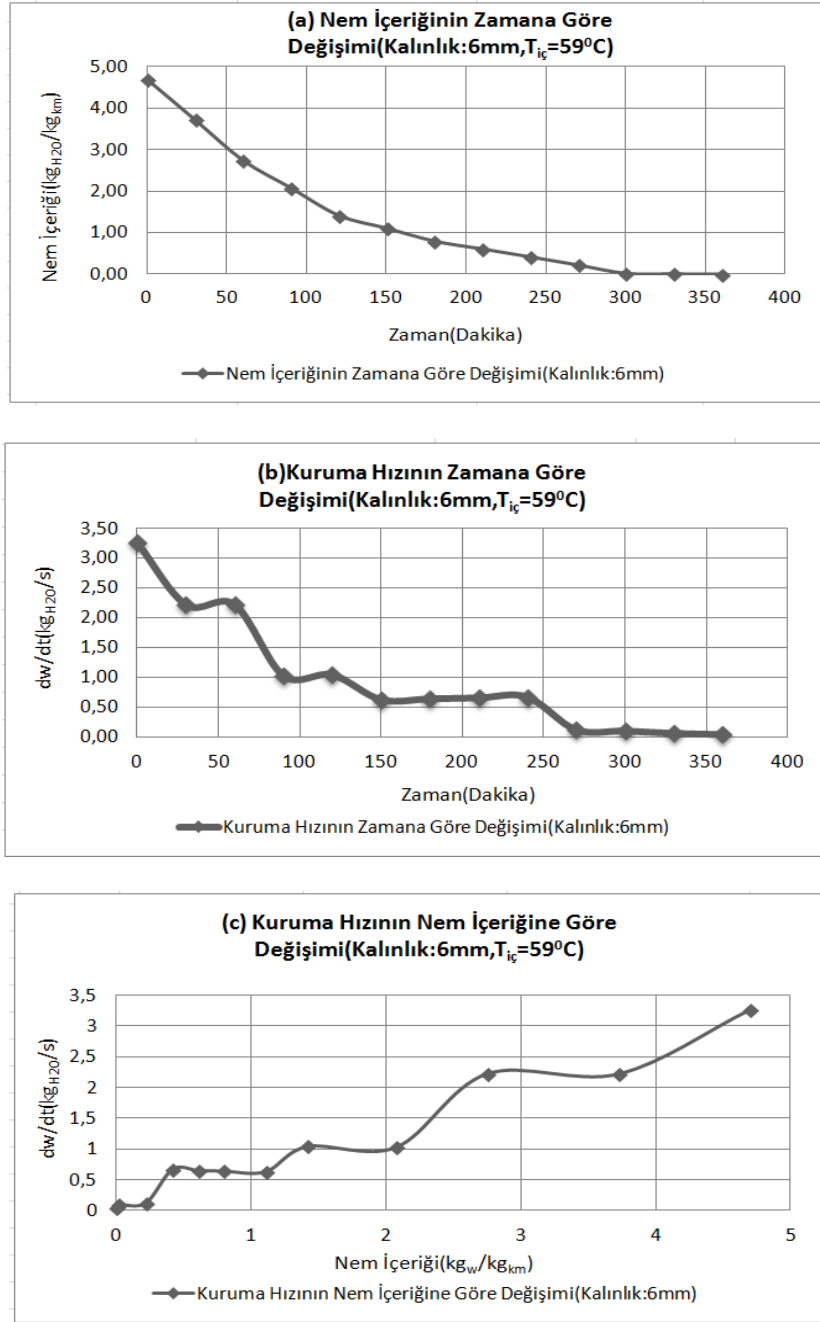


Şekil 5.38 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.39 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Şekil 5.40'da elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.

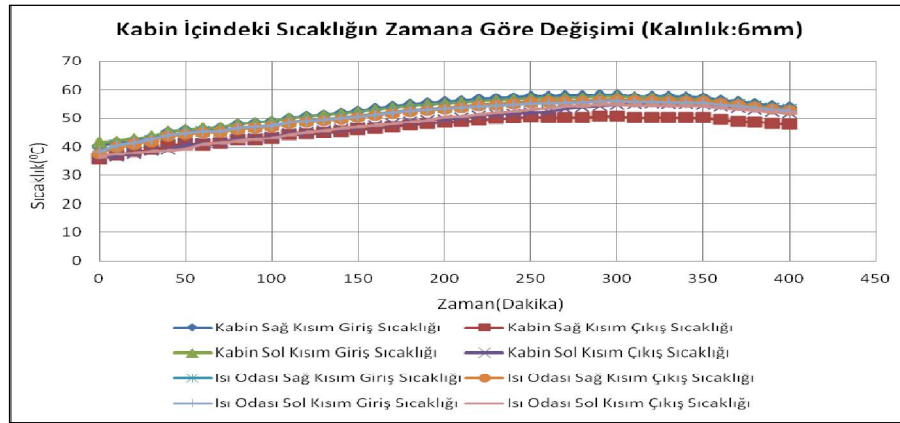


Şekil 5.40 6 mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

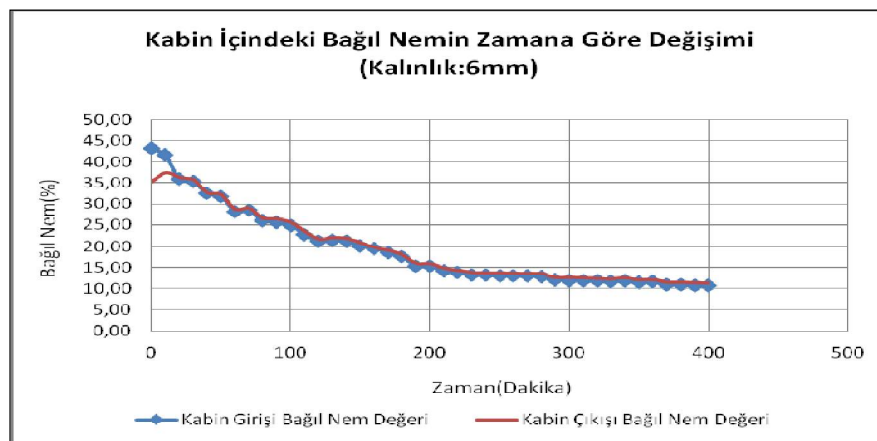
5.2.7 7. Kurutma Deneyi Sonuçları:

Yedinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin yine sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 6900 gr. golden cinsi elma 6 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deney süresince sürekli değişen güneş ışınımı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık 58.3°C 'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini

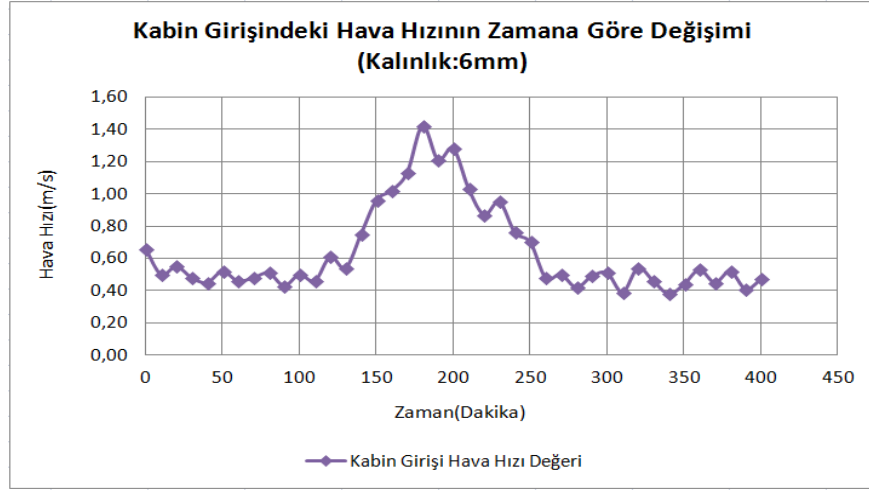
içerisindeki ürün miktarının biraz daha fazla olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark da yine birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat 40 dakika sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 679.52 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 6 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.34 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.12 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.41'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.42'de, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.43'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.44'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.45'de verilen grafikte gösterilmiştir.



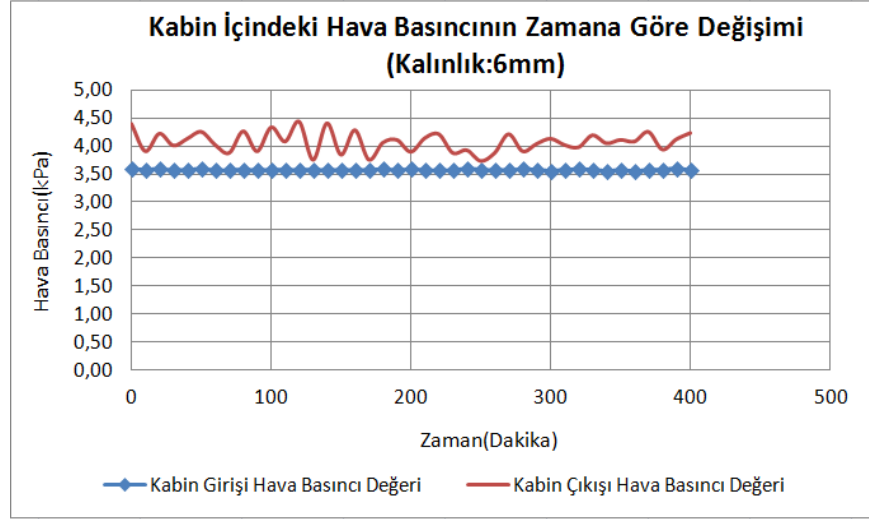
Şekil 5.41 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



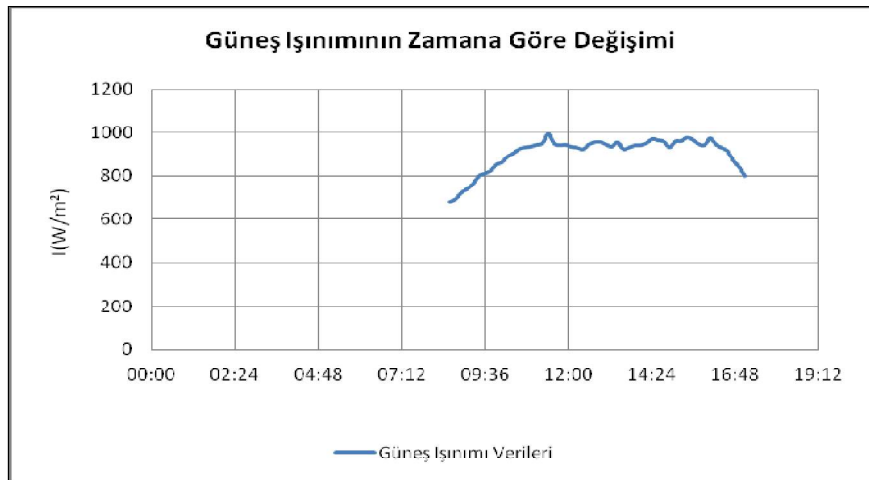
Şekil 5.42 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.43 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

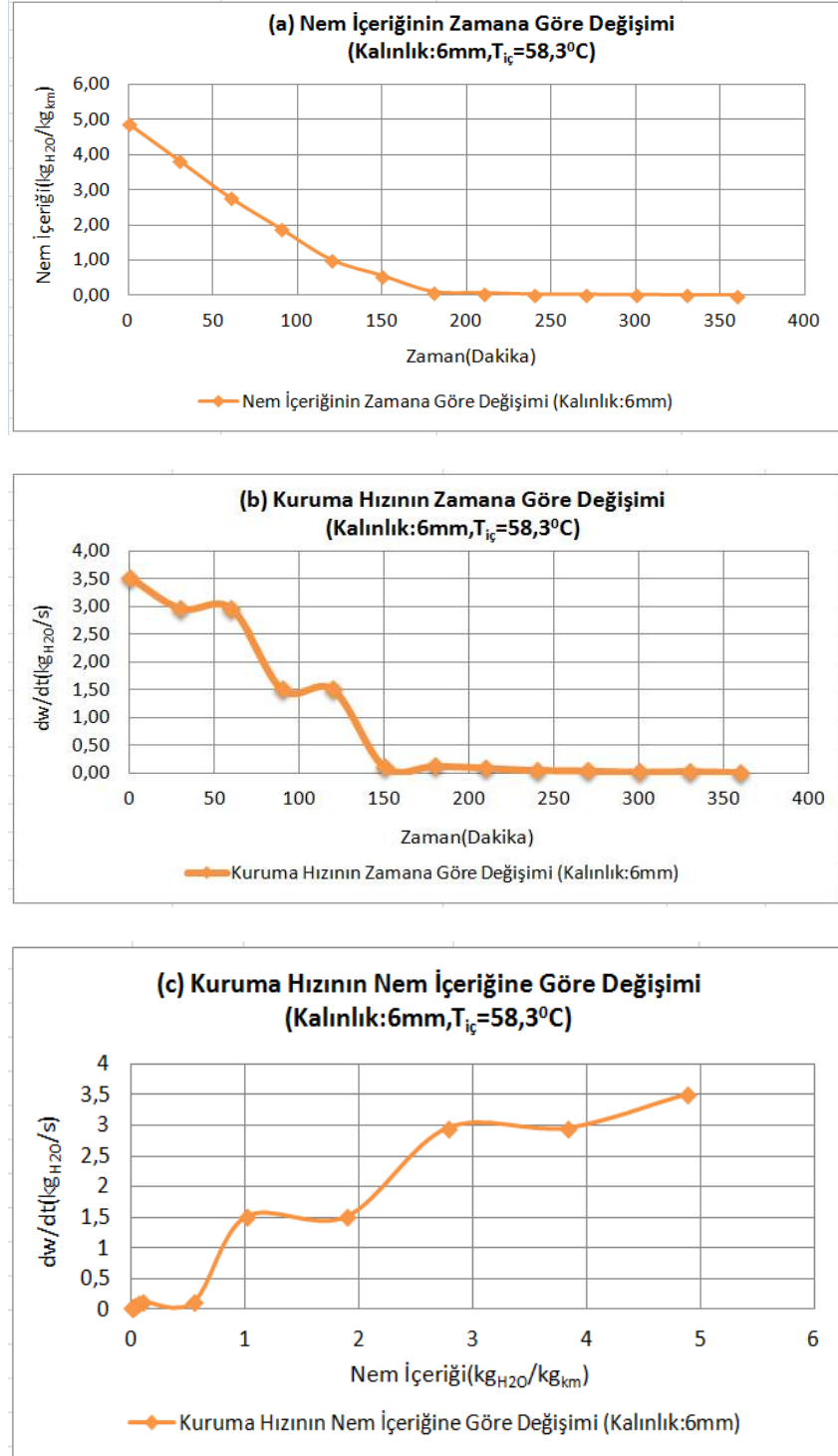


Şekil 5.44 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.45 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

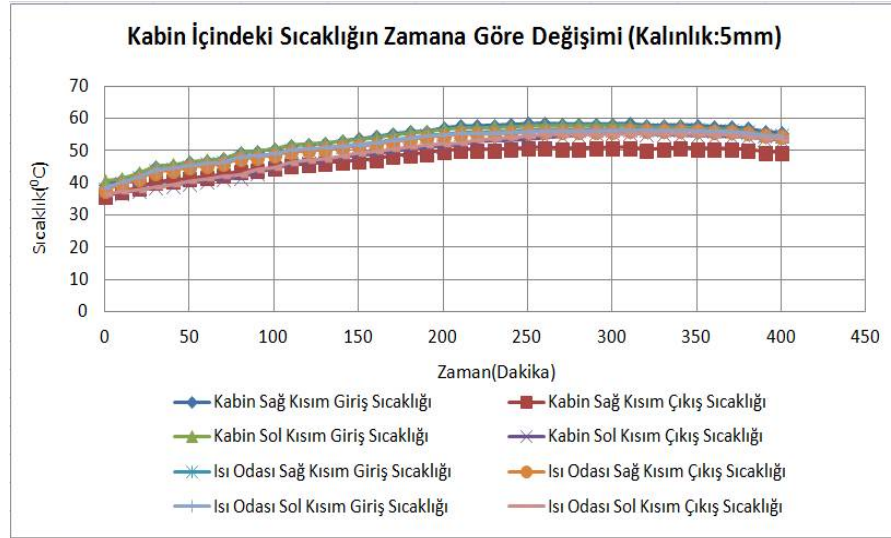
Şekil 5.46'da elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



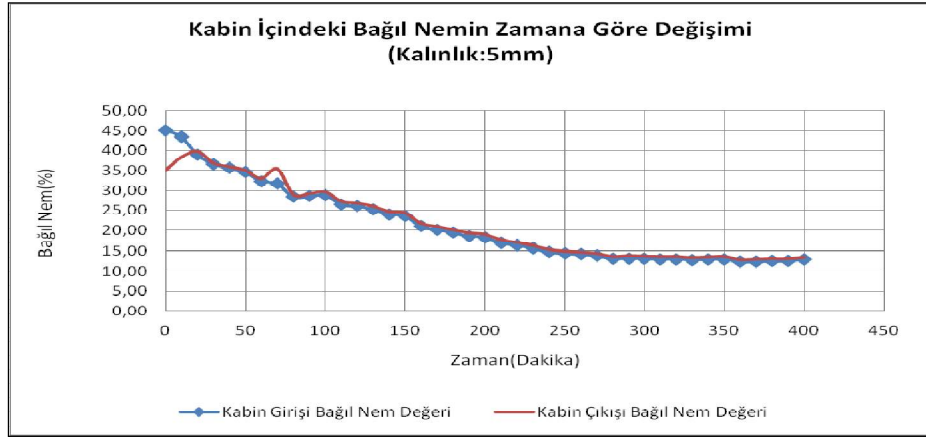
Şekil 5.46 6 mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

5.2.8 8. Kurutma Deneyi Sonuçları

Sekizinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin yine sadece 4 rafı kullanılmış olup toplamda 7100 gr. golden cinsi elma 5 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deney süresince sürekli değişen güneş ışınımı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık 58.4°C 'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının biraz daha fazla olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark da yine birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kurutma işlemi 6 saat 40 dakika sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 752.06 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.52 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.17 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.47'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.48'de, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.49'da, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.50'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.51'de verilen grafikte gösterilmiştir.



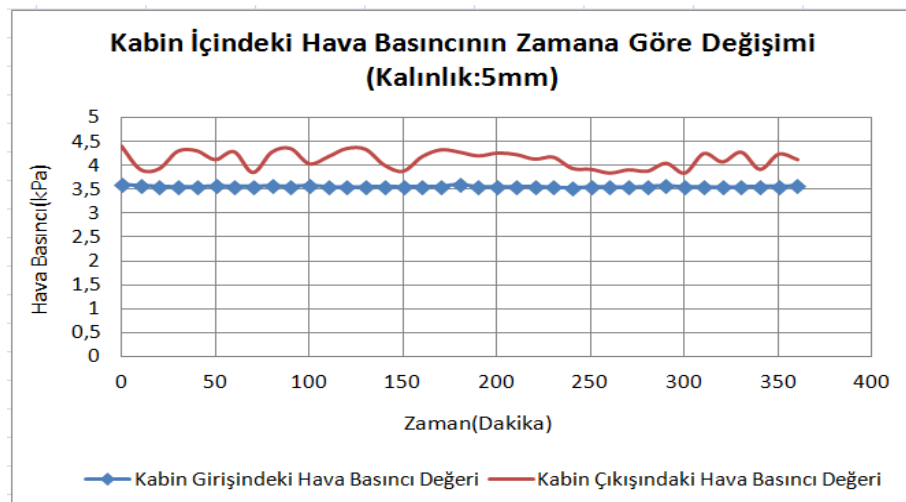
Şekil 5.47 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



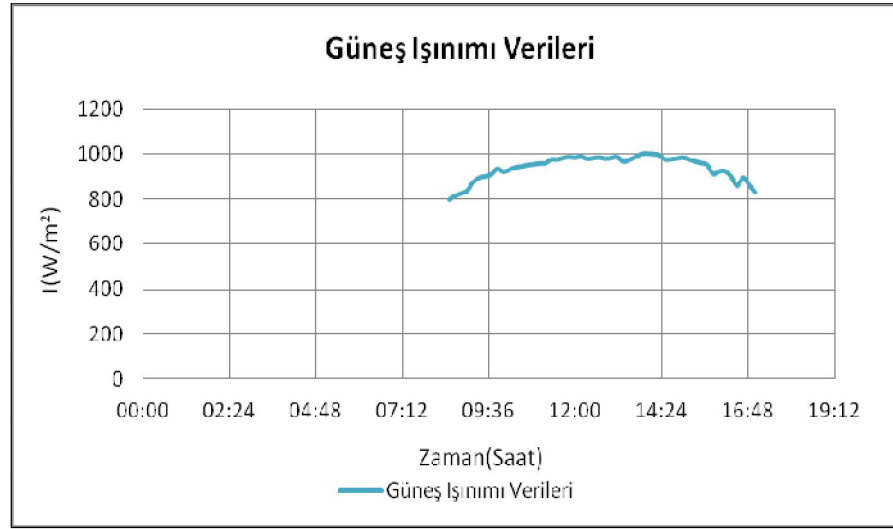
Şekil 5.48 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.49 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

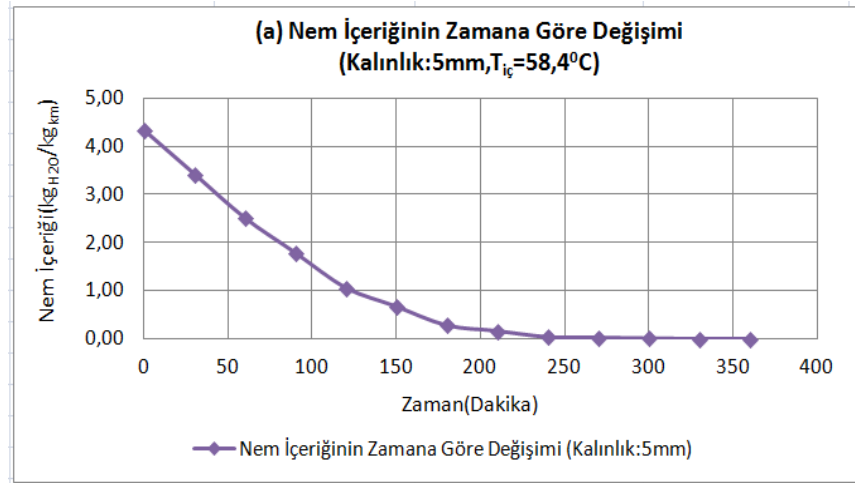


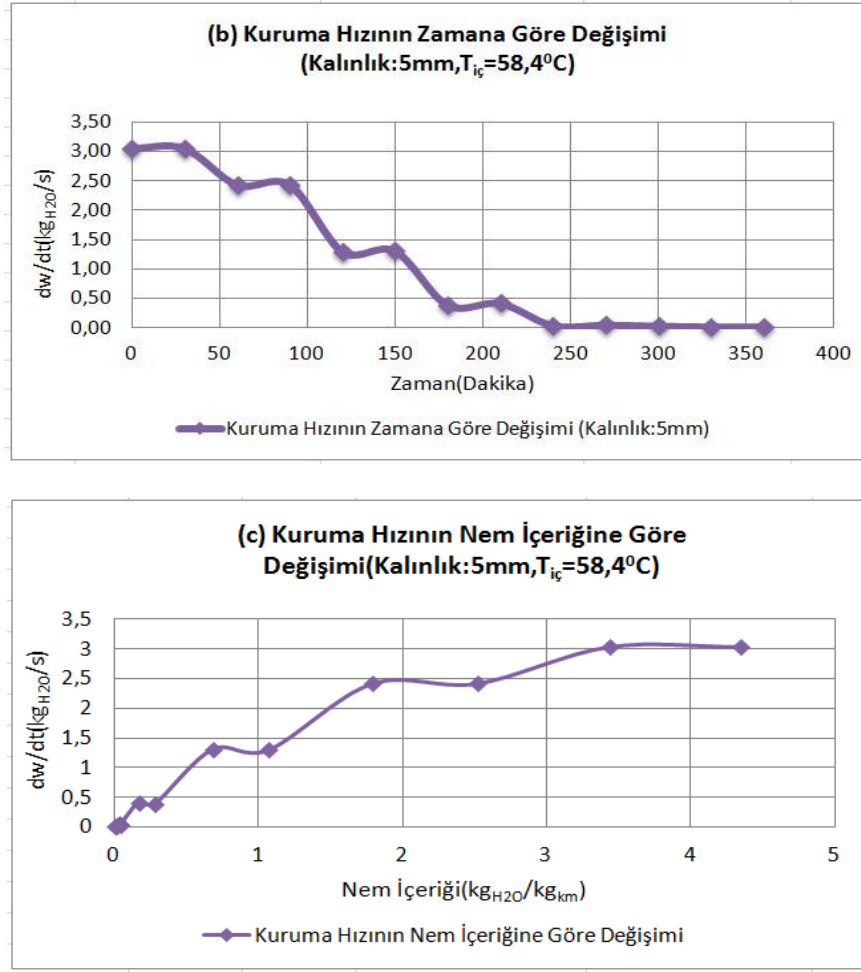
Şekil 5.50 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.51 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Şekil 5.52'de elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



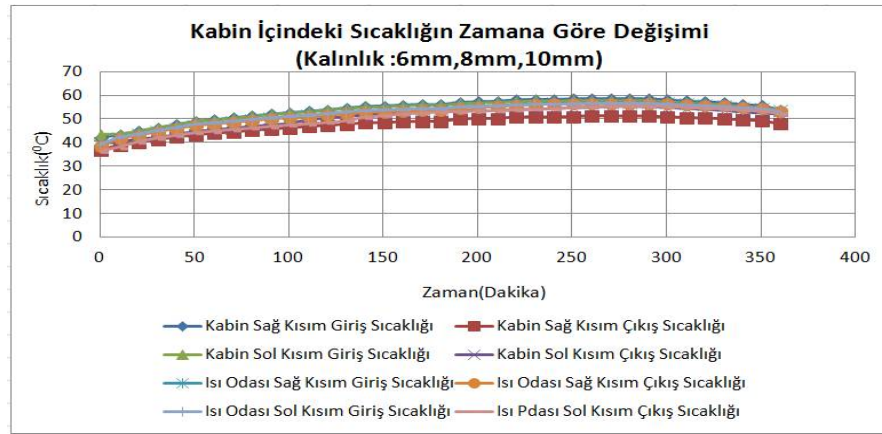


Şekil 5.52 5 mm kalınlığındaki elma dilimleri için kuruma periyodları

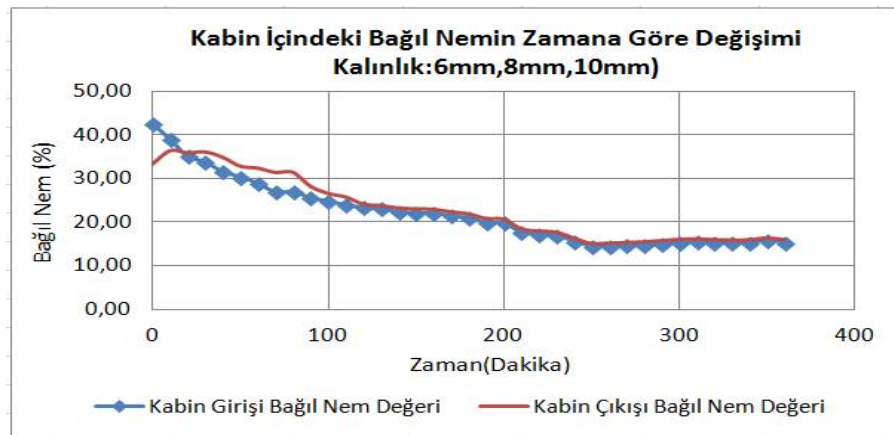
5.2.9 9. Kurutma Deneyi Sonuçları

Dokuzuncu gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin yine sadece 4 rafı kullanılmış olup diğer yapılan kurutma deneylerinden farklı olarak toplamda 7300 gr. golden cinsi elma 2 rafta 6mm, 1 rafta 8mm ve 1 rafta 10 mm kalınlıkta olacak şekilde farklı kalınlıklarda dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deney süresince sürekli değişen güneş ışınımı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık $58,5^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretilmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının farklı kalınlıklarda olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark önceki günlerde yapılan deneylere göre yaklaşık %5 daha fazla olduğu gözlenmiştir fakat ürün miktarının az olmasından dolayı yine birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir.

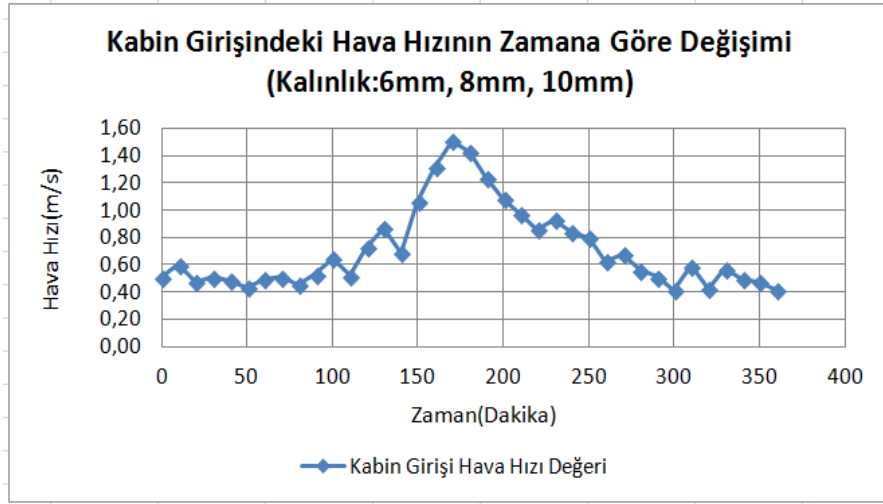
Kurutma işlemi 6 saat 30 dakika sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 832.7 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 6 mm kalınlığındaki elma dilimi $4,28 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0,12 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 8 mm kalınlığındaki elma dilimi $4,45 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0,14 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 10 mm kalınlığındaki elma dilimi $5,20 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0,21 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Elma dilimlerinin farklı kalınlıklarda olması kurutma süresinin değişmesine neden olmamıştır. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.53'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.54'de, kabin girişi hava hızı değerleri Şekil 5.55'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.56'da ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.58'de verilen grafikte gösterilmiştir.



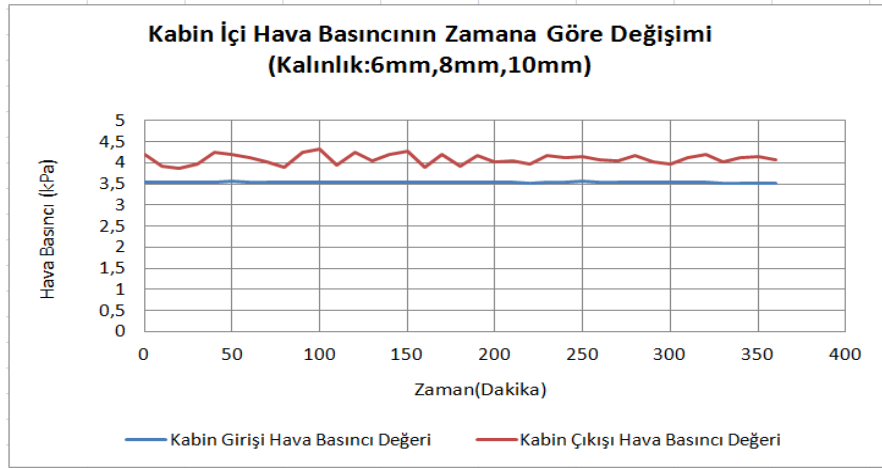
Şekil 5.53 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



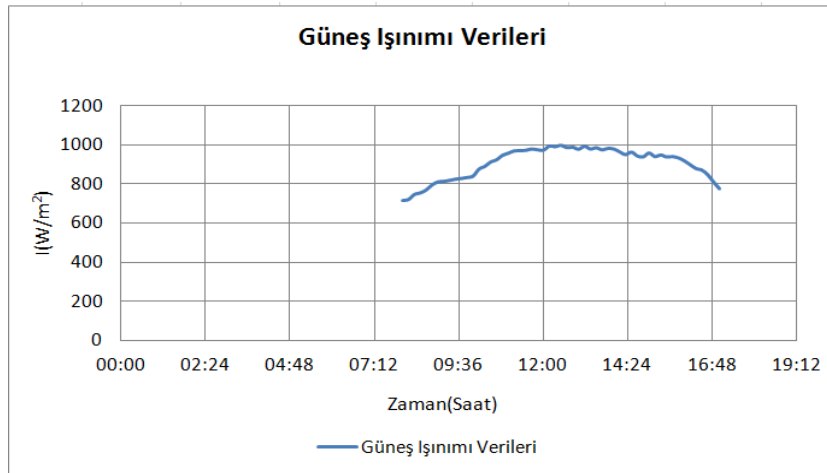
Şekil 5.54 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.55 Kabin girişindeki hava hızının zamana göre değişimi

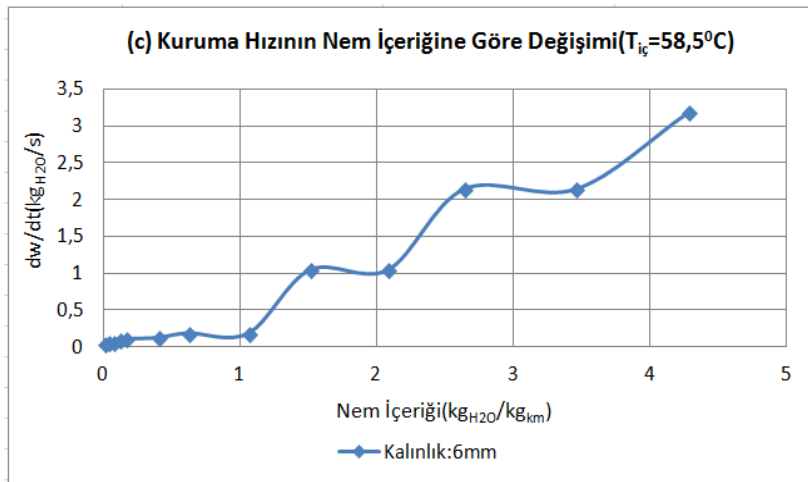
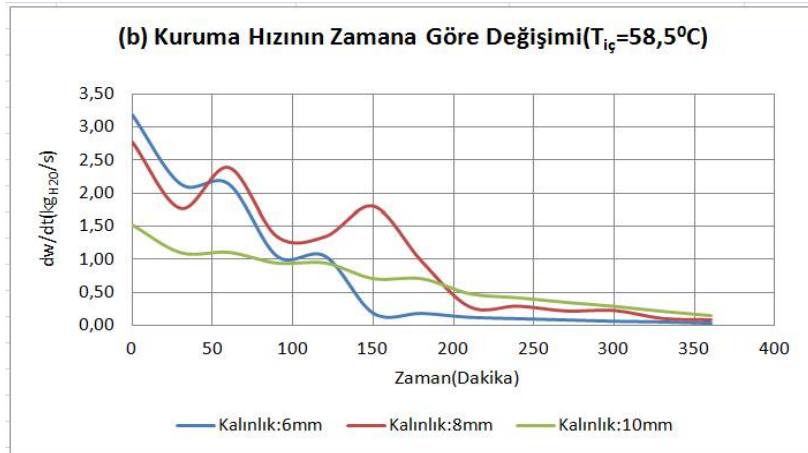
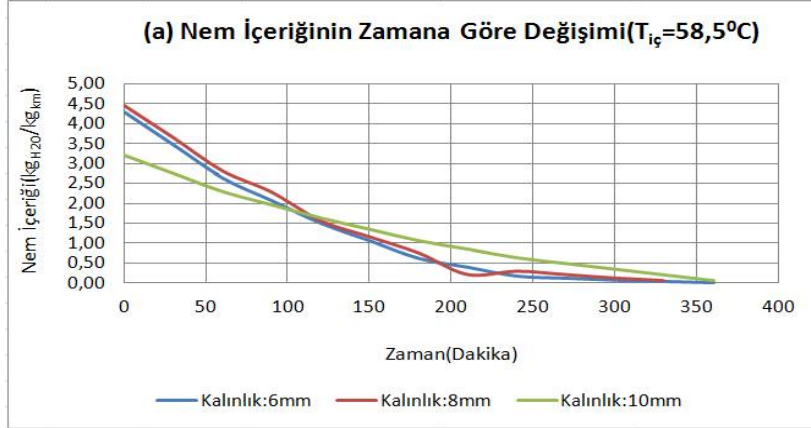


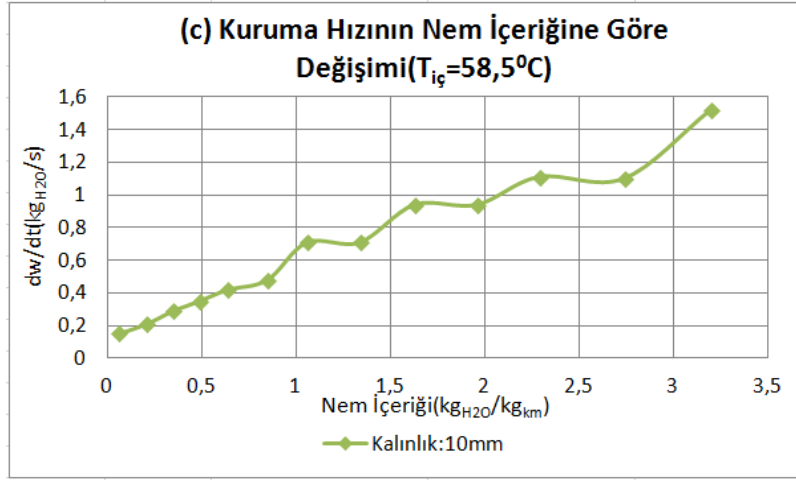
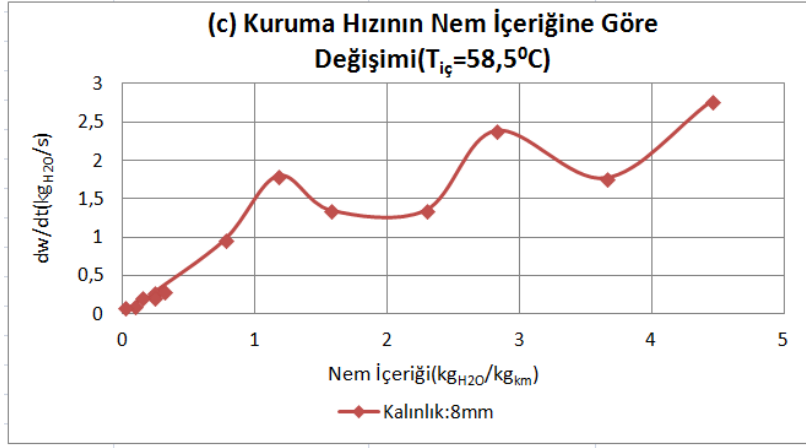
Şekil 5.56 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.57 Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değişimi

Bu deney çalışmasında farklı kalınlıklardaki(6mm,8mm,10mm) elma dilimlerinin kuruma davranışları incelenmiş olup Şekil 5.58'de her üç kalınlık değerine sahip elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



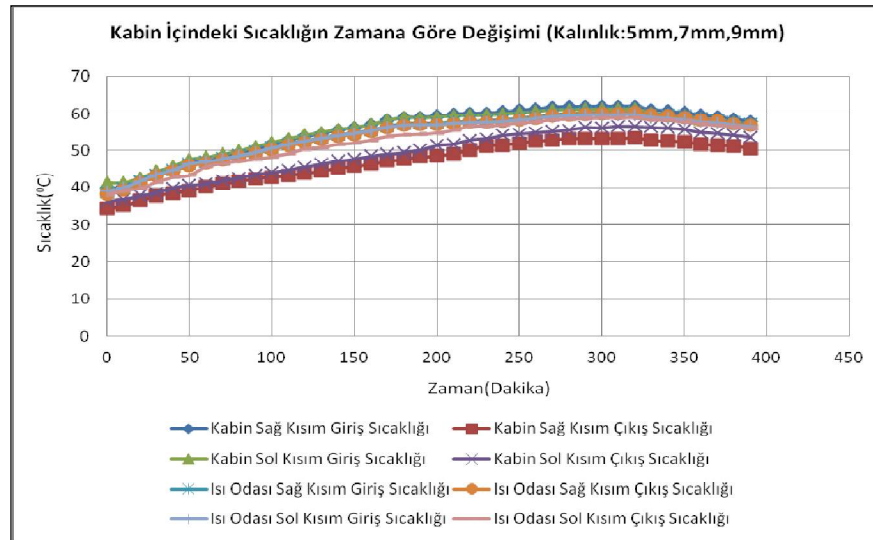


Şekil 5.58 Farklı kalınlıklardaki (6mm, 8mm, 10mm) elma dilimleri için kuruma periyodları

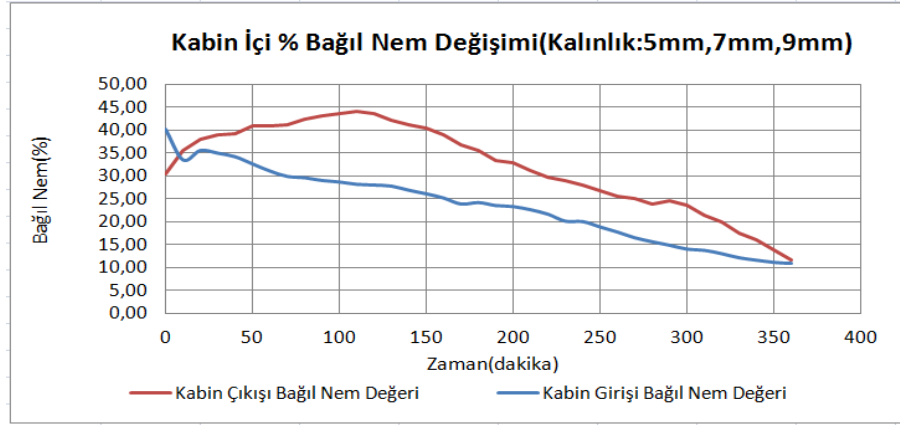
5.2.10 10. Kurutma Deneyi Sonuçları:

Onuncu gün gerçekleştirilen deneylerde diğer deneysel çalışmalardan farklı olarak toplamda 18 raf bulunan kurutma kabininin tamamı kullanılmış olup yapılan kurutma deneylerinden farklı olarak toplamda 30000 gr. golden cinsi elma 16 rafta 5mm, 1 rafta 7mm ve 1 rafta 9mm kalınlıkta olacak şekilde farklı kalınlıklarda dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deneyde de elma dilimlerinin farklı kalınlıklarda olması kurutma süresinin değişmesine neden olmamıştır. Deney süresince sürekli değişen güneş ışınlamı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık 62.9°C 'ye kadar ulaşmış ve sistemin tam kapasite çalıştırılmasından dolayı kurutma kabine havanın giriş ve çıkış değerleri arasında yaklaşık 10°C 'ye yakın bir sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmiştir. Isı geri kazanım sisteminin yer aldığı ısı odası olarak adlandırılan üniteden alınan sıcaklık

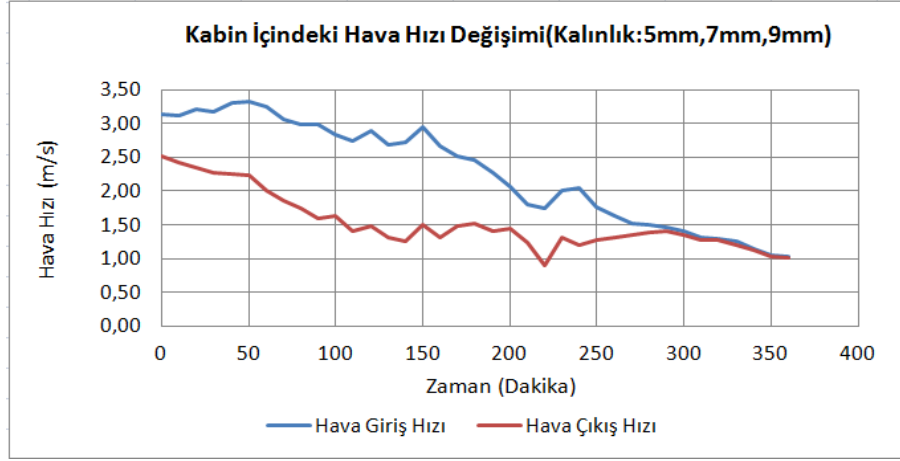
değerleri birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının farklı kalınlıklarda olması ve sistemin tam kapasite çalıştırılması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark önceki günlerde yapılan deneylere göre yaklaşık %16 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneyde ayrıca Ege Üniversitesi'nden ödünç olarak aldığımız 1 adet anemometre de kabin çıkış noktasına yerleştirilmiş ve tam kapasite çalışan bir sistemde giriş ve çıkış noktalarındaki hava hızı değerleri arasındaki fark belirlenmiştir. Kurutma işlemi 6 saat 30 dakika sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 3097.5 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi 5.84 $\text{gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden 0.11 $\text{gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 7 mm kalınlığındaki elma dilimi 5.17 $\text{gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden 0.14 $\text{gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 9 mm kalınlığındaki elma dilimi 6.24 $\text{gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden 0.18 $\text{gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Rafların tamamının doldurulması kurutma süresini uzatmamış sadece özgül nem alma hızının (SMER) yükselmesine neden olmuştur. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.59'da, bağıl nem değerleri Şekil 5.60'da, kabin giriş ve çıkışındaki hava hızı değerleri Şekil 5.61'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.62'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.63'de verilen grafikte gösterilmiştir.



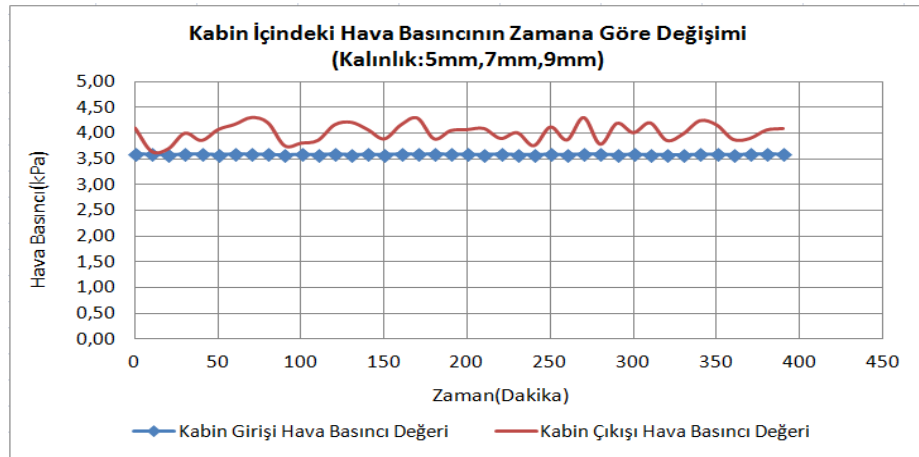
Şekil 5.59 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



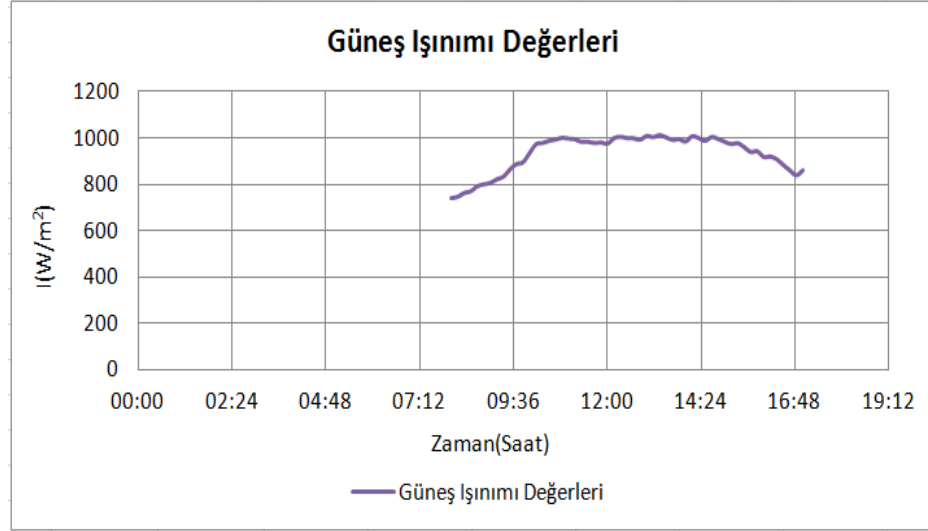
Şekil 5.60 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.61 Kabin girişi ve çıkışındaki hava hızının zamana göre değişimi

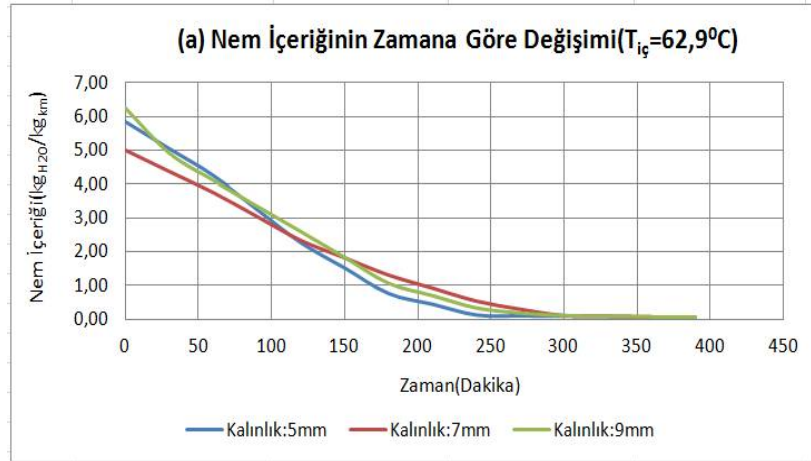


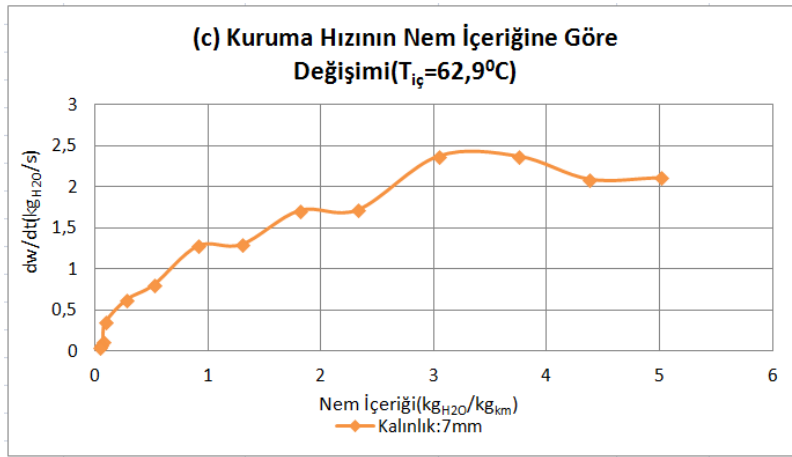
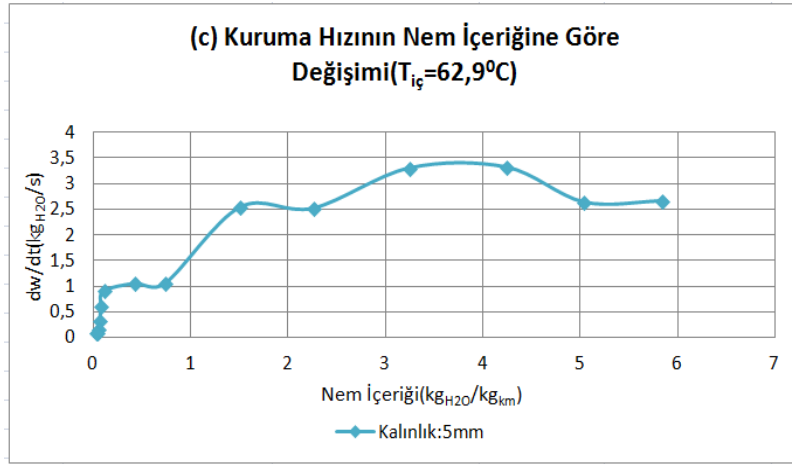
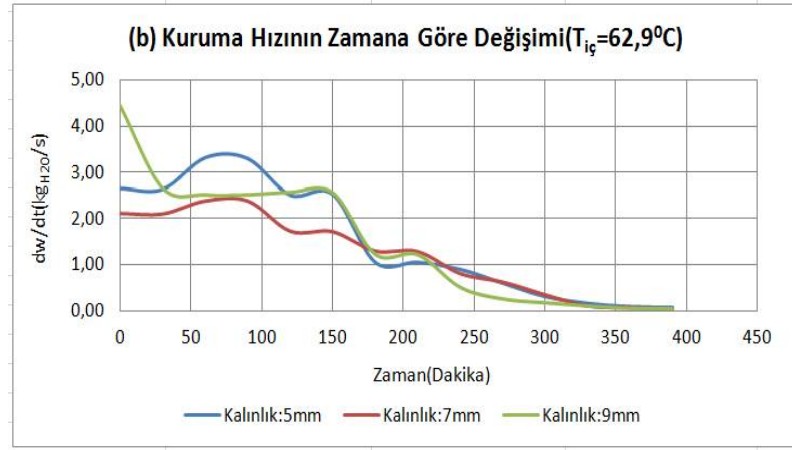
Şekil 5.62 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi

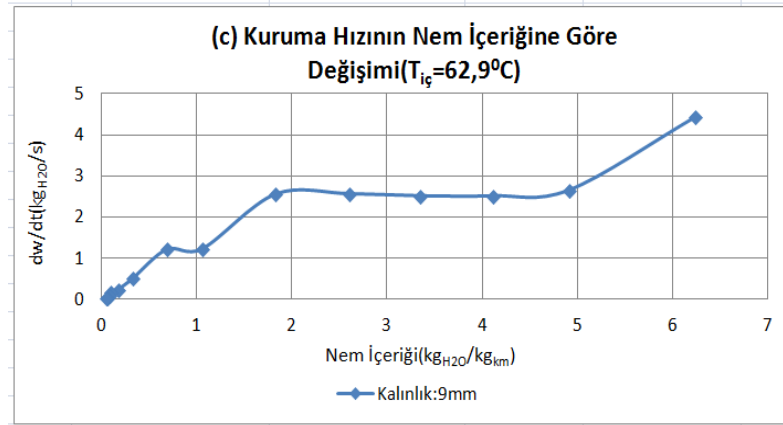


Şekil 5.63 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Bu deney çalışmasında sistem tam kapasite çalıştırılarak farklı kalınlıklardaki (5mm,7mm,9mm) elma dilimlerinin kuruma davranışları incelenmiş olup Şekil 5.64'de her üç kalınlık değerine sahip elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



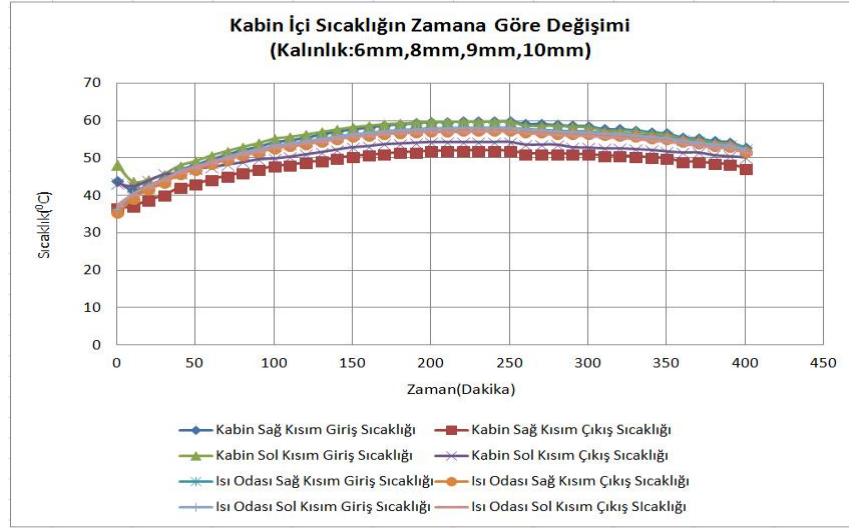




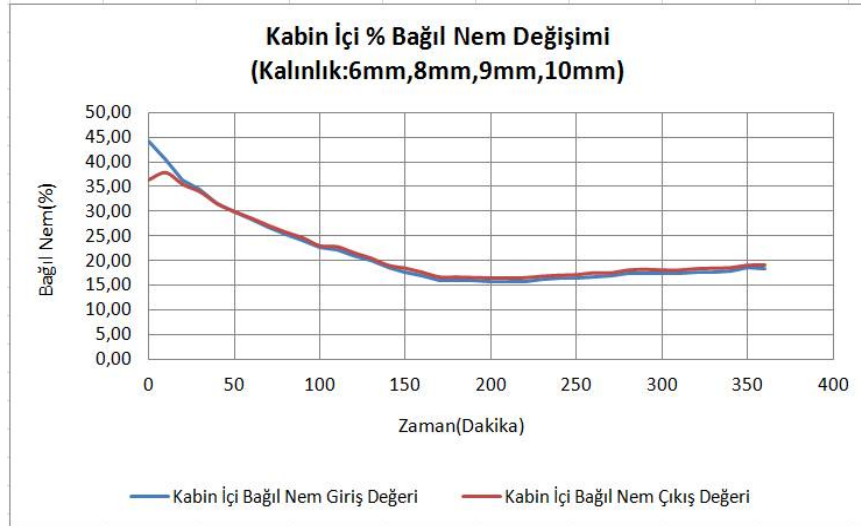
Şekil 5.64 Farklı kalınlıklardaki(5mm,7mm,9mm) elma dilimleri için kuruma periyodları

5.2.11 11.Kurutma Deneyi Sonuçları:

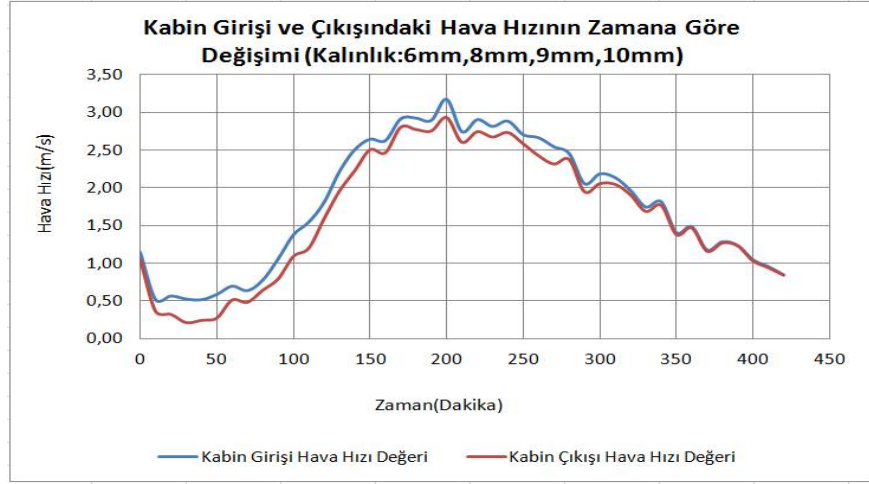
Onbirinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin yine sadece 4 rafı kullanılmış olup diğer yapılan kurutma deneylerinden farklı olarak toplamda 7200 gr. golden cinsi elma 1 rafta 6mm, 1 rafta 8mm, 1 rafta 9mm ve 1 rafta 10 mm kalınlıkta olacak şekilde farklı kalınlıklarda dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deney süresince sürekli değişen güneş ışınlamı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık 59.8⁰C'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının farklı kalınlıklarda olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark önceki günlerde yapılan deneylerle benzer sonuçlar vermiştir. Bu deneyde kurutma işlemi 7 saat sonra tamamlanmış olup elma dilimlerinin farklı kalınlıklarda olması kurutma süresinin 30 dakika kadar uzamasına neden olmuş ve kurutma işlemi sonrasında elmaların toplam ağırlığı 735.50 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 6 mm kalınlığındaki elma dilimi 4.43 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğinden 0.08 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğine kadar, 8 mm kalınlığındaki elma dilimi 5.29 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğinden 0.13 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğine kadar, 9 mm kalınlığındaki elma dilimi 4.75 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğinden 0.09 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğine kadar, 10 mm kalınlığındaki elma dilimi 5.19 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğinden 0.12 gr_{H2O}/gr_{km} nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.65'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.66'da, kabin girişi ve çıkışındaki hava hızı değerleri Şekil 5.67'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.68'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.69'da verilen grafikte gösterilmiştir.



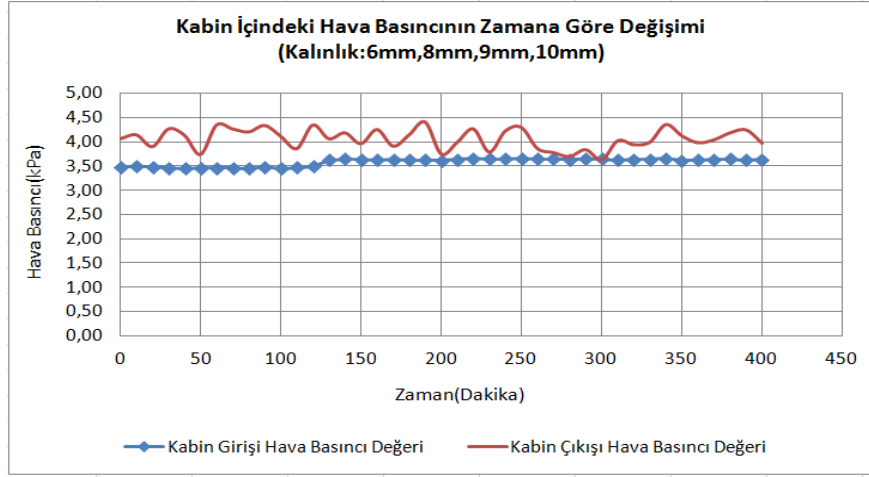
Şekil 5.65 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



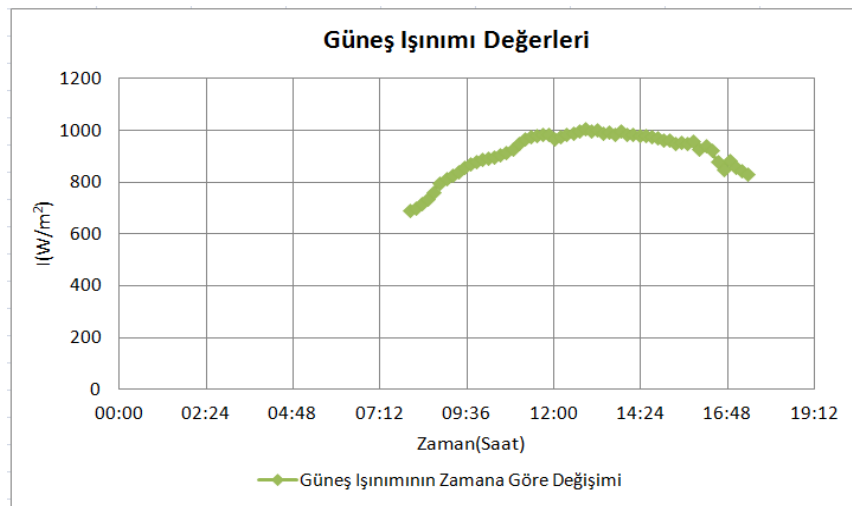
Şekil 5.66 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.67 Kabin girişi ve çıkışındaki hava hızının zamana göre değişimi

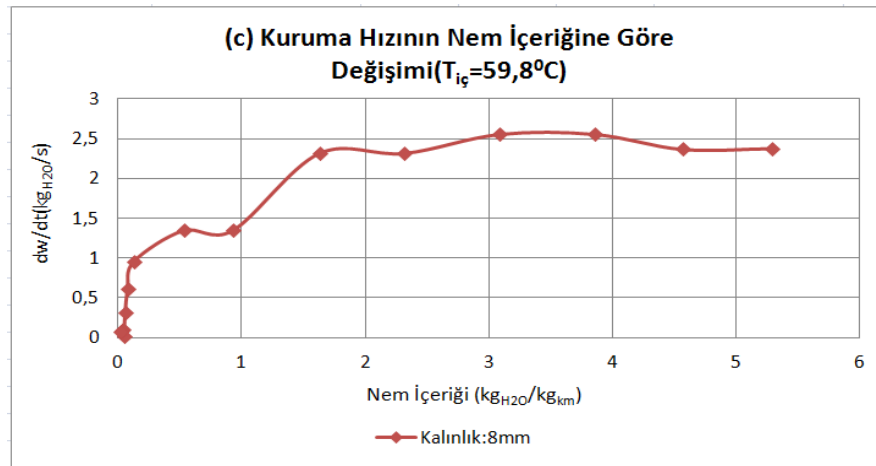
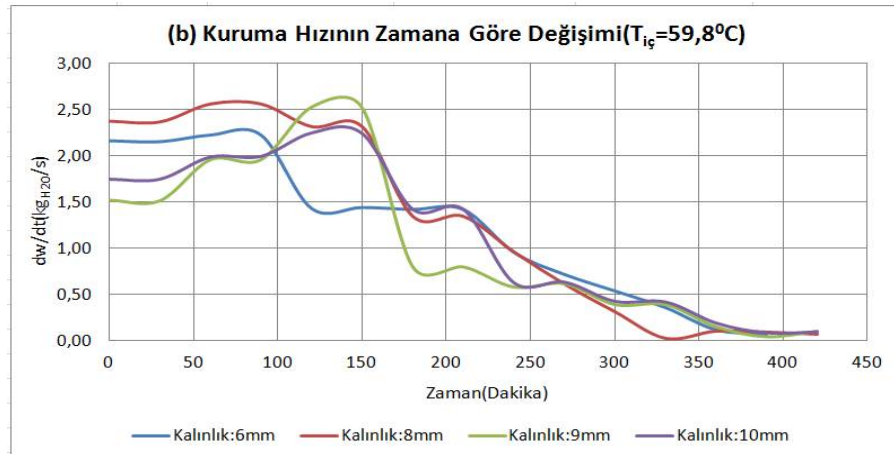
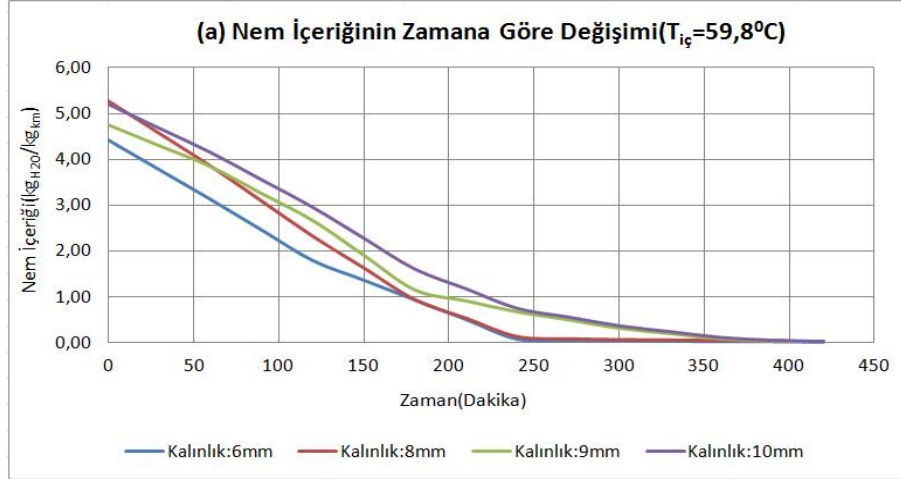


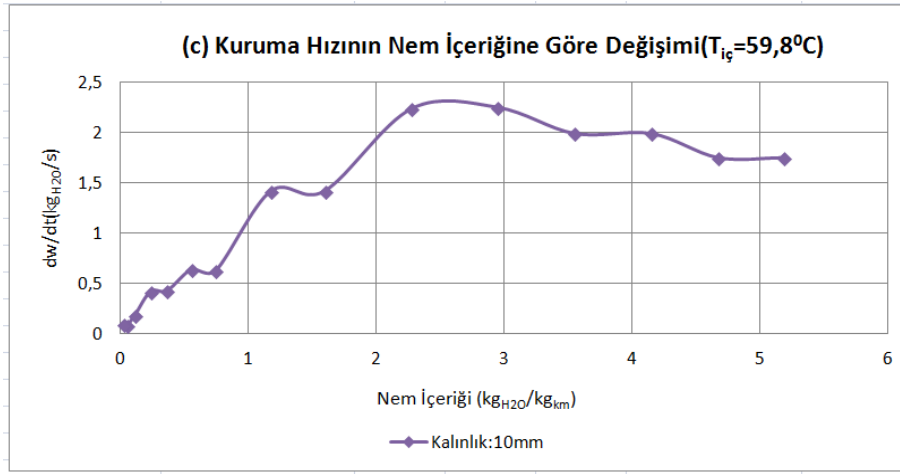
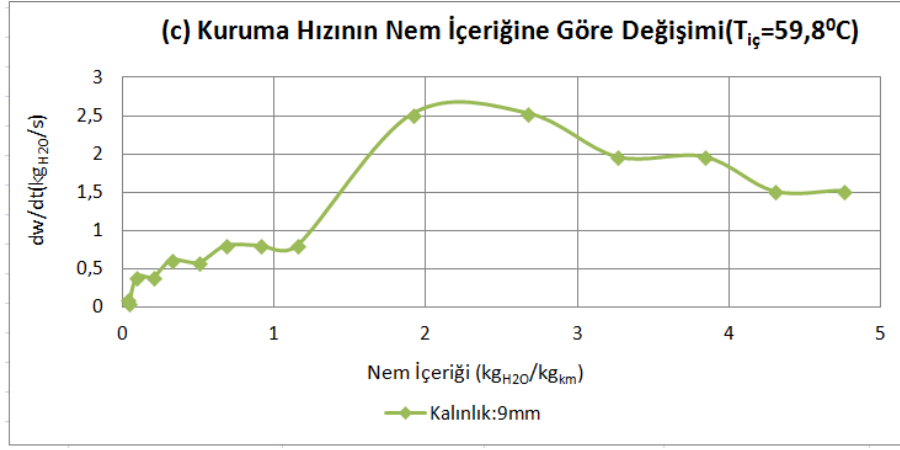
Şekil 5.68 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.69 Gün içinde alınan güneş ışıınının zamana göre değişimi

Bu deney çalışmasında kullanılan 4 rafın her birinde farklı kalınlıklardaki (6mm,8mm,9mm,10mm) elma dilimlerinin kuruma davranışları incelenmiş olup Şekil 5.70'de her dört kalınlık değerine sahip elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.



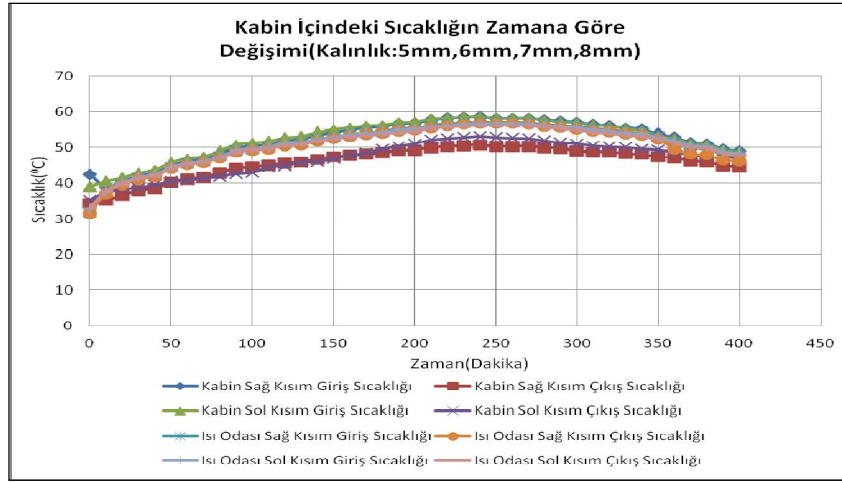


Şekil 5.70 Farklı kalınlıklardaki (6mm, 8mm, 9mm, 10mm) elma dilimleri için kuruma periyodları

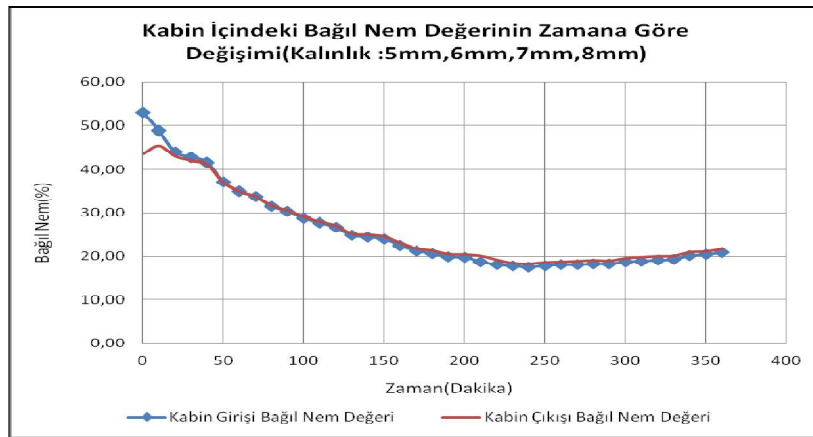
5.2.12 12. Kurutma Deneyi Sonuçları:

Onikinci gün gerçekleştirilen deneylerde kabinin yine sadece 4 rafı kullanılmış olup diğer yapılan kurutma deneylerinden farklı olarak toplamda 7100 gr. golden cinsi elma 1 rafta 5mm, 1 rafta 6mm, 1 rafta 7mm ve 1 rafta 8mm kalınlıkta olacak şekilde farklı kalınlıklarda dilimlenerek kurutulmuştur. Bu deney süresince sürekli değişen güneş ışınlamı verilerinden dolayı kurutma kabini içindeki sıcaklık 58.6°C 'ye kadar ulaşmış ve kabinin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerleri yine birbirlerine yakın bir şekilde seyretilmiştir. Benzer şekilde kurutma kabini içerisindeki ürün miktarının farklı kalınlıklarda olması sebebiyle kabin giriş ve çıkışındaki bağıl nem değerleri arasındaki fark önceki günlerde yapılan deneylerle benzer sonuçlar vermiştir. Bu deneyde de bir önceki deneyde olduğu gibi farklı kalınlıklardaki elma dilimlerinin kurutulmasından dolayı kurutma işlemi 7 saat sonra tamamlanmış olup kurutma işlemi sonrasında

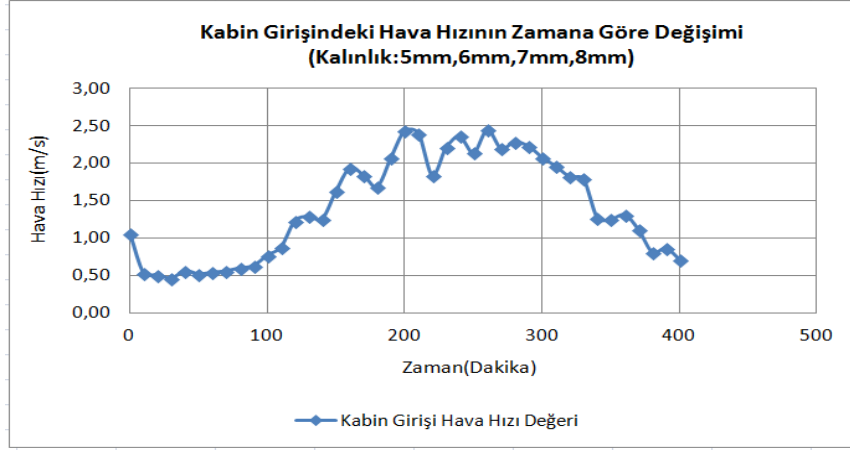
elmaların toplam ağırlığı 714,99 gr olarak ölçülmüştür. Bu deney sırasında ölçülen ağırlık değişimlerine göre 5 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.88 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.09 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 6 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.38 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.08 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 7 mm kalınlığındaki elma dilimi $5.07 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.07 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar, 8 mm kalınlığındaki elma dilimi $4.90 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğinden $0.09 \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{gr}_{\text{km}}$ nem içeriğine kadar düşmüştür. Bu deney sırasında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.71'de, bağıl nem değerleri Şekil 5.72'de, kabin girişindeki hava hızı değerleri Şekil 5.73'de, kabin içinde değişen hava basıncı değerleri Şekil 5.74'de ve piranometre ile ölçülen güneş enerjisi verileri Şekil 5.75'de verilen grafikte gösterilmiştir.



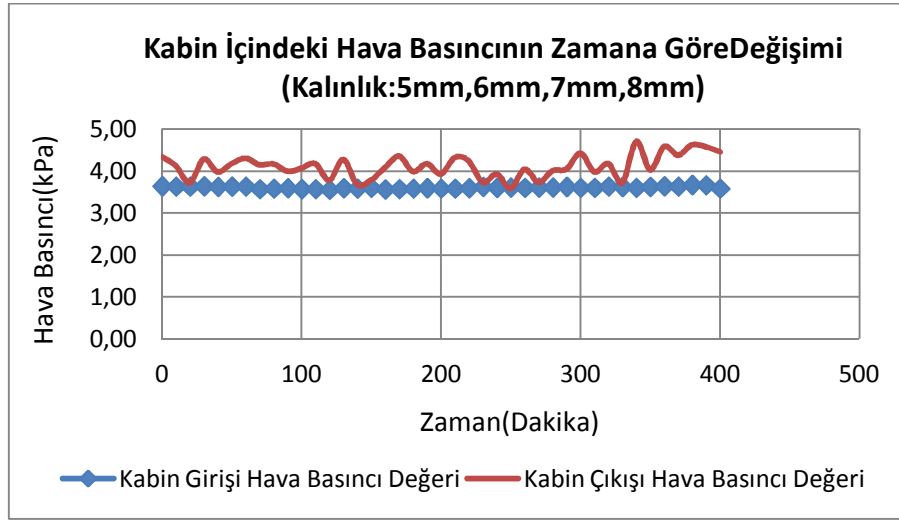
Şekil 5.71 Kurutma sisteminin farklı noktalarından alınan sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi



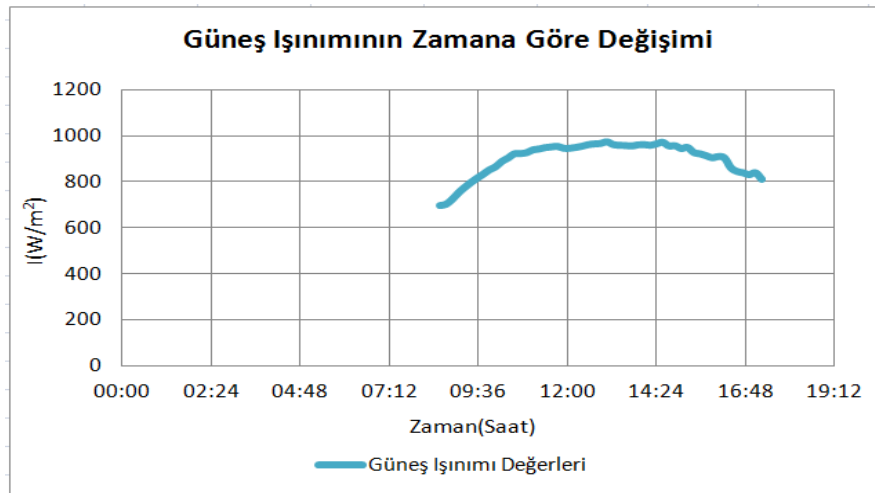
Şekil 5.72 Kurutma kabini giriş ve çıkışındaki bağıl nem(%) değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.73 Kabin girişi ve çıkışındaki hava hızının zamana göre değişimi

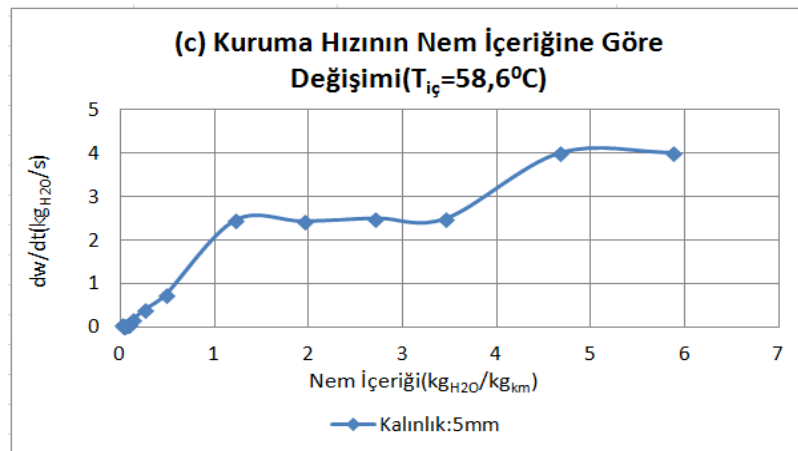
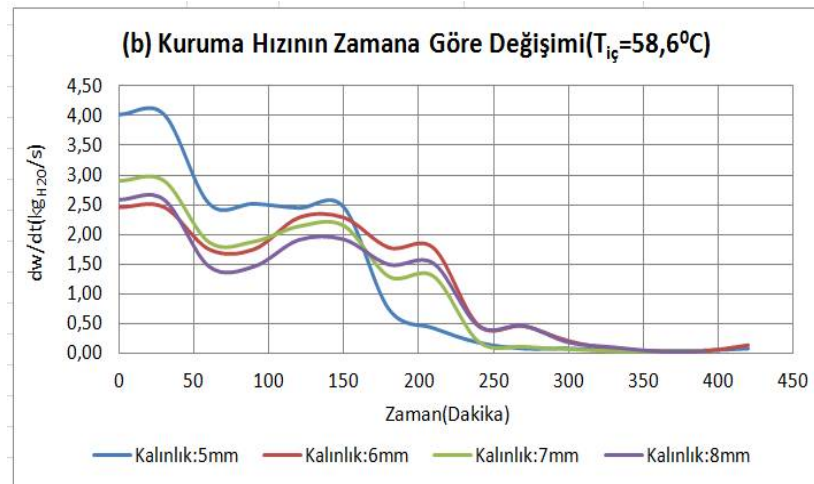
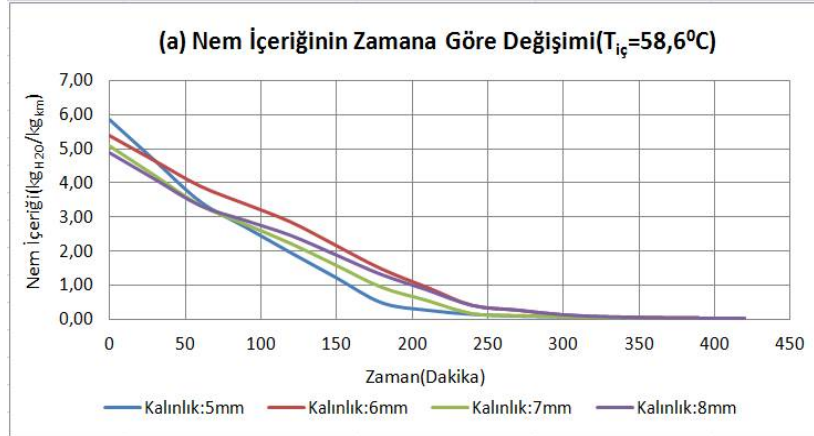


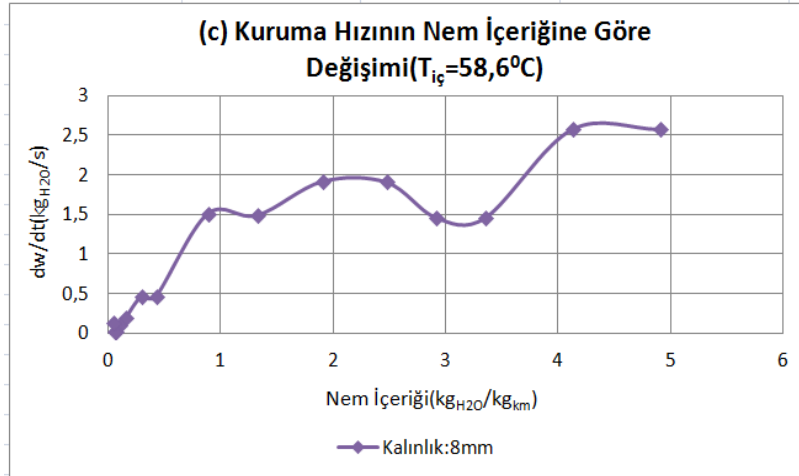
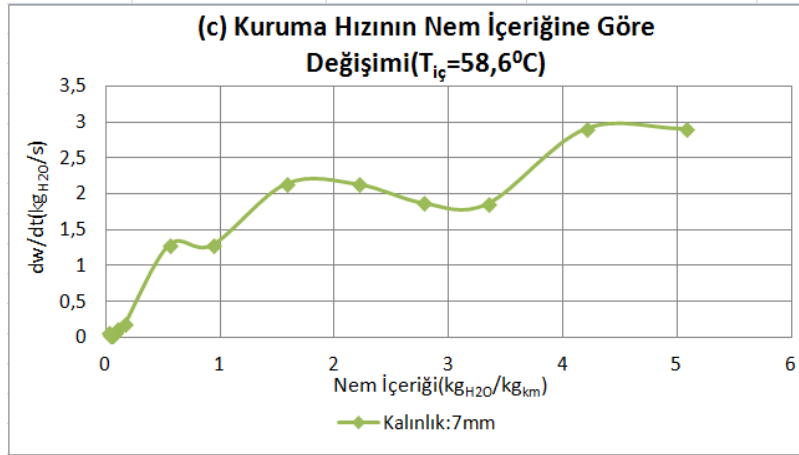
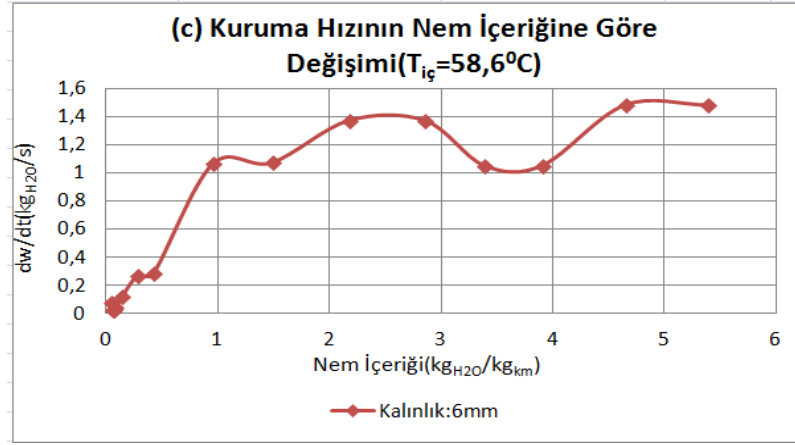
Şekil 5.74 Kabin içindeki hava basıncı değerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.75 Gün içinde alınan güneş ışınımının zamana göre değişimi

Bu deney çalışmasında kullanılan 4 rafın her birinde farklı kalınlıklardaki (5mm,6mm,7mm,8mm) elma dilimlerinin kuruma davranışları incelenmiş olup Şekil 5.76'da her dört kalınlık değerine sahip elma dilimlerinin kuruma periyodu ile ilgili nem içeriği ve kuruma hızının(dw/dt) hem zamana hem de birbirlerine göre değişimi sırasıyla (a),(b) ve (c) grafiği üzerinde gösterilmiştir.

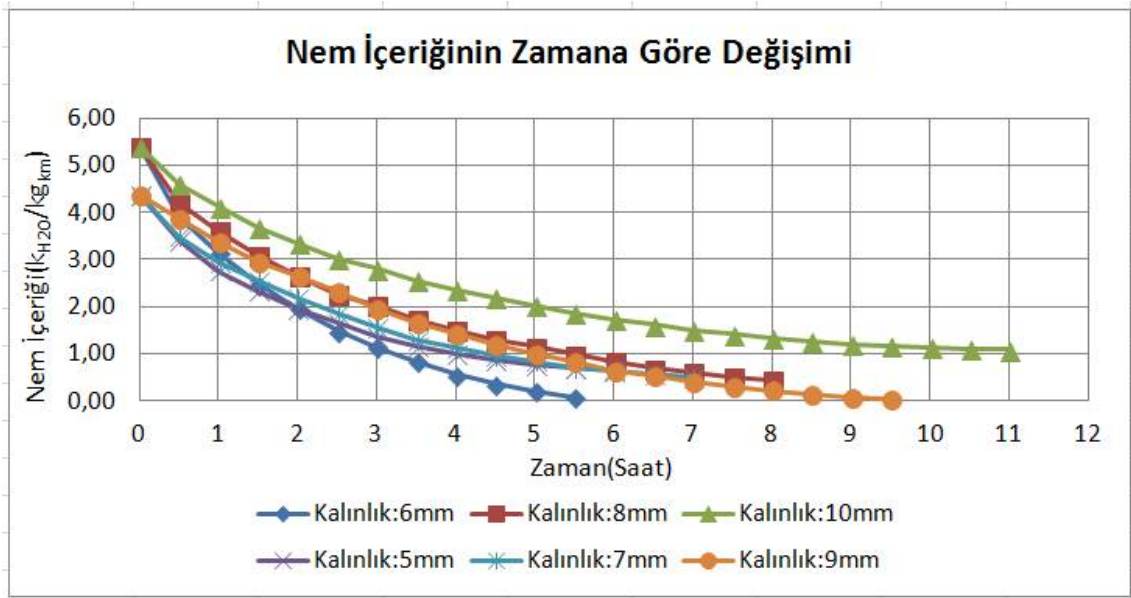




Şekil 5.76 Farklı kalınlıklardaki (5mm, 6mm, 7mm, 8mm) elma dilimleri için kuruma periyodları

5.3 Ürün Kalınlığının Kurutma Sürecine Etkisi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerin bazılarında elma dilimleri 5-10 mm(5mm,6mm,7mm,8mm,9mm,10mm) arasında değişen kalınlıklarda kesilerek kurutulmuştur. Şekil 5.77'de farklı kalınlardaki elma dilimleri için nem içeriğinin zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.77 Farklı kalınlıklarındaki elma dilimleri için nem içeriğinin zamana göre değişimi

Kurutma sıcaklığının artması nem oranındaki hızlandırmayı azaltmaktadır. Nem oranı (MR) aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir:

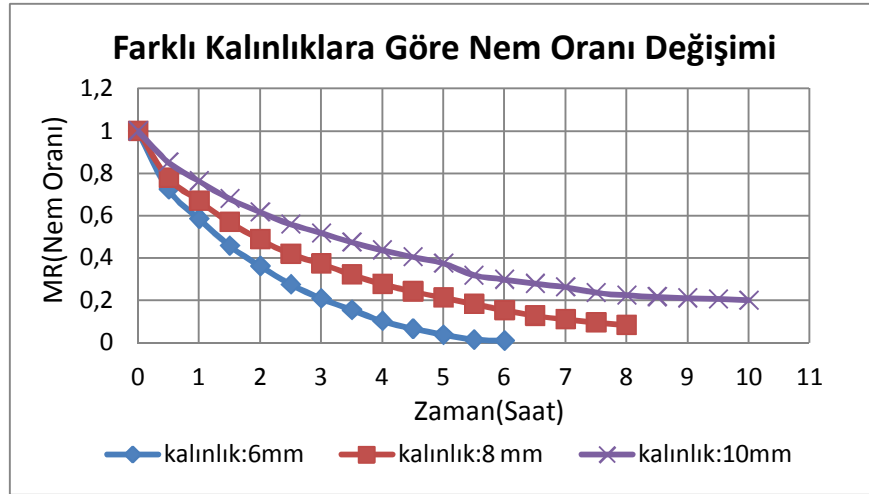
$$MR = \left(\frac{M_{d,i} - M_e}{M_{d,o} - M_e} \right) \quad (5.1)$$

M_e : Denge nem içeriği olup $M_{d,i}$ (ölçüm anındaki nem değeri) ve $M_{d,o}$ (ilk nem değeri) değerlerine göre ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere sahiptir[54]. Bu durumda MR değeri;

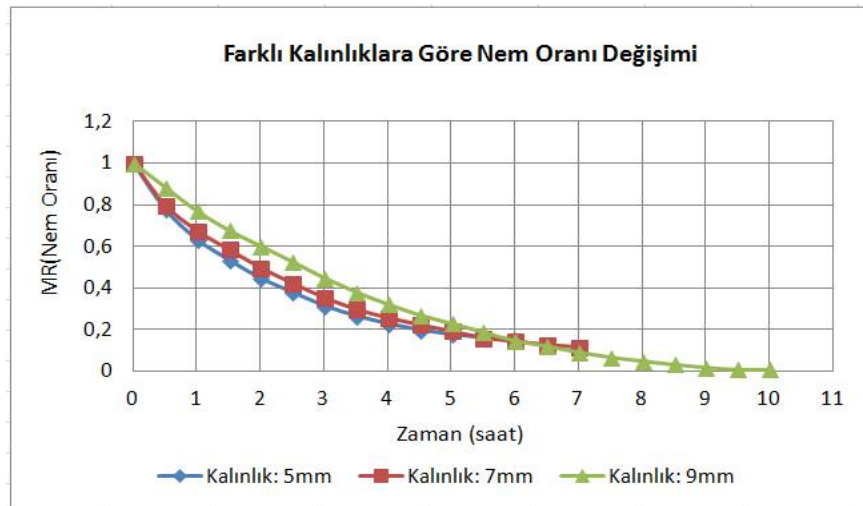
$$MR = \frac{M_{d,i}}{M_{d,o}} \quad (5.2)$$

kurutulacak ürünün boyutları, kuruma süresini belirlemede etkili bir başka parametredir. Farklı kalınlıklara sahip elma dilimlerinin kurutulduğu deneylerde nem oranı ve nem içeriği, ürünün kalınlığı ile orantılı olarak değişmektedir. Şekil 5.78 ve

Şekil 5.79'da ise farklı kalınlardaki elma dilimlerine ait nem oranlarının zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.78 6mm, 8mm ve 10mm kalınlıklarındaki elma dilimleri için nem oranının zamana göre değişimi

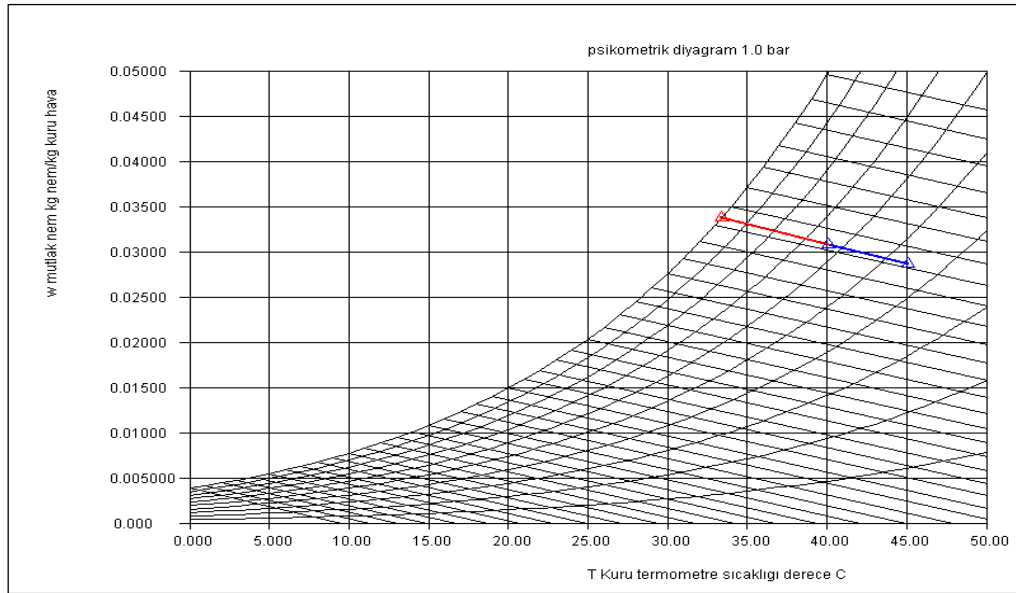


Şekil 5.79 5mm, 7mm ve 9mm kalınlıklarındaki elma dilimleri için nem oranının zamana göre değişimi

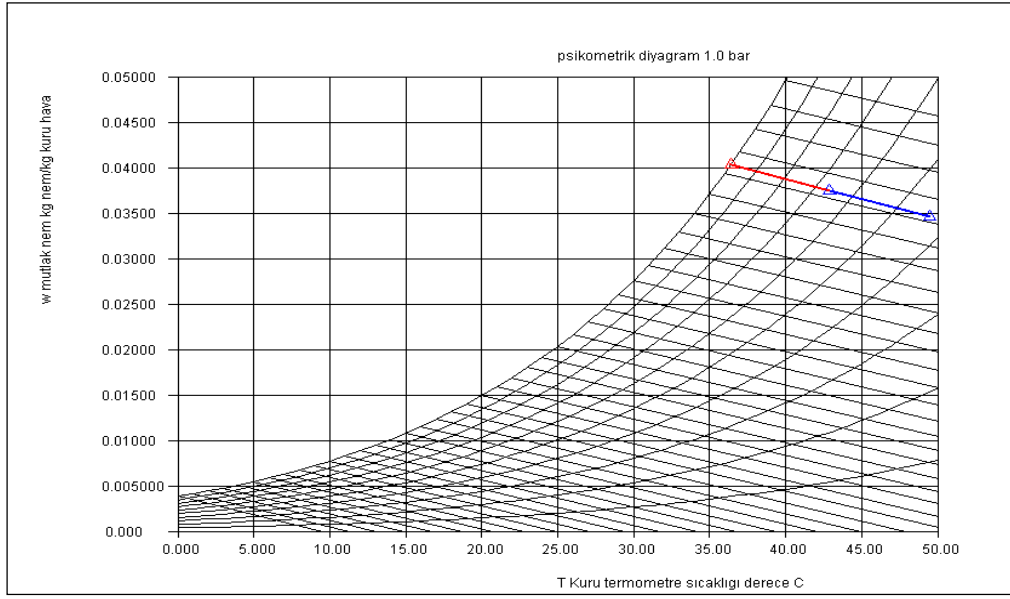
5.4 Kurutma Deneyi Sonuçlarının Isıl Analizi

Deneyisel çalışmalar sırasında, kurutma havası ile ilgili ısı analizleri yapabilmek için kurutma kabini üzerine yerleştirilen sıcaklık, bağıl nem, hava hızı ve basınç sensörleri ile yapılan ölçümlerden alınan veriler kullanılmıştır. Elde edilen veriler, geliştirilen veritabanı programı ile datalogger yardımıyla veritabanına oradan da bilgisayar ortamına işlenmiş ve bu sayede her 10 dakikada bir veri alma işlemi gerçekleştirilmiştir.

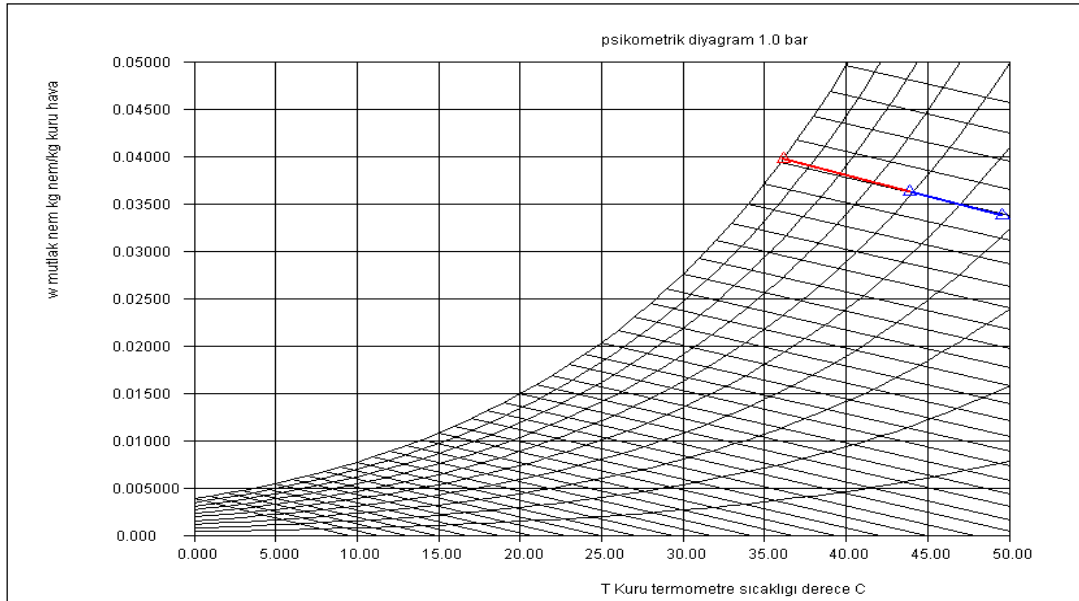
Ayrıca her bir raftan belirlenen numuneler kurutma süresince 30 dakika arayla tartılmış bu sayede ürün üzerindeki nem değişimleri belirlenmiştir. Kurutma işlemi boyunca, kabin içerisindeki sıcaklık değişimleri gözönüne alınarak, yaş hava proseslerinden biri olan adyabatik nemlendirme(soğutma) prosesinin gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bu prosese yönelik ölçüm noktalarından alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri ile oluşturulan psikrometrik diyagramlar, 5mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 1. kurutma deneyi, 6mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 5. kurutma deneyi, farklı kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 9. kurutma deneyi ve sistemin tam kapasite çalıştırıldığı 10.kurutma deneyi için sırasıyla Şekil 5.80, Şekil 5.81, Şekil 5.82 ve Şekil 5.83'te gösterilmiştir.



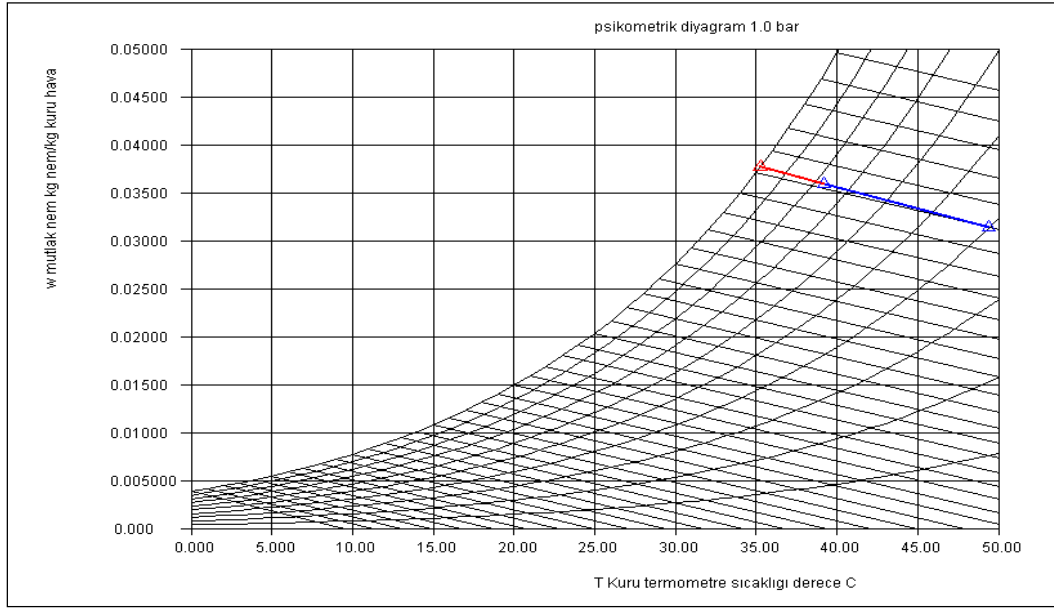
Şekil 5.80 5mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 1. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi



Şekil 5.81 6 mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 5. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi



Şekil 5.82 Farklı kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulduğu 9. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösterilişi



Şekil 5.83 Kurutma sisteminin tam kapasite çalıştırıldığı 10. kurutma deneyi için kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagram üzerinde gösteriliş

Elma dilimlerinin kurutulmasına yönelik gerçekleştirilen deneylerin her birinde kurutma öncesi ve kurutma sonrası toplam ürün ağırlıkları ölçülerek üründen uzaklaşan toplam nem(su) miktarı belirlenmiştir. Ayrıca düzenek üzerine yerleştirilen elektrik sayacı ile fanların kaç KWh elektrik tükettikleri hesaplanmıştır. Belirlenen değerlerden yola çıkılarak her bir deney için kurutulan elmaların özgül nem alma hızı(SMER)ve nem alma verimleri(hızı)(MER) hesaplanmış ve Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Yapılan kurutma deneylerinde farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için özgül nem alma hızlarının ve nem alma verimlerinin karşılaştırılması

Deney No	Kurutulan Elma Miktarı(gr)	Harcanan Enerji Miktarı (KW)	Buharlaşan Nem Miktarı(gr)	SMER (kg _w /kWh)	MER (kg _w /h)	Kabin Giriş Sıcaklığı (°C)	Kurutma Süresi (Saat)
1	5800	9.15	5283.36	0.577	0.88	56.5	6
2	6500	8.05	5885.55	0.731	0.98	56.5	6
3	6200	7.7	5543.56	0.720	1.11	58.0	5
4	6100	7.58	5514.40	0.727	0.92	60.0	6
5	7000	7.65	6293.81	0.823	0.97	55.0	6.5
6	7300	7.62	6498.34	0.853	1.08	59.0	6
7	6900	7.58	6220.48	0.821	1.04	58.3	6
8	7100	7.6	6347.94	0.835	1.06	58.4	6
9	7300	7.59	6467.30	0.852	0.99	58.5	6.5
10	30000	10.75	26902.50	2.502	4.14	62.9	6.5
11	7200	7.71	6464.50	0.838	0.92	59.8	7
12	7100	7.69	6385.01	0.830	0.91	58.6	7

Çizelgede, mavi ile gösterilen deneyler farklı kalınlıklardaki elma dilimlerinin kurutulduğu deneyler , kırmızı ile gösterilen deney ise sistemin tam kapasite halinde çalıştırıldığı deney olarak ifade edilmiştir. Yapılan 11 kurutma deneyinde sistem üzerinde genellikle 5-7,5 kg arasında değişen miktarlarda elma kurutulmuş olup SMER

ve MER değerlerinin her ikisinin de bu deneyler için yaklaşık sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. SMER ve MER değerlerini belirleyen en önemli faktörlerden biri kurutulan elma dilimlerinin miktarıdır. Bu yüzden sistemin tam kapasite olarak çalıştırıldığı 10. kurutma deneyinde ise SMER ve MER değeri diğer 11 deneyden çok daha yüksek çıkmıştır.

5.5 Kurutma Modelinin Oluşturulması

Pek çok araştırmacı kurutacağı ürünün kuruma zamanını önceden tahmin edebilmek adına kurutmanın matematiksel modellenmesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu modellerin bazı ürünlere uygulanması deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır [55,56]. Bu çalışmada, "Approximation of diffusion" kuruma modeli sabit sıcaklıkta ve tek sıra elma kurutulması için "Nelder-Mead En Küçük Kareler Metodu" kullanılarak Ek A'da verilen deneysel verilerden yola çıkılarak polinom denklemleri oluşturulmuştur.[57]. Boyutsuz nem oranı (MR), $(M_{d,i} - M_e / M_{d,o} - M_e)$ yerine sadeleştirilerek $(M_{d,i} / M_{d,o})$ şeklinde alınmıştır[56,58].

Difüzyon yaklaşımı (Approximation of diffusion) kurutma modeli kullanılarak deney verileri ve nem oranının(MR) önceden tahmin edilen değerleri hesaplanabilmektedir. 5mm ve 6mm kalınlığa sahip elma dilimleri için sistem üzerindeki kaçaklar giderildikten sonra yapılan üç deneye(4, 5 ve 6. kurutma deneyi) ilişkin belirlenen katsayılar birbirine yakın değerlerde bulunmuş ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. 1. deneye ilişkin belirlenen polinom denklemi MR_1 , 2. deneye ilişkin polinom denklemi MR_2 , 3. deneye ilişkin polinom denklemi ise MR_3 olarak adlandırılmıştır.

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$$

$$MR_1 = 12.887 \exp(-0.479 t) + (1 - 12.887) \exp(-0.479 * 1.022 * t)$$

$$MR_2 = 15.4203 \exp(-0.723 t) + (1 - 15.4203) \exp(-0.723 * 1.038 * t)$$

$$MR_3 = 17.672 \exp(-0.649 t) + (1 - 17.672) \exp(-0.649 * 1.035 * t)$$

Elde edilen bu sonuçlar istatistiksel değerlendirmeleri ve polinom denklemleriyle Şekil 5.84, Şekil 5.85 ve Şekil 5.86'da verilmiştir.

```

optimizasyon değeri :
12.887574982325265
0.471941916360301
1.022778114622548

original fonksiyon değeri = 1.6034098465480997
fonksiyon değeri = 0.0010510101266718258
standart sapma= 0.005918924808532447

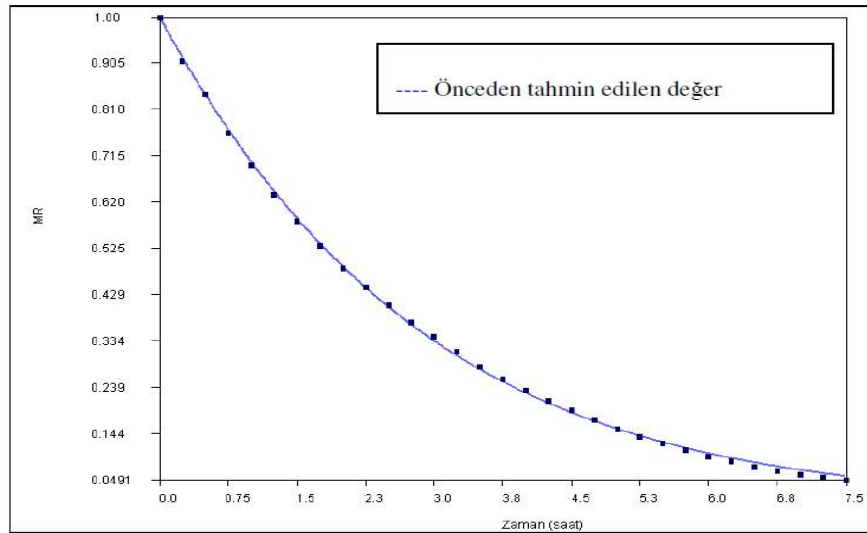
```

$$a=12.887574982325265$$

$$k=0.471941916360301$$

$$b=1.022778114622548$$

$$MR_1 = 12.887 \exp(-0.479 t) + (1 - 12.887) \exp(-0.479 * 1.022 * t)$$



Şekil 5.84 5mm kalınlıktaki elma dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı ve deneysel verilerin karşılaştırılması (4. kurutma deneyi)

```

optimizasyon değeri :
15.420344645341913
0.723119952983132
1.038247723898574

original fonksiyon değeri = 0.952470409933882
fonksiyon değeri = 8.152350292969647E-4
standart sapma= 0.00608737527143814

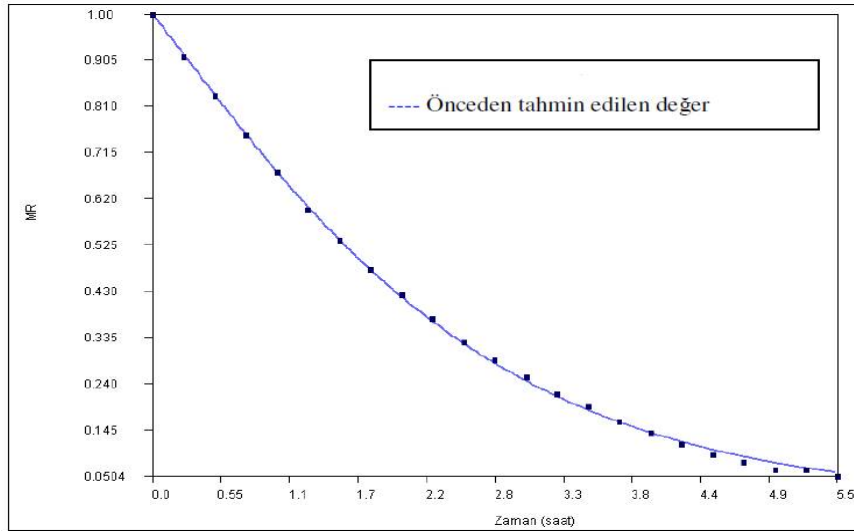
```

$$a=15.420344645341913$$

$$k=0.723119952983132$$

$$b=1.038247723898574$$

$$MR_2 = 15.4203 \exp(-0.723 t) + (1 - 15.4203) \exp(-0.723 * 1.038 * t)$$



Şekil 5.85 6mm kalınlıktaki elma dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı ve deneysel verilerin karşılaştırılması (5. kurutma deneyi)

```

optimizasyon değeri :
    17.672072310168204
    0.649006405048182
    1.035241618469866

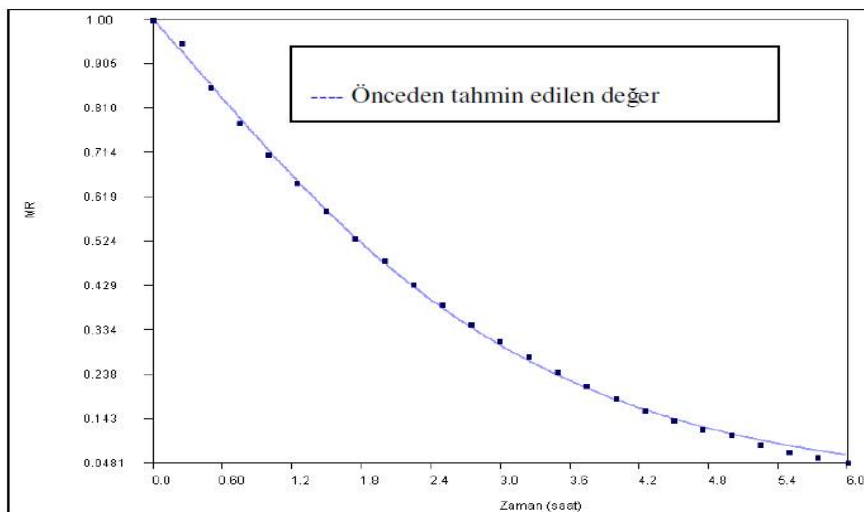
orijinal fonksiyon değeri = 1.3966846020612789
fonksiyon değeri = 0.0017858754142895525
standart sapma= 0.008626208645482558
  
```

$a=17.672072310168204$

$k=0.649006405048182$

$b=1.035241618469866$

$$MR_3 = 17.672 \exp(-0.649 t) + (1 - 17.672) \exp(-0.649 * 1.035 * t)$$



Şekil 5.86 6mm kalınlıktaki elma dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı ve deneysel verilerin karşılaştırılması (6. kurutma deneyi)

Ayrıca, farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için deney verilerinin kurutma modellerine uygunluğunu araştırmak için "Handerson and Pabis" kurutma modeli kullanılmıştır[55,56]. Nem oranı(MR), elma dilimi kalınlığının ve kurutma zamanının bir fonksiyonu olarak optimize edilmiş olup son iki kurutma deneyinde(11 ve 12. kurutma deneyi) elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı kalınlıktaki elma dilimleri için kurutma modeli oluşturulmuştur[57].

$$MR = a \exp(-kt)$$

$$a = a_1 + a_2 h + a_3 h^2$$

$$a_0 = k$$

h:Kalınlık

Son iki kurutma deneyi verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar istatistiksel değerlendirmeleri ve polinom denklemleri Şekil 5.87 ve Şekil 5.88'de gösterilmiştir.

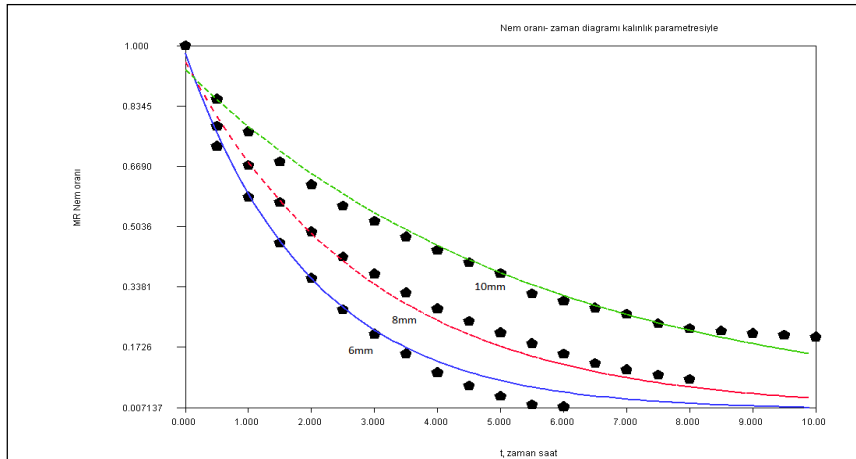
```

optimizasyon değeri :
    1.042091116151912
   -0.010870762417766
    0.970328445341747
   -0.078909680977401

orijinal fonksiyon değeri = 207.28153930147917
fonksiyon değeri = 0.03801609797905906standart sapma= 0.027573936236619922

```

$$MR_1 = (-0.0108707624 + 0.970328 h - 0.07890968 h^2) \exp(-1.042091 kt)$$



Şekil 5.87 6mm,8mm ve 10mm kalınlığa sahip elma dilimleri için yapılan kurutma deneyi sonuçlarının önceden tahmin edilen nem oranı değerleri ile karşılaştırılması(11.kurutma deneyi verileri kullanılmıştır.)

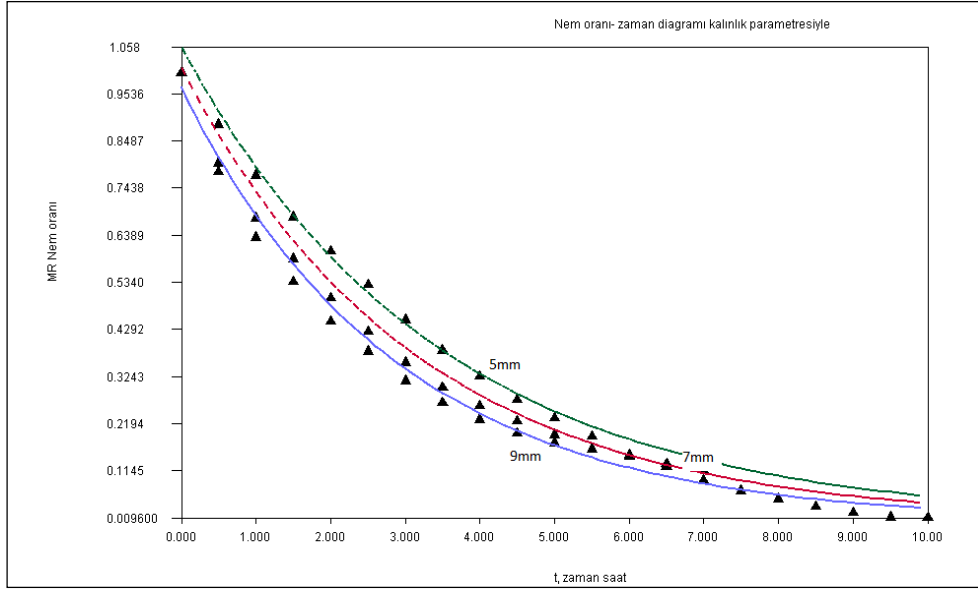
```

optimizasyon değeri :
    0.826423401112900
    0.023206012177788
    0.429009130975916
    -0.013752518748369

orijinal fonksiyon değeri = 161.7129113768541
fonksiyon değeri = 0.03182222422417243 standart sapma= 0.025748067979370005

```

$$MR_2 = (0.023206 + 0.4290091 h - 0.0137525 h^2) \exp(-0.8264234 kt)$$



Şekil 5.88 5mm,7mm ve 9mm kalınlığa sahip elma dilimleri için yapılan kurutma deneyi sonuçlarının önceden tahmin edilen nem oranı değerleri ile karşılaştırılması
(12.kurutma deneyi verileri kullanılmıştır.)

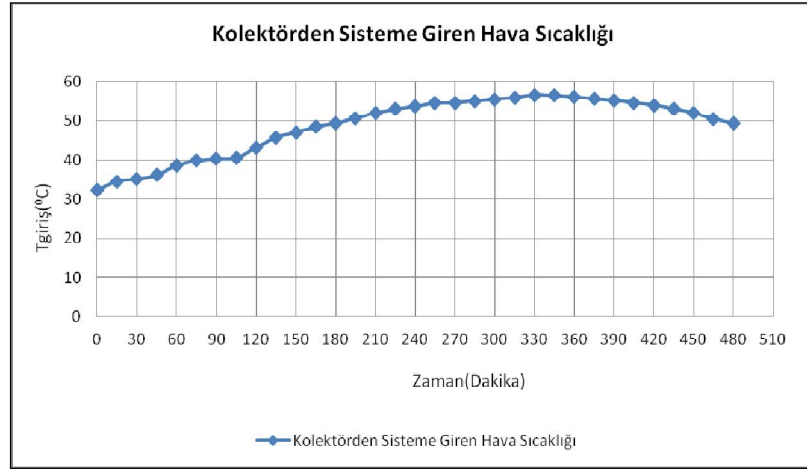
5.6 Çakıl Taşı Enerji Depolama Sistemi ile İlgili Deneysel Çalışmalar

Kurutma sistemi ile ilgili deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi esnasında çakıl taşı enerji depolama sisteminin montaj işlemleri tamamlanmış olup kurutma deneylerini takiben çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili deneysel çalışmalar başlatılmıştır. Bu deneylerde çakıl taşı enerji depolama sisteminin şarj süresi esnasında izolasyonlu çakıl taşı yatağı belirli noktalarına yerleştirilen termocouple'lar ile çakıl taşı yatağı içerisindeki sıcaklık değişimleri ölçülmüş ve bu sayede depolanan ısı enerji miktarı hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda çakıl taşı yatağının giriş ve çıkış noktaları arasına yerleştirilen fark basıncı sensörü ile çakıl taşı yatağı içerisindeki basınç düşümü

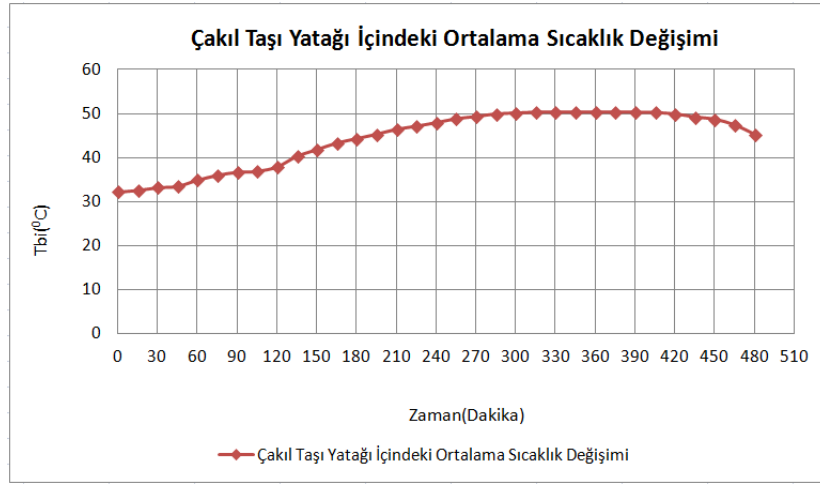
belirlenmiştir. Çakıl taşları yatağı arasındaki boşluk oranı(EPS) 0.57 ve yuvarlatma oranı(SP) 1.0 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır. Çakıl taşı enerji depolama sisteminde kullanılan çakıl taşı miktarı 1644.40 kg olup çakıl taşının yoğunluğu 1920 kg/m^3 ve özgül ısısı $835 \text{ J/kg}^0\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Yapılan deneylerde genellikle 08.00-17.00 saatleri arasındaki sürede çakıl taşı enerji depolama sisteminin şarj edilmesi sağlanmış ve saat 17.00'den sonra çakıl taşı enerji depolama sistemi ile kurutma sisteminin birbirine bağlantısını sağlayan klape açılarak deşarj işlemi başlatılmıştır. Bu işlem ile çakıl taşı yatağında depolanan ısı enerjinin kurutma sistemine aktarılması sağlanmış ve depolama sisteminin şarj işlemi öncesi sıcaklığına kadar düşmesi durumunda çakıl taşı yatağının enerjisinin tamamını kurutma sistemine aktardığı kabul edilmiş ve bu süre de deşarj süresi olarak belirlenmiştir. Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar daha önce gerçekleştirilen simülasyon çalışması ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

5.6.1 1. Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları:

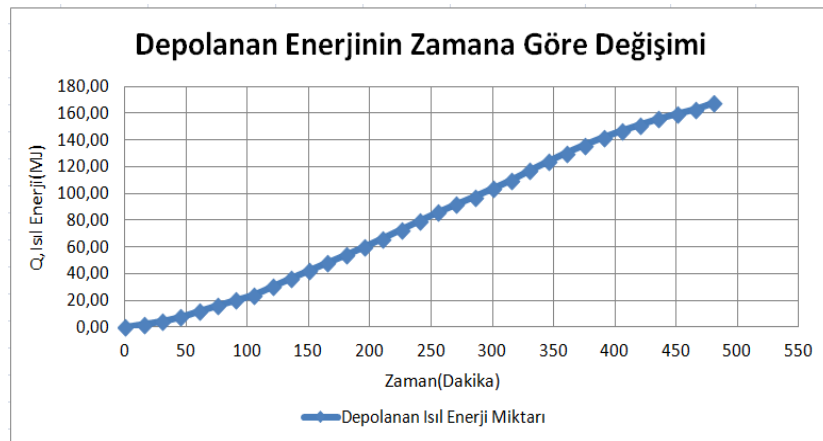
Çakıl taşı enerji depolama sistemi üzerinde yapılan ilk deneysel çalışmada çakıl taşı yatağı olarak adlandırılan sistem üzerindeki belirli noktalara yerleştirilen termocouple'lar ile çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık değişimleri belirlenerek depolanan ısı enerji miktarı hesaplanmıştır. Kurutma sisteminde olduğu gibi çakıl taşı enerji depolama sisteminde de hava kaçakları nedeniyle ilk gün kolektörlerden sisteme üflenen havanın sıcaklığı en fazla 56.6^0C olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkı ise genellikle sabit kalmıştır. Sistem içindeki ortalama sıcaklık 43.3^0C olarak belirlenmiştir. Sistemde depolanan ısı enerji miktarı 167.71 MJ olarak hesaplanmıştır. Şarj süresi boyunca, kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.89'da, çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.90'da, depolanan ısı enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 5.91'de, çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünün zamana göre değişimi Şekil 5.92'de, şarj süresi boyunca gelen güneş ışınımının zamana göre değişimi Şekil 5.93'de ve deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklık değişimi Şekil 5.94'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



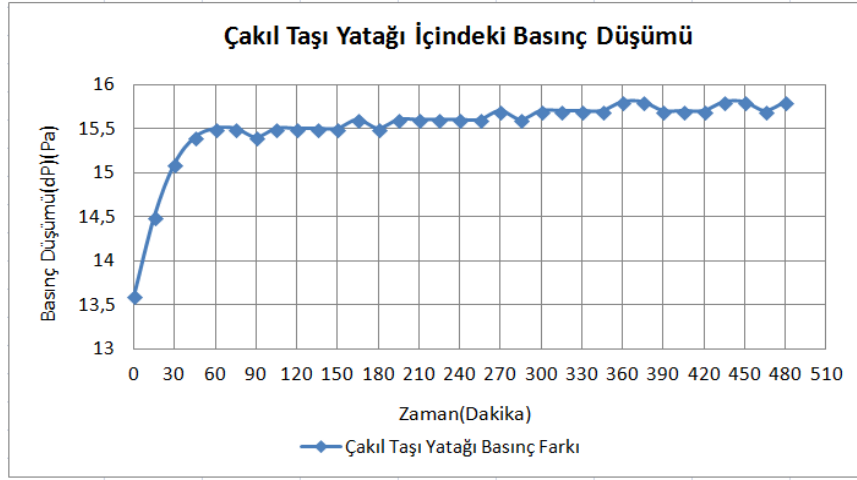
Şekil 5.89 Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi



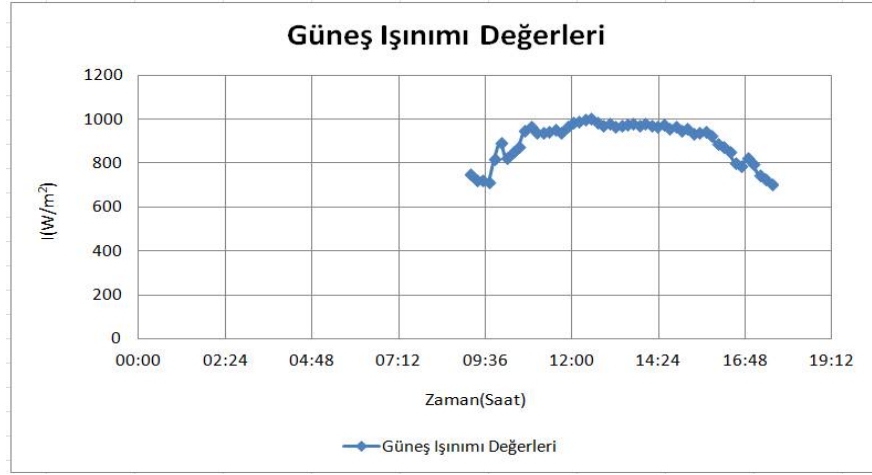
Şekil 5.90 Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi



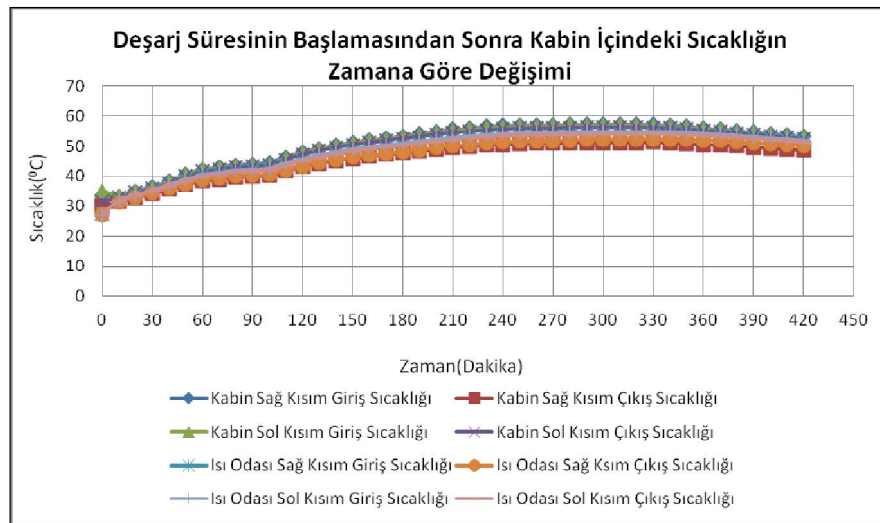
Şekil 5.91 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi



Şekil 5.92 Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi



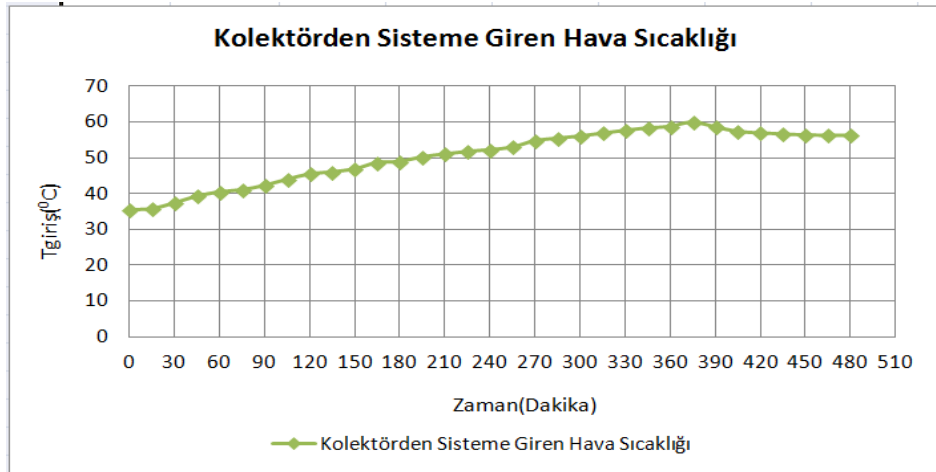
Şekil 5.93 Şarj süresi boyunca güneş ışımının zamana göre değişimi



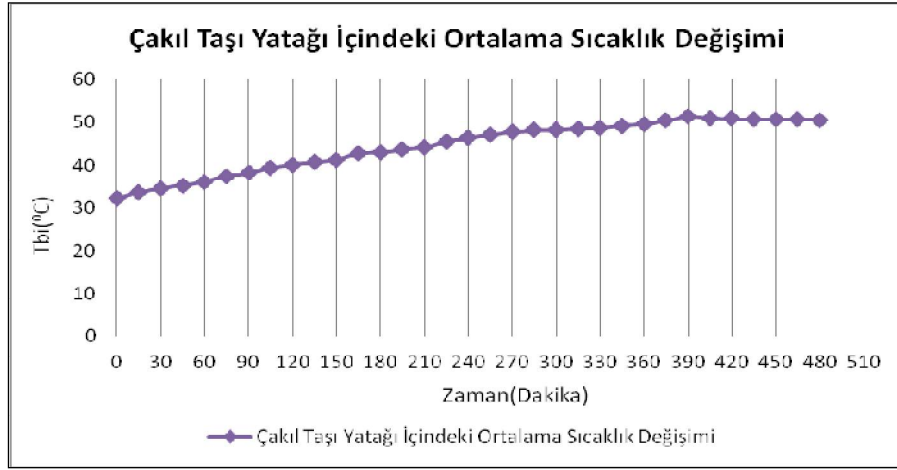
Şekil 5.94 Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre değişimi

5.6.2 2. Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları:

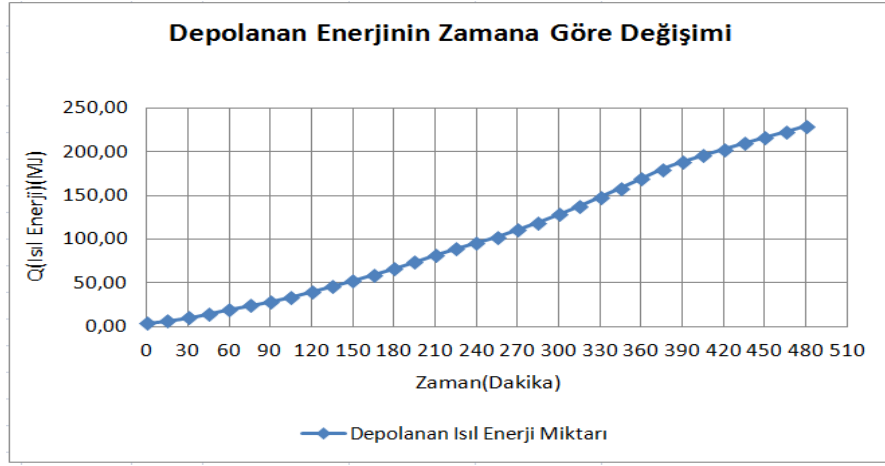
Çakıl taşı enerji depolama sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışmaların ikinci gününde çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık değişimleri belirlenerek depolanan ısı enerji miktarı hesaplanmıştır. İkinci günün başında sistem üzerinde tespit edilen hava kaçakları giderilmiş ve bu yüzden deney bir saat kadar geç başlatılmıştır. Bu deney süresince kolektörlerden sisteme üflenen havanın sıcaklığı en fazla 60.1°C olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkı ise bir önceki gün yapılan deneyde olduğu gibi bu deney süresince de genellikle sabit kalmıştır. Sistem içindeki ortalama sıcaklık 44.5°C olarak belirlenmiştir. Deşarj süresinin başlatılmasından sonra kurutma kabini içindeki sıcaklık verileri kabin giriş noktalarında biraz daha yüksek değerde çıkmış diğer noktalarda ise birbirine yakın bir şekilde seyretmiştir. Sistemde depolanan ısı enerji miktarı 229.12 MJ olarak hesaplanmıştır. Şarj süresi boyunca, kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.95'de, çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.96'da, depolanan ısı enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 5.97'de, çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünün zamana göre değişimi Şekil 5.98'de, şarj süresi boyunca gelen güneş ışınımının zamana göre değişimi Şekil 5.99'da ve deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklık değişimi Şekil 5.100'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



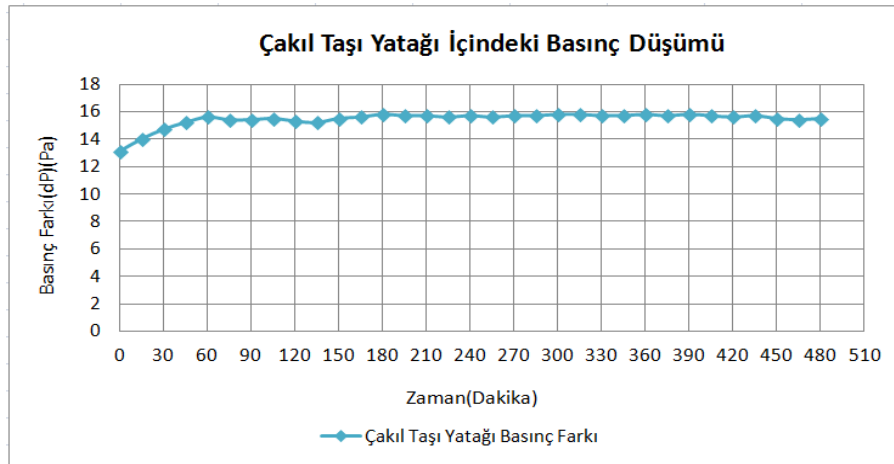
Şekil 5.95 Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi



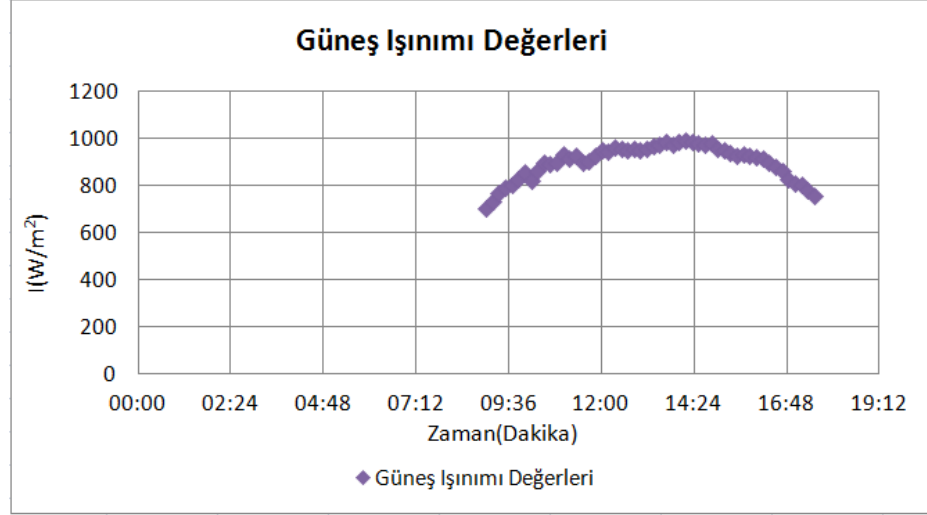
Şekil 5.96 Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi



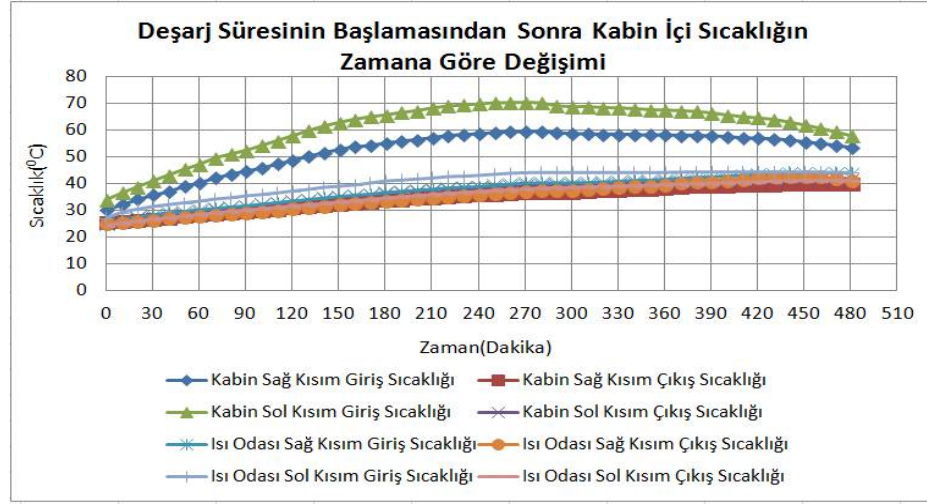
Şekil 5.97 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi



Şekil 5.98 Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi



Şekil 5.99 Şarj süresi boyunca güneş ışımının zamana göre değişimi

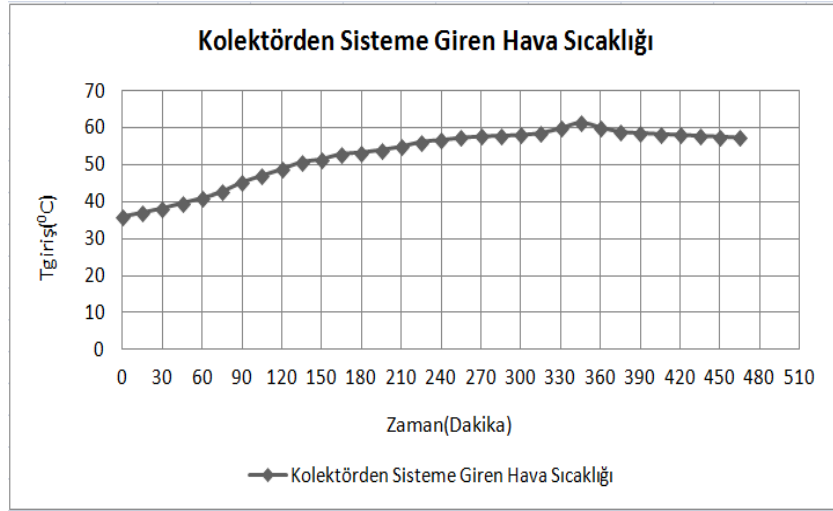


Şekil 5.100 Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre değişimi

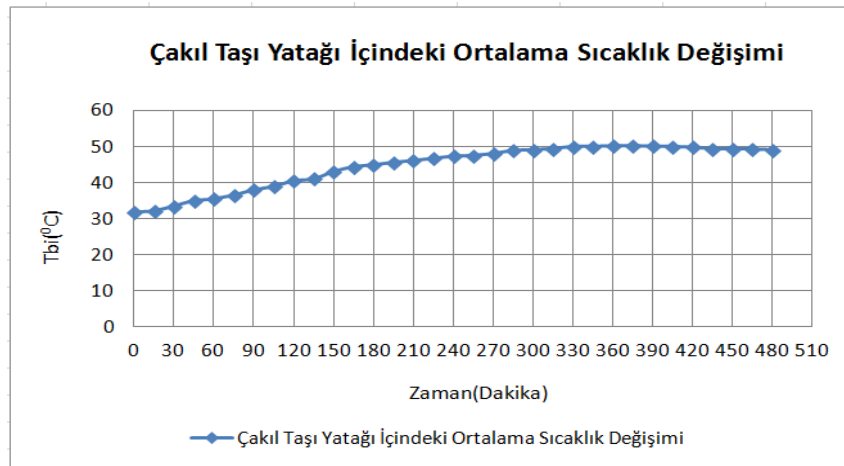
5.6.3 3. Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları:

Çakıl taşı enerji depolama sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışmaların üçüncü gününde de çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık değişimleri belirlenerek depolanan ısı enerji miktarı hesaplanmıştır. Bu deney süresince kolektörlerden sisteme üflenen havanın sıcaklığı en fazla $61.3^{\circ}C$ olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkı ise bir önceki gün yapılan deneyde olduğu gibi bu deney süresince de genellikle sabit kalmıştır. Sistem içindeki ortalama sıcaklık $44.8^{\circ}C$ olarak belirlenmiştir. Deşarj süresinin başlatılmasından sonra, bir önceki deneyde olduğu gibi, kurutma kabini içindeki sıcaklık verileri kabin giriş noktalarında biraz daha yüksek değerde

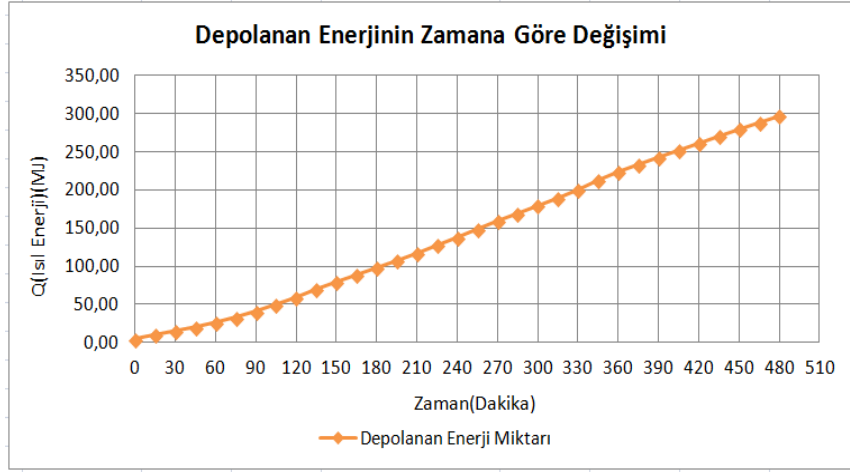
çıkışmış diğer noktalarda ise birbirine yakın bir şekilde seyretmiştir. Sistemde depolanan ısı enerji miktarı 297.82 MJ olarak hesaplanmıştır. Şarj süresi boyunca, kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.101'de, çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.102'de, depolanan ısı enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 5.103'de, çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünün zamana göre değişimi Şekil 5.104'de, şarj süresi boyunca gelen güneş ışınımının zamana göre değişimi Şekil 5.105'de vedeşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklık değişimi Şekil 5.106'da verilen grafiklerde gösterilmiştir.



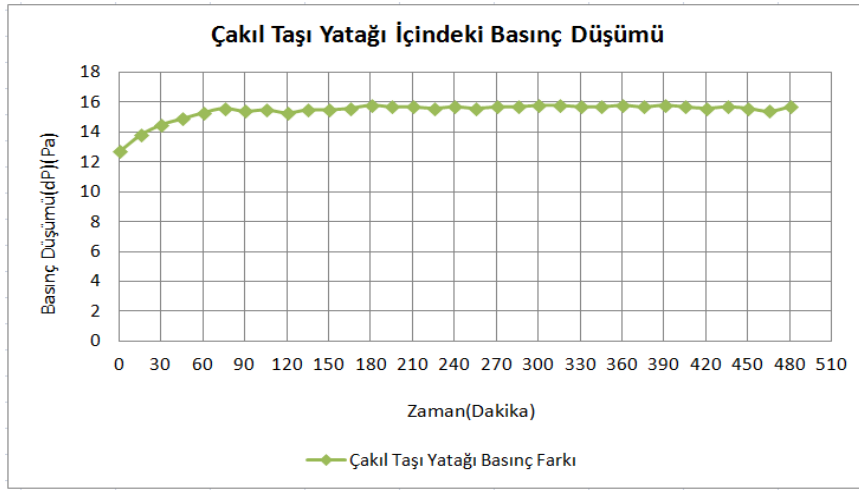
Şekil 5.101 Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi



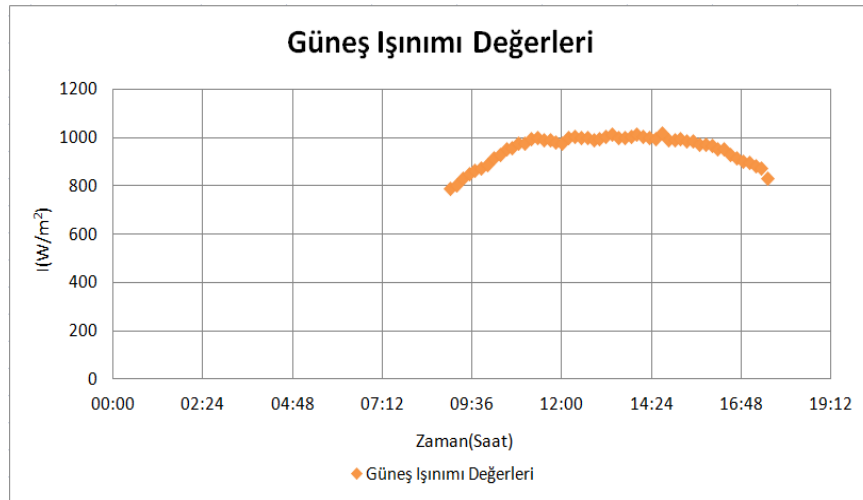
Şekil 5.102 Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi



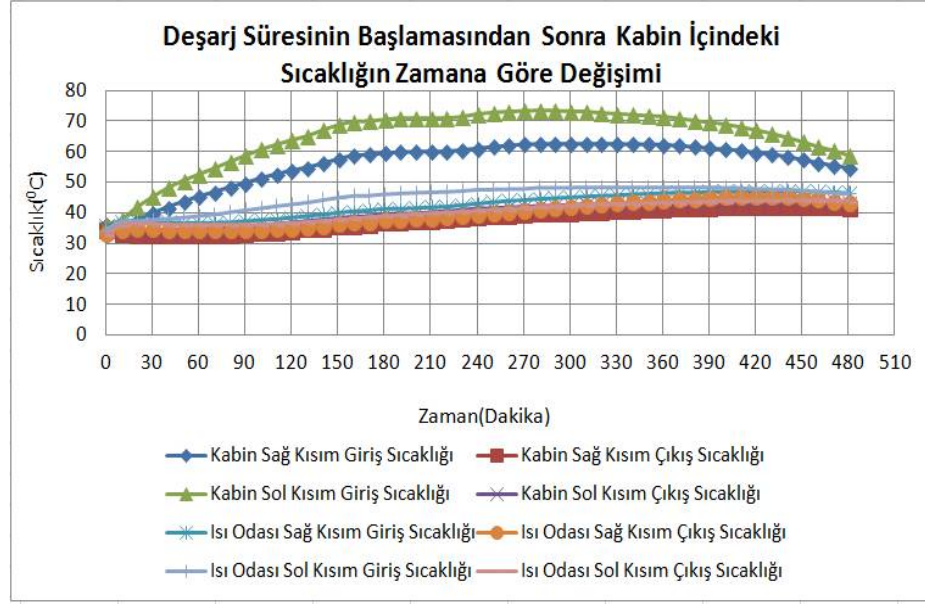
Şekil 5.103 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi



Şekil 5.104 Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi



Şekil 5.105 Şarj süresi boyunca güneş ışınının zamana göre değişimi

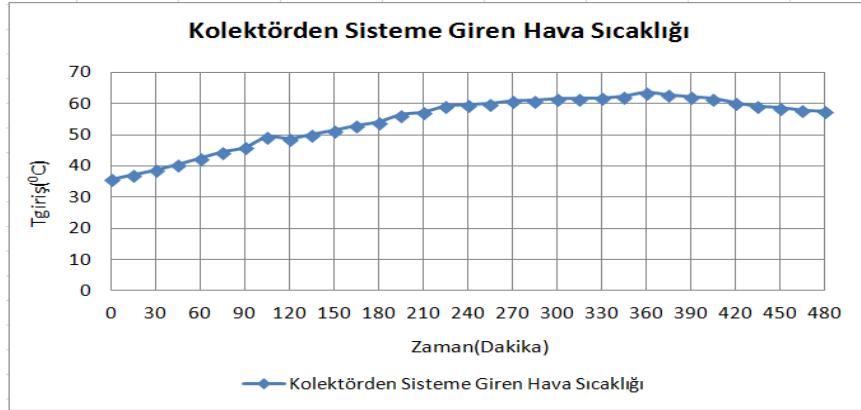


Şekil 5.106 Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre değişimi

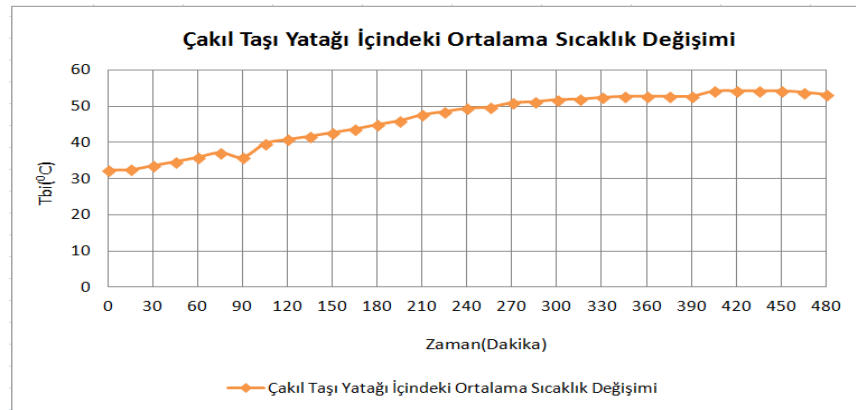
5.6.4 4. Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları:

Çakıl taşı enerji depolama sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışmaların dördüncü gününde de çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık değişimleri belirlenerek depolanan ısı enerji miktarı hesaplanmıştır. Bu deney süresince kolektörlerden sisteme üflenen havanın sıcaklığı en fazla 63.5°C olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkı ise bir önceki gün yapılan deneyde olduğu gibi bu deney süresince de genellikle sabit kalmıştır. Sistem içindeki ortalama sıcaklık 46.5°C olarak belirlenmiştir. Deşarj süresinin başlatılmasından sonra, bir önceki deneyde olduğu gibi, kurutma kabini içindeki sıcaklık verileri kabin giriş noktalarında biraz daha yüksek değerde çıkmış fakat diğer deneylerden farklı olarak bu deneyin sonuna doğru hava hızının etkisiyle diğer noktalarda ölçülen sıcaklık değerleri ile çakışmıştır ve bu deney de sıcaklık verileri birbirine yakın bir şekilde seyretmiştir. Sistemde depolanan ısı enerji miktarı ise 299.05 MJ olarak hesaplanmıştır. Şarj süresi boyunca, kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.107'de, çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.108'de, depolanan ısı enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 5.109'da, çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünün zamana göre değişimi Şekil 5.110'da, şarj süresi boyunca gelen güneş

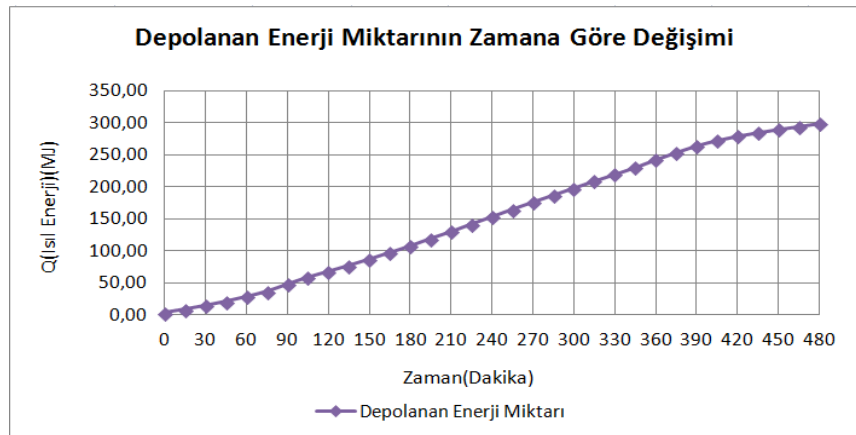
ışınımının zamana göre değişimi Şekil 5.111'de ve deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklık değişimi Şekil 5.112'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



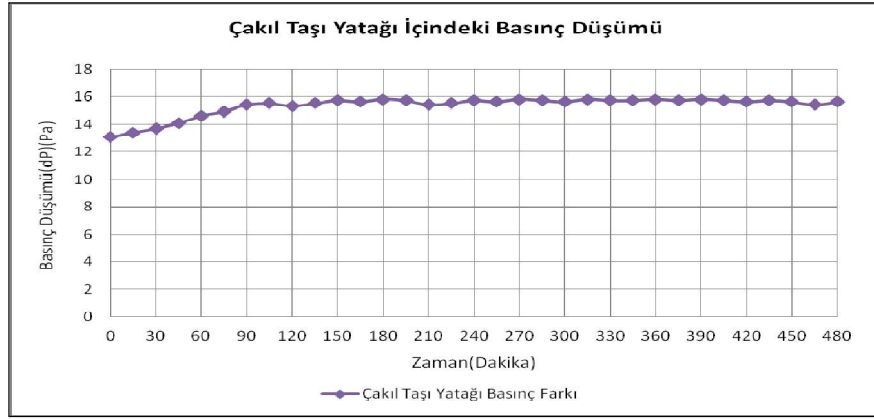
Şekil 5.107 Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi



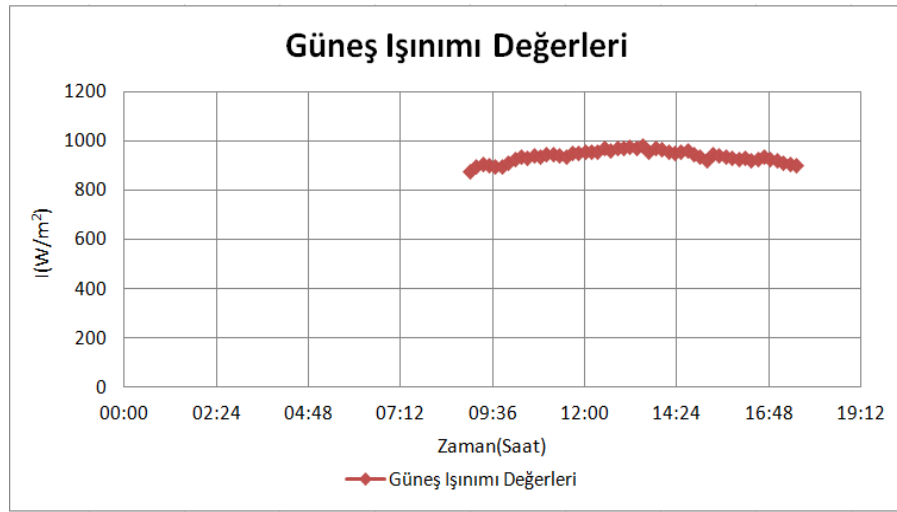
Şekil 5.108 Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi



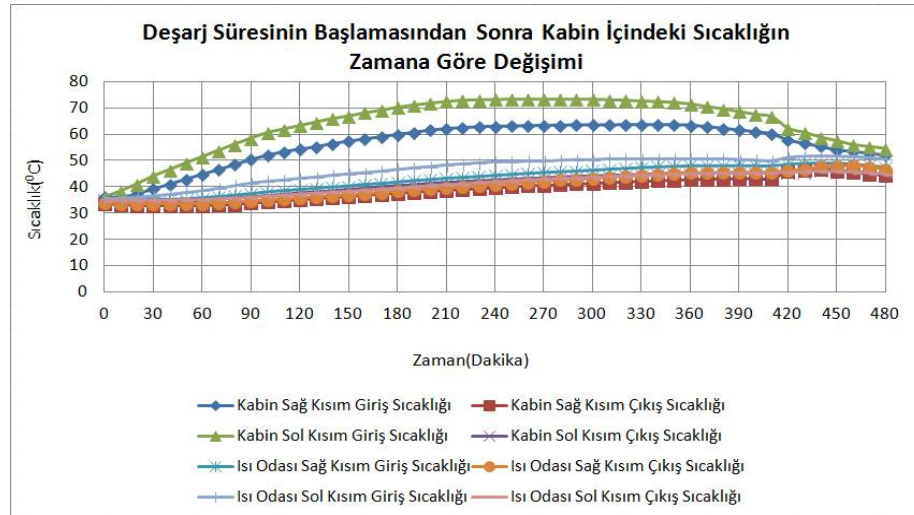
Şekil 5.109 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi



Şekil 5.110 Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi



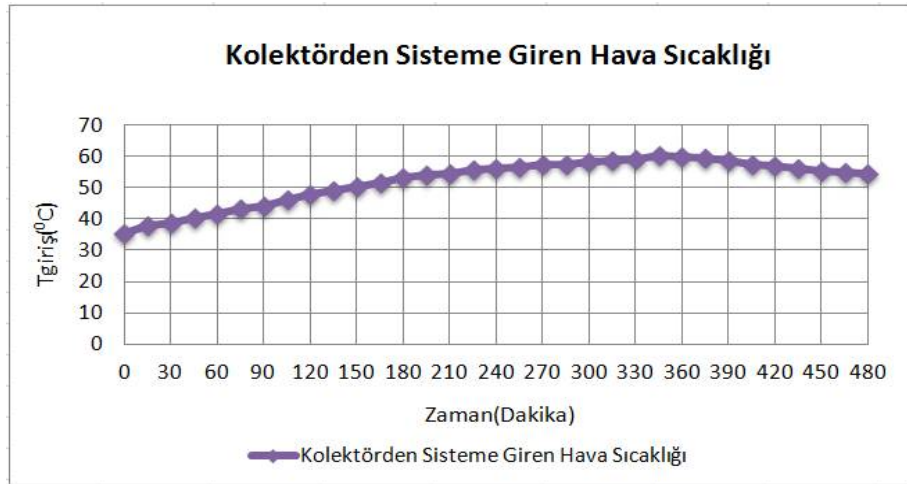
Şekil 5.111 Şarj süresi boyunca güneş ışınının zamana göre değişimi



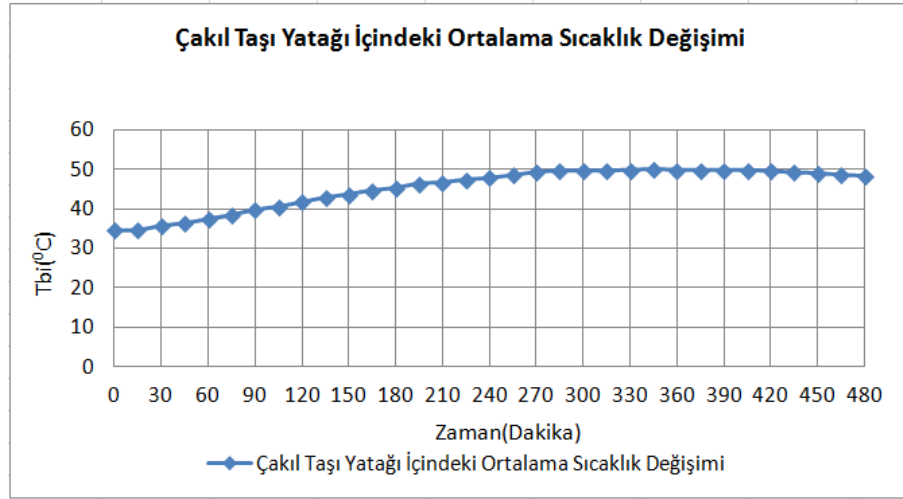
Şekil 5.112 Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre değişimi

5.6.5 5. Enerji Depolama Sistemi Deneyi Sonuçları:

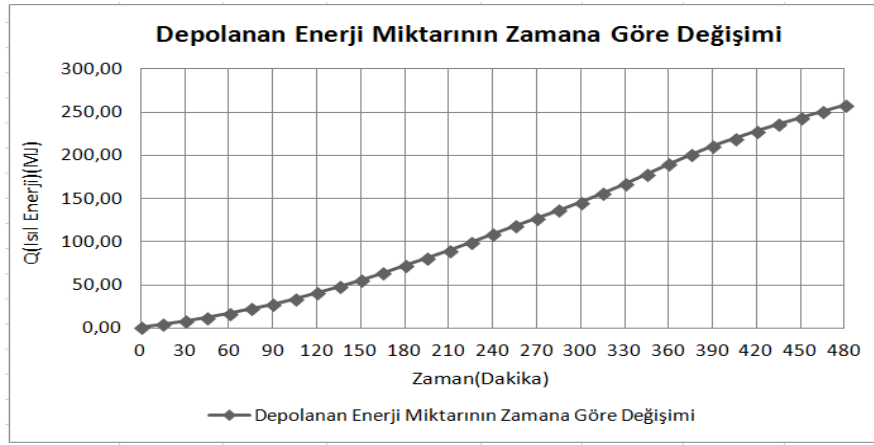
Çakıl taşı enerji depolama sistemi üzerinde yapılan son deneysel çalışmada da çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık değişimleri belirlenerek depolanan ısı enerji miktarı hesaplanmıştır. Deneyin yapıldığı gün İzmir'de havanın kapalı olmasından dolayı deney süresince kolektörlerden sisteme üflenen havanın sıcaklığı en fazla 60.2°C olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkı ise bir önceki gün yapılan deneyde olduğu gibi bu deney süresince de genellikle sabit kalmıştır. Sistem içindeki ortalama sıcaklık 45.2°C olarak belirlenmiştir. Deşarj süresinin başlatılmasından sonra, bir önceki deneyde olduğu gibi, kurutma kabini içindeki sıcaklık verileri kabin giriş noktalarında biraz daha yüksek değerde çıkmış ve bu deneyin sonuna doğru yine hava hızının etkisiyle diğer noktalarda ölçülen sıcaklık değerleri ile çakışmıştır ve bu deney de sıcaklık verileri birbirine yakın bir şekilde seyretmiştir. Sistemde depolanan ısı enerji miktarı ise 258.08 MJ olarak hesaplanmıştır. Şarj süresi boyunca, kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.113'de, çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.114'de, depolanan ısı enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 5.115'de, çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünün zamana göre değişimi Şekil 5.116'da, şarj süresi boyunca gelen güneş ışınımının zamana göre değişimi Şekil 5.117'de ve deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklık değişimi Şekil 5.118'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



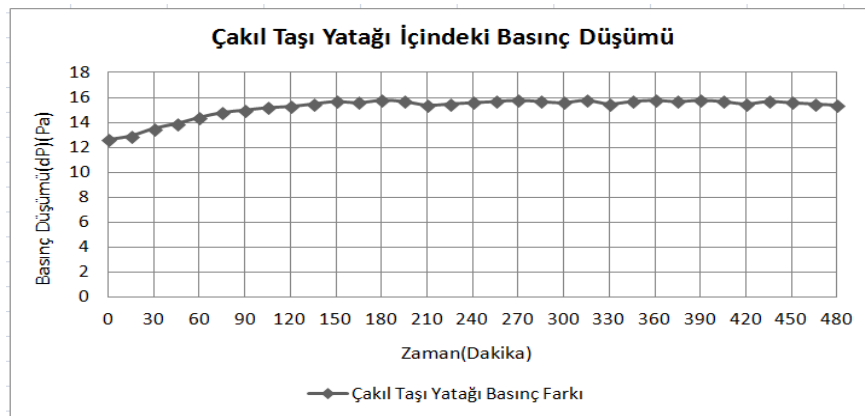
Şekil 5.113 Kolektörlerden çakıl taşı yatağına üflenen havanın sıcaklığının zamana göre değişimi



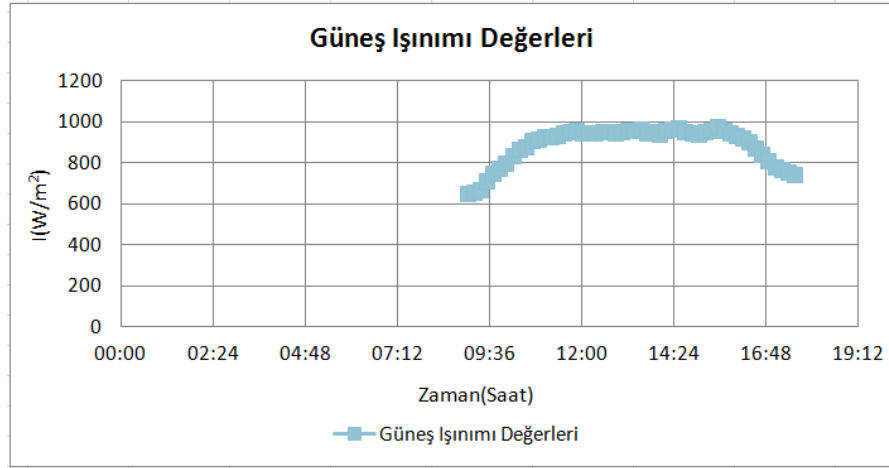
Şekil 5.114 Çakıl taşı yatağı iç sıcaklığının zamana göre değişimi



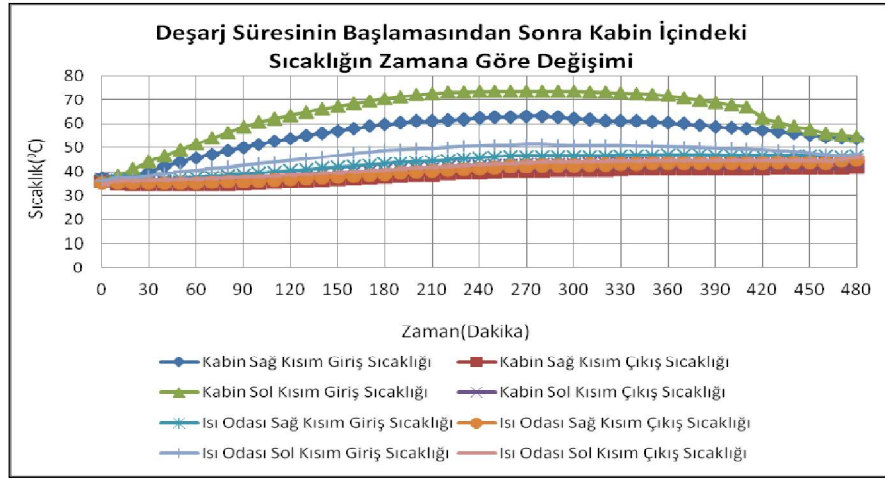
Şekil 5.115 Şarj süresi boyunca çakıl taşı yatağında depolanan enerjinin zamana göre değişimi



Şekil 5.116 Çakıl taşı yatağındaki basınç düşümünün zamana göre değişimi



Şekil 5.117 Şarj süresi boyunca güneş ışımının zamana göre değişimi



Şekil 5.118 Deşarj süresi boyunca kurutma kabini içindeki sıcaklığın zamana göre değişimi

5.7 Ölçümlerden Kaynaklanan Hata Analizi

Bu deneysel çalışmada yapılan deneylerde oluşan ölçüm hataları, hata analizi yapılarak incelenmiştir. Kullanılan cihazların duyarlılıkları: Çizelge 4.3' de ve deneyler esnasında ölçüm alınan noktalar ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Ölçümlere ait hataların irdelenmesi için Ebru Kavak Akpınar'ın "Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerinde Hata Analizi" (2005) adlı çalışmasından yararlanılmıştır[59].

Sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hatalar:

Kurutma sisteminin 8 ayrı noktasından ve çakıl taşı enerji depolama sisteminin ise 4 ayrı noktasından olmak üzere toplamda 12 ayrı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu sıcaklık ölçümleri için kullanılan NiCr-Ni termo elemanlar (termocouple) ± 0.05 hassasiyetindeki kalibrasyon termometresi ile kalibre edilmiştir. Deneyler esnasında okunan sıcaklık değerleri kalibrasyon sonucunda elde edilen katsayılarla çarpılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle bütün noktalardan ölçülen sıcaklık değerleri (ortam havası hariç) ± 0.05 ölçüm hassasiyetinde alınacaktır.

(a1) Termo elamanlardan kaynaklanan hata $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$

(b1) Duyar elamandan kaynaklanan hata $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (çevre havası sıcaklığı için)

(c1) Kontrol ünitesinden kaynaklanan hata $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$

Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar:

Kurutma deneyleri sırasında kütle ölçümleri dijital saat kullanılarak yapılmıştır. Zaman kurutma süresinin tamamlanmasını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle zaman ölçümünde yapılabilecek hataların analizi aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

(a2) Zaman ölçerin titreşiminden kaynaklanan hata ± 0.0003 dakika

(b2) Periyodik olarak yapılan ölçümlerden oluşacak hata ± 0.01 dakika

Kütle kayıplarının ölçümünden kaynaklanan hatalar:

Bu çalışmada Mettler Toledo marka 0.01 gram duyarlıkta maksimum 3200 gr tartabilen dijital göstergeli bir cihaz kullanılmıştır. Deneyler sırasında kütle ölçümlerinden kaynaklanan hatalar,

(a3) Hassas teraziden kaynaklanan hatalar ± 0.01 gr

(b3) Okumaktan kaynaklanan hatalar ± 0.01 gr

Kurutma havası hızı ölçümünde yapılan hatalar:

Kabin girişindeki hava hızını ölçmek için Siemens marka anemometre kullanılmıştır. Ayrıca Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Laboratuvarı'ndan iki gün için bir adet anemometre ödünç olarak alınmış ve kabin çıkış noktasına yerleştirilerek kabin içindeki hava hızı değişimi belirlenmiştir. Bu deneyler sırasında oluşabilecek hatalar,

(a4) Probun hassasiyetinden kaynaklanan hata $\pm 0.03\text{m/s}$

(b4) Kontrol ünitesinden kaynaklanan hata $\pm 0.02\text{m/s}$

Kurutma ve ortam havası bağıl neminin ölçümünde yapılan hatalar:

Kurutma havası ve ortam havasının bağıl nem ölçümlerinde yapılan nem ölçer ve kontrol ünitesi için hatalar,

(a5) Nem ölçerin duyarlılığından kaynaklanan hata $\pm 2\text{RH}$

(b5) Kontrol ünitesinden kaynaklanan hata ± 0.01

Elektrik enerjisi ölçümünde yapılan hatalar:

Bu çalışma kapsamında fanların çalışması için elektrik enerjisi kullanılmıştır. Bu tüketimin ne kadar olduğunu belirlemek adına sisteme dijital göstergeli bir elektrik sayacı bağlanmış ve tüketilen enerji miktarı belirlenmiştir. Cihazın hassasiyetinden ve okumadan dolayı kaynaklanan hatalar,

(a6) Elektrik saatinin duyarlılığından kaynaklanan hata ± 0.001

(b6) Okumaktan kaynaklanan hatalar $\pm 0.01 \text{ gr}$

Elma kurutma deneylerinde kurutma havası sıcaklığının, kütle kaybı ölçümlerinin, kurutma havası hızı ve neminin ölçülmesinin ve deneyler süresince kullanılan elektrik enerjisi ölçümleri sırasında yapılan hatalar belirtilmiştir. Ölçülen değerler göz önüne alınarak yapılan sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hatalarından oluşan belirsizlikler aşağıda yer alan denklemdeki gibi en geniş tanımıyla hesaplanabilir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\delta R}{\delta x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

Bu denklemde R, $x_1, x_2, \dots, x_n$ bağımsız değişkenlerin verilen bir fonksiyonudur. $w_1, w_2, \dots, w_n$ ise bağımsız değişkenlerin belirsizliğidir[59].

Sıcaklık ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri:

Deney cihazının bütün noktalarından kurutma havası sıcaklığı için yapılan (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12) ölçümlerde yapılabilecek hatalar aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$W_{Ti} = \left[(a1)^2 + (c1)^2 \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

$$W_{Ti} = \left[(0,05)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2} \quad W_{Ti} = \pm 0,051 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Ortam havası ölçülmesi esnasında yapılabilecek hata:

$$W_{Ti} = \left[(0,4)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2} \quad W_{Ti} = \pm 0,4 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Zaman ölçümünden ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri:

Kurutma deneylerinde kütle kayıpları ve tüketilen elektrik enerjisi zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler sırasında oluşabilecek toplam hata ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$W_z = \left[(a2)^2 + (b2)^2 \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

$$W_z = \left[(0,0003)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2} \quad W_z = \pm 0,01 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Kütle kayıplarının ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri:

Kurutma denemeleri sırasında ürünün periyodik olarak kütleindeki azalmanın ölçülmesi sırasında olabilecek toplam hata aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$W_M = \left[(a3)^2 + (b3)^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

$$W_M = \left[(0,01)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2} \quad W_M = \pm 0,01 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Kurutma Hava Hızı ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri:

Kurutma denemeleri sırasında kurutma havasının hızının ölçülmesi sırasında oluşabilecek toplam hata aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$W_v = \left[(a4)^2 + (b4)^2 \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

$$W_v = \left[(0,03)^2 + (0,02)^2 \right]^{1/2} \quad W_v = \pm 0,04 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Kurutma havası bağıl nemi ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri:

Kurutma denemeleri sırasında kurutma havasının bağıl nemi kurutma kabini girişi, kurutma kabini çıkışı ve ısı odası girişi olmak üzere üç ayrı noktadan ölçülmüştür. Ayrıca bir adet nem sensörü dışarıda bırakılarak dış ortamın bağıl nem değerinin de ölçülmesi

sağlanmıştır. Bu dört cihaz da aynı hassasiyet değerine sahiptir. Bağıl nem ölçümü sırasında oluşabilecek hata aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$W_{HR} = \left[(a5)^2 + (b5)^2 \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

$$W_{HR} = \left[(2)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2} \quad W_{HR} = \pm 2 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Kurutma denemelerinde harcanan elektrik enerjisinin ölçümünde ortaya çıkan toplam hataların analitik ifadeleri:

Kurutma denemeleri sırasında fanlar tarafından harcanan enerji kurutucu sistemler için önemli bir parametredir. Harcanan enerjinin ölçülmesi sırasında oluşabilecek toplam hata aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$W_E = \left[(a6)^2 + (b6)^2 \right]^{1/2} \quad (5.9)$$

$$W_E = \left[(0,001)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2} \quad W_E = \pm 0,01 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Yukarıdaki hesaplamalarda da anlaşılabacağı gibi en büyük hata değeri kurutma havası bağıl nem ölçümü sırasında oluşmuştur. Duyarlılığı daha yüksek cihazlar kullanılarak veya mevcut cihazın kalibre edilerek kullanılması durumunda daha hassas sonuçlara ulaşılması mümkündür.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında güneş enerjisi destekli kurutma sistemi geliştirilmiş olup deneysel çalışmalar süresince elmanın kuruma parametreleri incelenmiştir. Aynı zamanda, kurutma işleminin güneş ışığının olmadığı saatlerde de sürekliliğini sağlamak adına çakıl taşı enerji depolama sistemi tasarlanıp imalatı gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra geliştirilen bu sisteme entegre edilen reküperatör ünitesi(çapraz akışlı ısı değiştiricisi) ile sistem içinde meydana gelen atık ısıнын yaklaşık %50-60 oranında geri kazanımı sağlanmıştır. Bu sisteme yönelik ilk olarak bilgisayar ortamında Java programlama dili kullanılarak kurutulan elma dilimi üzerinde sıcaklık ve nem değişimlerini hesaplayan simülasyon programı (kurutma_sistemi.java) geliştirilmiştir. Benzer şekilde çakıl taşı enerji depolama sistemine yönelik sıcaklık değişimlerini, depolanan enerji miktarını, basınç düşümünü hesaplayan benzeşim programı yine Java programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Yapılan bu simülasyon çalışmaları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyum sağladığı gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalar boyunca elma cinsi olarak sarı ve yeşil renkli golden elma tercih edilmiştir. İlk yapılan deneysel çalışmalarda elmalar yıkanıp çekirdek yuvaları temizlendikten sonra salam dilimleme makinesi kullanılarak 5 ± 2 mm kalınlıkta dilimlenmiş ve tepsilere yerleştirilmiştir. Daha sonraki deney çalışmalarında ise 5-10 mm arasında değişen farklı kalınlıklarda elma dilimleri kurutulmuştur. Kurutma denemeleri dilimlenmiş elmaların yaş baza göre %85.3 nem içeriğinden %20 nem

içeriğine düşürülünceye kadar devam ettirilmiştir. Yapılan kurutma deneylerine ilişkin elde edilen veriler tablolar halinde Ek- A'da verilmiştir.

Gıda ürünlerinin kurutulması diğer kurutma işlemlerinde olduğu gibi kurutma havasının sıcaklığı ve nem içeriği ile ilişkilidir. Ayrıca, kurutmayı etkileyen bir diğer faktör de kurutulacak ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Güneş enerjisi destekli kurutma sistemlerinde kurutma havasının nem içeriği, bilinen ve kullanımı yaygın olan sıcak hava üflemleri klasik kurutuculara göre daha düşük değerlerdedir. Bu durum güneş enerjisi destekli kurutucuların düşük nemlilikte kurutma yaptığını ortaya koymaktadır.

Kurutma havasının sıcaklığı kurutma sürecine önemli etkisi olan faktörlerden birisidir. Genel olarak katıların kurutulması iki temel prensibe dayanmaktadır. Katının içindeki sıvıyı buharlaştırmak için gerekli olan ısı transferi ve katının içindeki sıvının yüzeye iletilmesini sağlayan kütle transferidir. Bu işlemin hızını kontrol eden faktörler kurutma hızını belirlemektedir[53]. Katıların kurutulmasını etkileyen dış koşullar sıcaklık, nem, hava akışı, katının karıştırılması, katının konulduğu alan, sıcak ortam ve nemle katı arasındaki temastır. Bu çalışmada, bu etkilerin bazıları değiştirilebilir koşullardır. Kurutma işlemlerinde kurutma havası sıcaklığı, kurutma süresini etkileyen en önemli faktördür. Çalışmada kurutma süresince deney sisteminin farklı noktalarından sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık-zaman grafiklerinden de görüleceği gibi sistemin sıcaklık verileri kurutma başladıktan çok kısa zaman sonra dengeye ulaşmakta ve kurutma süresince çok az değişmektedir.

TSE elma kurusu için standart değerler oluşturmuştur. Bu standartlarda (TSE 3688) kurutulacak ürünün ilk ve son nem değeri, kurutma sonrasındaki renk ve biçim yönünden kıstaslar ve elma kurusunda olabilecek katkı maddelerinin en yüksek değerleri verilmektedir. Bu çalışmada, gıda kurutma işlemi gerçekleştiren bir firmadan, deneylerin tamamlanmasından sonra teslim edilmek üzere, ödünç olarak alınan 4 adet kurutma tepsisi kullanılmış olup yapılan deneylerde sadece 4 rafta 5-7.5 kg arasında değişen miktarlarda elma kurutulmuştur. Sistemi tam kapasite çalıştırmak adına, bir güne mahsus olmak üzere, aynı firmadan 14 adet kurutma tepsisi talep edilmiş ve kabin içindeki toplam raf sayısı olan 18 raf kullanılarak toplamda 30 kg elma kurutulmuştur. Ayrıca, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarından ödünç olarak alınan bir adet anemometre kurutma kabini çıkışına yerleştirilmiş ve

sistemin tam kapasite çalıştırıldığı gün ve diğer deneylerle benzer kapasitede çalıştırıldığı bir sonraki gün için giriş ve çıkış noktalarındaki hava hızı değerleri belirlenmiştir. 5- 7.5 kg arasında değişen miktarlardaki elmanın hazırlanma süreci uzun sürmediği için elmalarda herhangi bir kararma söz konusu olmamıştır. 30 kg elma ile deney yapıldığı gün hazırlık süreci daha uzun olduğundan dilimlenmiş elmaların bekleme anında kararmaması için 5 dakika limonlu suda bekletilmiştir[52]. İlk deneylerde 5mm kalınlığındaki elmaların kurutulması işlemi gerçekleştirilmiştir. İlerleyen deneylerde ise 5mm-10mm arasında değişen farklı kalınlıklara sahip elma dilimleri kurutulmuştur.

Kurutma deneyleri sırasında elma dilimlerinin kütle kaybı, kurutma sisteminin belirlenen noktalarından sıcaklık, bağıl nem,basınç ve hava hızı ölçümü yapılmıştır. Ölçümler datalogger üzerinden veri tabanına aktarılarak bilgisayar ortamına işlenmiştir. Elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için Java programlama dili kullanılarak "VebbsDT3.java" adı altında bir program geliştirilmiş ve bu sayede belirli bir zaman dilimi içerisinde bilgisayar ortamına 10 dakikada bir veri aktarımı ve depolaması söz konusu olmuştur. Bunun dışında, kurutma sisteminden bağımsız olan piranometre ile her 10 dakikada bir güneş ışıınımı değeri ölçülmüştür. Ayrıca, kurutma sisteminin dışında yer alan ve 0,01 gr. hassasiyete sahip terazi ile her bir rafta belirlenen numunelerin 30 dakika arayla ağırlık değişimleri ölçülmüştür.

Gerçekleştirilen kurutma denemelerinde, kurutmanın başladığı andan itibaren, kurutma kabini giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkının hem sağ hem de sol kısımda deney süresince maksimum 8-10⁰C olduğu gözlemlenmiştir. Deneyin sonlarına doğru ise bu fark değeri 1-2⁰C'ye kadar düşebilmektedir. Bu durum, kurutma kabini içerisindeki nem alma veriminin yüksek olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

Elma kurutma deneyindeki kuruma süreleri 5 mm kalınlığında dilimlenen elmalar için 55⁰C- 63⁰C sıcaklıkları arasında 5-6 saat arasında değişmiştir. Farklı kalınlıklara sahip elma dilimleri için(6mm,7mm,8mm,9mm,10mm) aynı sıcaklık değerlerinde 6-7 saat arasında kurutma işlemi gerçekleşmiştir. Deney düzeneğinde gerçekleştirilen kurutma deneylerinde ilk etapta 4 adet rafta toplamda 5-7,5 kg arasındaki miktarlarda elma kurutulmuş olup sistemin giriş ve çıkış bağıl nem değerleri arasındaki en yüksek fark yaklaşık %7 olarak belirlenmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen deneylerde aynı sıcaklık

değerleri arasında 18 rafta 30 kg elma kullanılarak tam kapasitede sistem çalıştırılmış olup giriş ve çıkış bağıl nem değerleri arasındaki en yüksek fark yaklaşık %16 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, kurutma kabini giriş ve çıkışı arasındaki hava hızı değerleri anemometre ile ölçülmüş olup 7 kg elma kurutulan deneylerde giriş ve çıkış hava hızı arasındaki en yüksek fark 0.35m/s olarak belirlenmiş olup sistemin tam kapasite olarak çalıştırıldığı 30 kg elmanın kurutulduğu deneyde giriş ve çıkış hava hızları arasındaki en yüksek fark değerinin 1.05 m/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca nem oranının (MR) zamanla değişimini belirleyen uygun bir matematiksel model 5mm-10 mm arasında değişen farklı elma dilimi kalınlıkları için geliştirilmiştir.

Kurutulacak ürünün boyutları, kuruma süresini belirlemede etkili bir diğer parametredir. Farklı kalınlıklarda yapılan deneylerde nem oranı ve nem içeriği, ürünün kalınlığı ile orantılı olarak değişmektedir. 5 mm-10mm arasında değişen kalınlıktaki elma dilimlerinin nem içerikleri farklı sıcaklıklar için benzer değişimler göstermiştir. (Şekil 5.79 ve Şekil 5.80).

Bunun yanı sıra pek çok araştırmacı kurutacağı ürünün kuruma zamanını önceden tahmin edebilmek adına kurutmanın matematiksel modellenmesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu modellerin bazı ürünlere uygulanması deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır [55,56]. Bu çalışmada, “Approximation of diffusion” kuruma modeli sabit sıcaklıkta ve tek sıra elma kurutulması için “Nelder-Mead En Küçük Kareler Lineer Olmayan Polinom Denklemi” metodu kullanılarak hesaplanmıştır[57]. Boyutsuz nem oranı (MR), $(M_{d,i} - M_e / M_{d,o} - M_e)$ yerine sadeleştirilerek $(M_{d,i} / M_{d,o})$ şeklinde alınmıştır[56,58].

Difüzyon yaklaşımı (Approximation of diffusion) kurutma modeli kullanılarak deney verileri ve nem oranının(MR) önceden tahmin edilen değerleri hesaplanabilmektedir. 5mm ve 6mm kalınlığa sahip elma dilimleri için sistem üzerindeki kaçaklar giderildikten sonra yapılan üç deneye(4, 5 ve 6. kurutma deneyi) ilişkin belirlenen katsayılar birbirine yakın değerlerde bulunmuş ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. 1. deneye ilişkin belirlenen polinom denklemi MR_1 , 2. deneye ilişkin polinom denklemi MR_2 , 3. deneye ilişkin polinom denklemi ise MR_3 olarak adlandırılmıştır.

$$MR_1 = 12.887 \exp(-0.479 t) + (1 - 12.887) \exp(-0.479 * 1.022 * t)$$

$$MR_2 = 15.4203 \exp(-0.723 t) + (1 - 15.4203) \exp(-0.723 * 1.038 * t)$$

$$MR_3 = 17.672 \exp(-0.649 t) + (1 - 17.672) \exp(-0.649 * 1.035 * t)$$

Ayrıca, farklı kalınlıklardaki elma dilimleri için deney verilerinin kurutma modellerine uygunluğunu araştırmak için "Handerson and Pabis" kurutma modeli kullanılmıştır[55,56]. Nem oranı(MR), elma dilimi kalınlığının ve kurutma zamanının bir fonksiyonu olarak optimize edilmiş olup son iki kurutma deneyinde(11 ve 12. kurutma deneyi) elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı kalınlıktaki elma dilimleri için kurutma modeli oluşturulmuştur[57].

$$MR = a \exp(-kt)$$

$$a = a_1 + a_2 h + a_3 h^2$$

$$a_0 = k$$

h:Kalınlık

Son iki kurutma deneyi (11. ve 12. kurutma deneyleri) verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar istatistiksel değerlendirmeleri ve polinom denklemleriyle Şekil 5.89 ve Şekil 5.90'da gösterilmiştir.

$$MR_1 = (-0.0108707624 + 0.970328 h - 0.07890968 h^2) \exp(-1.042091 kt)$$

$$MR_2 = (0.023206 + 0.4290091 h - 0.0137525 h^2) \exp(-0.8264234 kt)$$

Bu çalışma sonucunda elde edilen denklemlerle deney verilerinin önemli ölçüde uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Kurutulan materyalin nem oranı ile kurutma oranı arasındaki ilişki 5. bölümde grafiklerde gösterilmiştir. Elma kurutma denemelerinde teorik olarak belirtilen sabit nem periyodu gözlenememiştir. Bu konuda benzer sonuçlara ulaşan araştırmacılardan biri olan Sosle de elma kurutma çalışmasında sabit kuruma hız periyodunun gözlemlenemediğini rapor etmiştir[61]. Kurutma teorisinde de belirtildiği gibi bu periyotta kurutulan yüzeyin tamamen ıslak olması nedeniyle kuruma hızının sabit kalması gerekmektedir. Ancak elma dilimlerinin yüzeyindeki serbest kalan su zerreciklerinin oluşturduğu ıslak yüzey, ürünün kurutma işlemlerine hazırlık aşamasından itibaren kurumaya başlamakta ve bu sabit kuruma işlem basamağı kısa zamanda tamamlanmaktadır.

Kurutma alanında verimliliği ve kaliteyi kapsayan genel bir kavram tanımlamak zordur. Bu zorluğun nedenlerinden birisi de kurutulan ürünün kalitesi ile ilgilidir. Farklı kurutma yöntemleri ile elde edilen ürünün kalitesi ön planda tutuluyorsa, kurutma işlemi sadece üründen suyun buharlaştırılması anlamına gelmemektedir. Kaliteli üründe daha çok ürünün renk, doku, besin değerleri ve su alma kabiliyeti gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Bunlar ürünün son halinin tanımlanmasını karmaşık hale getirmektedir. Ancak kurutucuların performanslarının mukayesesi enerji tüketimine dayalı verilerle yapıldığında daha objektif bir değerlendirme söz konusu olacaktır. Bu bağlamda geliştirilen güneş enerjisi destekli kurutma sistemi ile benzer kapasiteye sahip elektrikli kurutma sistemlerinin enerji tüketimi açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen deney düzeneğinde elektrik enerjisi tüketimi sadece sistemde yer alan fanlar ve reküperatör ünitesinden dolayı meydana gelmiştir. Bu sistemlerin deney süresi boyunca çalışması durumunda sisteme entegre edilen elektrik sayacı ile günde ortalama 8.12 KWh elektrik tükettiği gözlemlenmiştir. Aynı kapasitede gıda ürünü kurutma işlemini gerçekleştiren ve sadece elektrik enerjisiyle çalışan fırınlar ise günde ortalama 35 KWh elektrik tüketmektedir. 1 KWh başına düşen enerji tüketim fiyatının ortalama 0.40 TL(40 kuruş) olduğu göz önüne alındığında bu çalışma kapsamında tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sistemi çalışma anında ortalama 3.25 TL'lik, elektrikli kurutma sistemi ise çalışma anında ortalama 14 TL'lik enerji tüketimine neden olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, geliştirilen bu sistem sayesinde kurutma işleminde elektrik enerjisinden yaklaşık %76,8 oranında tasarruf sağlanmıştır.

Böyle bir sistemin yatırım maliyetini belirlemek için ön fizibilite çalışması yapılmış ve bu çalışmaya konu olan Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolama Sistemli Zirai Ürün Kurutma Sistemi'nin yatırım mali projeksiyonuna bakmak için temel bir senaryo oluşturularak kuru elma üretimi üzerinden veriler hesaplanmıştır. 30 kg yaş elmanın kuruma sonrası ortalama ağırlığı ortalama 3 kg olarak belirlenmiştir. İşçilik maliyeti ise çalışan kişinin, 2015 verilerine göre, aylık olarak asgari ücret değeri olan 1000,00TL aldığı ve haftada 6 gün çalıştığı gözönüne alınarak belirlenmiştir. Çizelge 6.1'de güneş enerjili enerji depolama sistemli kurutma sistemi için belirlenen sabit giderler, Çizelge 6.2'de ise Elektrikli kurutma sistemi için belirlenen sabit giderler yer almaktadır. Bu

sabit giderler oluşturulurken T.C. Maliye Bakanlığı ve “TIM-Türkiye 2023 Kuru Meyve ve Mamulleri Sektörü”nün pazar analizleri esas alınmıştır ve günlük üretim miktarının tamamının satıldığı senaryosu üzerinden satış bedelleri hesaplanmıştır[62].

Çizelge 6.1 Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sistemi için sabit giderler

Yapım Maliyeti	15.830,24TL
30 kg yaş elma maliyeti	105TL
Elektrik Tüketim Maliyeti(Tüketim günde 8,12 kWh) (0,4TL/kWh)	3.25 TL
İşçilik Maliyeti	38.50TL/Gün
Toplam İşletme Maliyeti(Gün)	146.75 TL
Toplam İşletme Maliyeti(Ay)	4.402,50TL
Toplam İşletme Maliyeti(Yıl)	52.830,00 TL
Kuru Elma Satış Fiyatı(kg)	125 TL
Günlük Toplam Satış*	375 TL
Yıllık Toplam Satış	136.875,00 TL

Çizelge 6.2 Elektrikli Kurutma Sistemi için sabit giderler

Yapım Maliyeti	22.580,48 TL
30 kg yaş elma maliyeti	105 TL
Elektrik Tüketim Maliyeti(Tüketim günde 35kWh)(0,4TL/kWh)	14 TL
İşçilik Maliyeti	38.50TL/Gün
Toplam İşletme Maliyeti(Gün)	157.50 TL
Toplam İşletme Maliyeti(Ay)	4.725,00 TL
Toplam İşletme Maliyeti(Yıl)	56.700,00 TL
Kuru Elma Satış Fiyatı(kg)	125 TL
Günlük Toplam Satış*	375TL
Yıllık Toplam Satış	136.875,00 TL

Tabloda yer alan rakamların ışığı altında kuru elma üretimi için yıllık kazanç; Elektrikli kurutma fırını kullanılması durumunda (136.875-79.280,48) **57.954,52TL** iken güneş enerjili kurutma fırını kullanılması durumunda (136,875-68.660,24) **68.214,76 TL** olarak şekillenmektedir. Aylık bazda ise bu rakamlar makine yatırım bedelleri hariç; Elektrikli kurutma fırını için (11.250-4.725) **6.525,00TL**, Güneş enerjili kurutma fırını için (11.250-4.402,50) **6.847,50TL** olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu temel senaryo rakamları üzerinden ilerlediğimizde, projeye konu olan Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolama Sistemli Kurutma Sistemi'nin kendi yatırım maliyetini 6.Ay itibariyle, benzer kapasiteye sahip elektrikli kurutma fırınının ise kendi yatırım maliyetini 12. ay itibariyle, karşılamaya başlayacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Kurutma deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin bazıları Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne iletilmiş ve burada kurutulmuş elmaların renk, koku, tat, nem, su aktivitesi ve doku açısından gerekli testleri yapılmıştır. Yapılan bu testlere ilişkin bazı fotoğraflar şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Ege Üniversitesi Gıda Müh. Bölümü'nde yapılan testlere ilişkin fotoğraflar

Kurutulmuş elma dilimlerine ilişkin yapılan bu testleri kısaca şu şekilde açıklamak mümkündür:

Nem tayini

Kurutulmuş elma dilimlerinin nem tayini vakum etüvde (Wisd, WiseVen, Germany) yapılmıştır. Üçer gram alınan örnekler petri kaplarında sabit tartıma gelene kadar 65°C'de vakum etüvde tutulmuştur. Nem miktarı yüzde olarak hesaplanmıştır (yaş bazlı)[60].

Su aktivitesi tayini

Kurutulmuş elma dilimlerinin su aktivitesi, ± 0.001 hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazı (Testo AG 400, Germany) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, yaklaşık 3–4 gr dilimlenmiş elma örneği hızlı bir şekilde aletin paslanmaz çelikten yapılmış sızdırmaz haznesine yerleştirilmiştir. Su aktivitesi değerinde 0.001'den az bir değişim olduğunda, sistemin dengeye ulaştığı kabul edilmiş ve cihazın göstergesinden su aktivitesi değeri okunmuştur. Çizelge 6.3'de nem ve su aktivitesinin tayinine ilişkin deney sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 6.3 Kurutulmuş elma dilimlerine ilişkin nem ve su aktivitesi tayini deney sonuçları

Örnek	Nem (%)	Su aktivitesi
1	8.227±0.052	0.418±0.009 (23.97°C)
2	6.037±0.651	0.372±0.005 (24.93°C)

Renk analizi

Kurutulmuş elma dilimlerinin renk değerleri Konica Minolta Chroma Meter CR- 400 cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Örneklerde L* (parlaklık), a* (+ kırmızı, - yeşil) ve b* (+ sarı, - mavi) renk değerleri ölçülmüştür. Çizelge 6.4'de renk analizine ilişkin deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 6.4 Kurutulmuş elma dilimleri için renk analizi sonuçları

Örnek	L*	a*	b*
1	84.845±2.0120	1.9338±0.8351	26.3825±3.4893
2	75.192±3.8057	6.985±2.7214	35.561±2.6685

Doku Profili (Sertlik) Analizi

Kurutulmuş elma dilimlerinin doku profili analizleri TAXT Express doku analiz cihazı (Stable Microsystems, Surrey, UK) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sertlik hesaplanmıştır. Doku profili analizinde 2 mm çaplı silindirik prob ve 10 N luk yük hücresi kullanılmıştır. Test öncesi prob hızı 1.5 mm/s, test hızı 1.0 mm/s ve test sonrası prob hızı ise 10 mm/s olarak ayarlanmıştır. Çizelge 6.5'de doku profili analizine ilişkin deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 6.5 Kurutulmuş elma dilimleri için doku profili analizi sonuçları

Örnek	Sertlik (g)
1	167.3500±29.040
2	250.4667±33.212

Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü tarafından yapılan testler sonucunda kurutulmuş ürünlerin, özellikle nem değerlerinin %10'nun altında ve su aktivitesi değerlerinin 0.7'nin altında olmasından dolayı, kuru ürün olarak kabul edilebileceği ve uzun süre bozulmadan kalabileceği ortaya çıkmıştır.

Ayrıca, yapılan deneyler esnasında, ağırlıkları 15-20 gr arasında değişen 5mm kalınlığa sahip birkaç tane elma dilimi güneş altında doğal kurumaya bırakılmış ve kuruma davranışları incelenmiştir. İlk bir saatlik zaman dilimi içerisinde elmaların renk değiştirmeye başladığı gözlemlenmiştir. Diğer numunelerde olduğu gibi bu numuneler de her 30 dakikada bir ağırlık ölçümüne tabi tutularak nem değişimleri takip edilmiştir. 6 saat sonra kabin içindeki kurutma işlemi istenilen değerlere ulaştığı için sonlandırıldığında doğal kurumaya bırakılan ürünlerin ağırlıklarının bu süre sonunda 7-10 gr arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu ürünler bir sonraki günde de doğal kurumaya bırakılmış ve ikinci günün sonuna doğru istenilen nem değerlerine ulaşabilmiştir ve tamamen dış ortamda kurumaya maruz bırakıldığı için bu durum ürünlerin renk değiştirmesine ve bozulmaya başlamasına neden olmuştur. Şekil 6.2'de bu numunelerin bazılarının kuruma sonrası durumu gösterilmektedir.



Şekil 6.2 Doğal kurumaya bırakılan ürünlerin kuruma sonrası durumu

Bu çalışma kapsamında geliştirilen kurutma sisteminde yapılan deneylerde ürünler, ortalama 6 saat civarında istenilen nem değerlerine ulaşmakta ve kurutma işlemi tamamen kapalı ortamda gerçekleştiği için renk değiştirmeden kurumaktadır. Bu çalışma sonucunda geliştirilen bu sistemin kurutma işlemini doğal kurumaya göre yaklaşık %50 daha kısa sürede gerçekleştirdiği ve daha kaliteli ve hijyenik ürünler ortaya çıkardığı sonucuna varılmıştır.

Bunun dışında gündüz saatlerinde kurutma sisteminden bağımsız olarak çalışan çakıl taşı enerji depolama sisteminin giriş, çıkış ve orta noktalarından sıcaklık ölçümü yapılmış olup çakıl taşı yatağında meydana gelen sıcaklık değişimleri sürekli takip edilmiş ve gün içerisinde 08.00-17.00 saatleri arasında sistem şarj edilerek depoladığı enerji miktarı hesaplanmıştır. Deşarj işlemi için kurutma sistemi ile çakıl taşı enerji depolama sistemi arasındaki klape açılarak depolanan enerjinin kurutma sistemine aktarılması sağlanmış ve bu sürenin ortalama 7-8 saat arasında değiştiği ve elmaların kuruması için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili deney sonuçları tablolar halinde Ek -B'de verilmiştir.

Bu deneysel çalışmada nemliliği yüksek tarım ürünlerinin kurutulması için güneş enerjisi destekli kurutma sistemi tasarlanmış, imalatı gerçekleştirilmiş ve tasarlanan veriler üzerinden ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca kurutma sisteminden bağımsız olarak çalışan çakıl taşı enerji depolama sistemi geliştirilerek kurutma işleminin güneş ışınımının olmadığı veya yetersiz kaldığı akşam saatlerinde de devam etmesi sağlanmıştır. Montaj işleminin tamamlanmasından sonra yapılan ilk deneysel çalışmalarda sistem üzerindeki hava kaçakları nedeniyle istenilen performans değerleri alınamamıştır. Hava kaçaklarının olduğu noktalar belirlenerek bu kaçaklar önemli ölçüde giderilmiş ve deney sonuçlarında önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla bu sistemin zirai ürün kurutmak için uygun bir sistem olduğu görülmektedir.

Kurutma ve ısı enerji depolama işlemleri özellikle güneş ışınımının yüksek olduğu yaz aylarında yüksek performans gösterebildiği için güneş ışınımının yeterli olmadığı diğer zaman dilimlerinde geliştirilen bu sistem kurutma işleminde istenilen verimi sağlamayabilir. Bu durumda özellikle bu zaman dilimlerinde alternatif enerji kaynakları kullanılarak kurutma işleminin sürekliliğini sağlamak mümkündür. Sistemin sürekli

alışmasını sağlamak adına ihtiyaç duyulacak enerjinin ikincil enerji kaynaklarından daha fazla yararlanılarak sağlanması düşnlebilir. Özellikle, gece kurutma enerjisinin güneş enerjisi yerine yanma enerjisinden faydalanarak bilhassa biyoyakıtlar gibi kaynakları enerji verimli sistemlerde yakma, verimli ısı pompalarını kullanma gibi alternatif enerji üretim teknolojilerinden faydalanmak için gerekli araştırmalar yapılabilir. Bu tür sistemler enerji depolamasını alternatif olarak kullanılabilir. Burada anahtar kısım ise yanma gazlarının ısılarının mümkün olduğu kadar iyi çekilebilmesi (ısı verimin yüksek olması gerekir) olacağı için ısının geri çekebileceği ısı değiştiricilerle entegre sistemler dizayn edilmesi diğer alternatif faaliyetler arasında yer alabilir. Yüksek sıcaklık ısı değiştirici entegrasyon da diğer bir önemli problemi arz edebileceğinden ısı değiştirici yüzeylerinin koruyucu tabakalarla kaplanması bu sorunun giderilmesi için önemli bir seçenek olarak düşnlebilir. Diğer bir alternatif de yüksek oranda hava kullanılarak yanma gazlarının sıcaklığının düşürülmesi ile bu sorunun ortadan kaldırılabilir. Bunun dışında, geliştirilen bu sisteme hava kaynaklı ısı pompasının entegre edilmesiyle kurutma işleminin dört mevsim boyunca sürekli liği sağlanabilir.

Bu deneysel çalışma sonucunda güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sisteminin, tasarım ve çalışma parametreleri incelenerek ticari boyutta tarımsal ürün kurutabileceği, sektöründe verimli bir şekilde kullanılabilir ve aynı zamanda daha yüksek kalitede ürünlerin elde edilebileceği bir sistem olduğu saptanmıştır. Ayrıca geliştirilen bu sistemin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin de düşük olması göz önüne alındığında kurutma sektöründe yaygın bir şekilde kullanılabilir açıkça görülmektedir.

- [1] Lee, K. H., Kim, O. J.,(2009)," Investigation On Drying Performance and Energy Savings Of The Batch-Type Heat Pump Dryer", *Drying Technology*, Cilt 27, Sy 565-573.
- [2] Queiroz, R., Gabas, A. L., Telis, V. R. N.,(2004), "Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers", *Drying Technology*, Cilt 22, Sy 1603-1620.
- [3] Hawlader, M. N.A., Rahman, S. M. A., Jahangeer, K. A.,(2008), "Performance of Evaporator-Collector and Air Collector in Solar Assisted Heat Pump DryeEnergy Conversion and Management, Cilt 49, Sy 1612-1619.
- [4] Akpınar, E., K.,(2004), "Energy and Exergy Analyses of Drying of Red Pepper Plices in A Convective Type Dryer", *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, (31) 8: 1165-1176.
- [5] Aghbashio, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., (2009),"Performance Analysis Of Drying Of Carrot Slices In A Semi-Industrial Continuous Band Dryer, *Journal Of Food Engineering*", Cilt 91, Sy 99-108.
- [6] Vazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., Cruz, E., (1997),"Grape Drying in a Pilot Plant with a Heat Pump", *Drying Technology*, Cilt 15, Sy 899-920.
- [7] Chou S.K. , Hawlader M.N.A. , Ho J.C. and Chua K.J., (1998), "On the Study of a Two-Stage Heat Pump Cycle for Drying of Agricultural Products", *Proceedings of the ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology Phitsanulok Thailand. June 3–5, Thailand()*.

- [8] Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S.,(2002), "Optimization of Heat Pump Fruit Dryers", *Journal of Food Engineering*, 59, pp 369- 377.
- [9] Prasertsan S. and Saen-saby P.,(1998)," Heat Pump Drying of Agricultural Materials, *Drying Technology*", 16, pp. 235-250.
- [10] Güngör, A., Özbalta, N.,(1997)," Endüstriyel Kurutma Sistemleri", III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
- [11] Tosun S.,(2009), "Bazı Tarımsal Ürünler için Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi", Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Olgun, H., Rzayev P.,(2000), "Fındığın Üç Farklı Sistemde Güneş Enerjisi ile Kurutulması" *Tr. J. Engin. Environ. Sci.*, Tübitak, 24: 1-14.
- [13] Ceylan, İ, Aktas, M., Dogan H.,(2005), "Isı Pompalı Kurutma Odasında Elma Kurutulması", *Isı Bilimi ve Teknigi Dergisi*, 25(2): 9-14.
- [14] Aktaş, M.,(2007), "Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi" Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- [15] Polat, T.,(2012), "Çam Fıstığı Kozalağı Kurutma Sistemi Tasarımı ve İmalatı" Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- [16] Kurban, M., Varlık, T., Başaran, Filik Ü. ve Hocaoglu, F. O., (2007), "Yaş Sebze-Meyve Kurutma İşleminde Güneş Enerjisi Destekli Hibrid Sistemli Makine Kullanımı, IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Gaziantep.
- [17] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Gabbasa,M., Kazem, H.A., (2014),"Performance Analysis of Solar Drying System for Red Chili", *Solar Energy*, 47-54.
- [18] Ambarita, H., Dina, S.F., Napitupulu, F.H., Kawai, H.,(2015), " Study on Effectiveness of Continuous Solar Dryer Integrated with Desiccant Thermal Storage for Drying Cocoa Beans",*Case Studies in Thermal Engineering*, 32- 40.
- [19] Kowalski, S.J., Mierzwa, D.,(2013), "Numerical Analysis of Drying Kinetics for Shrinkable Products Such as Fruits and Vegetables", *Journal of Food Engineering*, 522-529.

- [20] Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., Farhat, A., (2015), " Experimental Investigation and Economic Evaluation of A New Mixed-Mode Solar Greenhouse Dryer for Drying of Red Pepper and Grape", Renewable Energy, 1-8.
- [21] Siles, J.A., Tello, P.G., Martin, M.A., Martin, A., (2015), " Kinetics of Alfalfa Drying: Simultaneous Modelling of Moisture Content and Temperature", Biosystems Engineering, 185-196.
- [22] Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., Berrbeuh, M.H., (2013), " Solar Drying of Potatoes. An Experimental Investigation.", Energy Procedia, 1276-1285.
- [23] Romero, V.M., Cerezo, E., Garcia, M.I., Sanchez, M.H., (2014), "Simulation and Validation of Vanilla Drying Process in An Indirect Solar Dryer Prototype Using CFD Fluent Program", Energy Procedia, 1651-1658.
- [24] Tunç, M., (2008), "İnce Tabaka Halinde Kurutulan Patlıcanın Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi ve Kuruma Davranışının Modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [25] Schmidt, F.W.; Willmot A.J., (1981), "Thermal Energy Storage and Regeneration", McGraw-Hill Book Co.
- [26] Sagara, K.; Nakahara, N., (1991), "Thermal Performance and Pressure Drop of Packed Beds with Large Storage Materials." Solar Energy, 47, 157-163.
- [27] Singh, R.; Saini, J.S., (2006), "Nusselt Number and Friction Factor Correlations for Packed Bed Solar Energy Storage System Having Large Sized Elements of Different Shapes." Solar Energy, 80, 760-771.
- [28] Saini J.S., Singh, R., Saini J.S., (2008), "Simulated Performance of Packed Bed Solar Energy Storage System Having Storage Material Elements of Large Size Part 1,2,3." The Open Fuels & Energy Science Journal, 1, 91-96.
- [29] Duffie, J.A., Beckman W.A., (1991), "Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Ed.," John Wiley & Sons Inc.
- [30] Abbud, I.A., Löf, G.O.G., Hittle, D.C., (1995), "Simulation of Solar Air Heating at Constant Temperature." Solar Energy, 54, 75-83.
- [31] Mumma, S.A.; Marvin, W.C., (1976), "A Method of Simulating the Performance of a Pebble Bed Thermal Energy Storage and Recovery Systems," ASME Paper 76-HT-73, ASME/AICHE National Heat Transfer Conference St. Louis.

- [32] Singh, H., Saini, R.P., Saini, J.S.,(2013), "Performance of A Packed Bed Solar Energy Storage System Having Large Sized Elements with Low Void Fraction," Solar Energy,22-34.
- [33] Bouadila, S., Kooli, S., Lazaar, M., Skouri, S., Farhat, A.,(2013), "Performance of A New Solar Air Heater with Packed-Bed Latent Storage Energy for Nocturnal Use.", Applied Energy, 267-275.
- [34] Opitz, F., Treffinger, P.,(2014), "Packed Bed Thermal Energy Storage Model-Generalized Approach and Experimental Validation." , Applied Thermal Engineering, 245-252.
- [35] Bouadila, S., Kooli, S., Lazaar, M., Skouri, S., Farhat, A.,(2014), "Assessment of The Greenhouse Climate with A New Packed-Bed Solar Air Heater at Night in Tunisia.", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31-41.
- [36] Cascetta, M., Cau, G., Puddu, P., Serra, F.,(2014), "Numerical Investigation of A Packed-Bed Thermal Energy Storage System with Different Heat Transfer Fluids." Energy Procedia, 598-607
- [37] Zanganeh,G., Pedretti, A., Zavattoni, S.A., Barbato,M.C., Haselbacher, A., Steinfeld, D.,(2014), "Desing of A 100 MWh_{th} Packed-Bed Thermal Energy Storage." Energy Procedia, 1071-1077.
- [38] Zanganeh,G., Pedretti, A., Haselbacher, A., Steinfeld, A.,(2015),"Desing of Packed Bed Thermal Energy Storage Systems for High-Temperature Industrial Process Heat", Applied Energy,812-822.
- [39] Strumillo, C. and Kurda, T.,(1986), "Drying: Principles, aplications and Design, Topic in Chemical Engineering, Volume 3, Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- [40] Rahman, M., Perera S. and Thebaund C. O.,(1998),"Desorption Isotherm and Heat Pump Drying Kinetics of Peas", Food Research International,485-491.
- [41] Cemeroglu, B.,(2004), Meyve ve Sebze _İşletme Teknolojisi, 2. Cilt,Başkent Klişe Matbaacılık, Ankara.
- [42] Mujumdar, A.S.,(2000), "Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying (Edited by Sakamon Devahastin)", Chapter 3, Energex Corporation, 38, 39, 43, 44, 58, 59p., Montreal.

- [43] Hawlader, M.N.A., Chou, S.K., Jahangeer, K.A., Rahman, S.M.A., Eugene Lau, K.W., (2003), "Solar-assisted heat-pump dryer and water heater", *Applied Energy*, Volume 74, 186p.
- [44] Sun, L., Islam, Md.R., Ho, J.C. and Mujumdar, A.S.,(2005), " A Diffusion Model for Drying of A Heat Sensitive Solid Under Multiple Heat Input Modes." *Bioresource Technology*, Vol.B,19,1551-1560.
- [45] Başaran, B., Bitlisli, B.O., Sarı, Ö., Özbalta, N. ve Güngör A.,(2004), "Deri Kurutulmasında Yeni Teknolojiler: Isı Pompalı Kurutucular", I. Ulusal Deri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 634-647s. Ege Üniversitesi İzmir.
- [46] Ceylan,İ.,Aktaş,M., Doğan,H.,(2006),"Güneş Enerjili Fırında Elma Kurutulması", *Politeknik Dergisi*, Cilt:9, Sayı:4,S.: 289-294.
- [47] Simal,S.E.,Frau,D.M.,Rossek,C.,(1997),"Simple Modeling of Air Drying Curves of Fresh and Osmotically Pre- Dehydrated Apple Cubes.",*J.Food Eng.*, 33,139-150.
- [48] Hatamipour,M.S.,Mowla,D.,(2002),"Shrinkage of Carrots During Drying in An Inert Medium Fluidized Bed", *J.Food Eng.*, 55, 247-252.
- [49] Datta,A.K.,(2001),"Fundamentals of Heat and Moisture Transport for Microwaveable Food Product and Process," In: Datta,A.K., Anantheswaran,R.C.(Eds.),*Handbook of Microwave Technology for Food Applications*.Marcel Dekker, Inc., NY, USA,pp. 115-172.
- [50] Ranz, W.E., Marshal,W.R.,(1952), "Heat Transfer".In: *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel Dekker,Inc., NY,USA.
- [51] Van Arsdell W.B., Cobley M.J. and Morgan A.I.,(1973)," Food dehydration, AVI Publ."
- [52] Hawlader, M. N. A., Perera, C. O.and Tian M., (2005). "Properties of Modified Atmosphere Heat Pump Dried Foods", *Journal of Food Engineering*
- [53] Perry, R.H., Green, D.W. and Maloney, J.O., (1997). *Chemical Engineering Hand Book*,Mc Graw-Hill.
- [54] Doymaz, İ., and Pala, M., (2002), "Hot-air drying characteristics of red pepper", *Journal of Food Engineering V.*, 55, 331-335p.
- [55] Ertekin, C. and Yıldız, O.,(2004). "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model",*Journal of Food Engineering* 63.349-359p.
- [56] Sacilik, K. and Elicin, A.K., (2006),"The thin layer drying characteristics of organic apple slices." *Journal of Food Engineering* Volume 73, 281-289p.

- [57] Çoban, M.T.,(2008), "Sayısal Çözümleme Ders Notları". E.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.
- [58] Qi-Long, S., Chang-Hu X., Ya Z., Zhao-Jie, L. and Xiang-You, W.,(2008)., "Drying Characteristics of Horse Mackerel (*Trachurus japonicus*) Dried in A Heat Pump Dehumidifier", Jurnal of Food Engineering (84) 12-20p.
- [59] Akpınar, E. K., (2005), "Deneysel Çalışmadaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneyindeki Hata Analizi", Mühendis ve Makina, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Aylık Yayın Organı, Sayı:540, 41, 44-47s.
- [60] Anonymous, (2000), Official Methods for Analysis, 17th ed., Association of Official Analytical Chemists: Arlington, VA.
- [61] Sosle, V., (2002). "A Heat Pump Dehumidifier Assisted Dryer for Agrifoods", McGill University, Department of Agricultural and Biosystems Engineering.
- [62] T.C. Maliye Bakanlığı,(2013), "TIM-Türkiye 2023 Kuru Meyve ve Mamulleri Sektörü'nün Pazar Analizleri".

KURUTMA DENEYİ SONUÇLARI

Kurutma Deneyi No:1

zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	İz Oda Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	İz Oda Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	İz Oda Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	İz Oda Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Çıkışı (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Gümeş İşlemi (W/m²)
10:25	45,1	40,1	46,5	40,8	44,9	43,4	44,6	43,2	45,65	43,96	0,50	3,54	4,19	828
10:35	46	41,1	47,2	41,7	45,8	44,3	45,5	44,2	36,51	40,73	0,34	3,55	3,91	832
10:45	46,8	41,9	48,1	42,5	46,6	45,1	46,4	45	30,56	33,87	0,32	3,54	3,87	846
10:55	47,6	42,7	48,9	43,2	47,5	45,9	47,4	45,8	28,93	30,96	0,37	3,53	3,98	841
11:05	48,9	44	50,2	44,5	48,8	46,2	48,7	47,1	28,59	30,02	0,44	3,54	4,26	852
11:15	50,3	45,4	51,5	45,9	50,1	47,6	50	48,5	27,41	28,67	0,36	3,56	4,2	856
11:25	51,5	46,6	52,7	46,2	51,4	48,8	51,3	49,7	27,2	28,46	0,34	3,55	4,13	865
11:35	53	47,9	54	47,7	52,7	49,2	52,8	51	27	28,18	0,41	3,53	4,01	876
11:45	54,3	49,1	55,2	48,8	54,2	50,5	54,1	52,3	26,27	27,51	0,35	3,54	3,89	884
11:55	54,7	49,5	55,6	49,3	54,8	50,9	54,5	52,7	25,4	26,69	0,68	3,53	4,24	900
12:05	55	49,8	55,9	50,6	55,1	51,7	54,8	53	25,38	26,75	1,25	3,55	4,32	916
12:15	55,3	50	56,1	50,9	55,3	52,1	55,1	53,2	24,71	26,04	1,39	3,53	3,94	935
12:25	55,5	49,7	56	51,7	55,4	52,2	54,8	53,1	25	26,36	1,15	3,54	4,24	950
12:35	55,8	50	56,2	52,6	55,7	52,4	54,9	53,8	24,61	26,02	0,88	3,54	4,05	975
12:45	55,9	50,4	56,3	53,4	55,7	53,2	55	53,9	24,04	25,46	0,65	3,53	4,2	980
12:55	56,1	51,3	56,4	53,6	55,8	54,1	55,4	54,1	23	24,41	0,41	3,54	4,27	1005
13:05	56,2	51,5	56,4	53,7	55,9	53,7	55,2	54	22,33	23,66	0,47	3,55	3,89	985
13:15	56,2	51,1	56,3	54,2	55,6	53,5	55,1	53,7	21,83	23,18	0,4	3,54	4,21	980
13:25	56,1	50,9	56,2	53,9	55,4	53,2	55	53,5	21,23	22,56	0,51	3,54	3,92	960
13:35	55,8	50,6	56	53,7	55,2	53	54,7	53,1	20,4	21,66	0,55	3,53	4,17	950
13:45	55,7	50,4	55,9	53,4	55	52,6	54,5	52,8	20,62	21,94	0,57	3,53	4,01	932
13:55	55,4	50,1	55,7	53,1	54,6	52,3	54,1	52,5	20,33	21,51	0,64	3,53	4,04	915
14:05	55,3	49,9	55,5	52,7	54,3	52	53,9	52,2	20,14	21,35	0,58	3,52	3,97	906
14:15	55,1	49,5	55,4	52,3	54	51,6	53,7	51,9	19,02	20,19	0,75	3,54	4,17	890
14:25	54,7	49,3	55,1	52,1	53,8	51,2	53,4	51,6	17,38	18,52	0,81	3,55	4,12	895
14:35	54,4	49	54,9	51,6	53,3	50,7	53,1	51,2	17,47	18,49	0,79	3,56	4,15	900
14:45	53,9	48,5	54,6	51,2	52,9	50,2	52,8	50,9	17,48	18,52	0,86	3,54	4,07	881
14:55	53,2	47,8	54,1	50,8	52,5	49,6	52,4	50,3	16,81	17,76	0,95	3,55	4,05	860
15:05	52,6	46,9	53,5	50,6	51,7	49,1	52	49,9	16,24	17,09	1,02	3,55	4,17	874
15:15	52,2	46,5	53	50,5	50,8	48,4	51,5	47,6	16,14	16,93	1,16	3,54	4,02	858
15:25	51,7	46,4	52,7	48,2	50,4	47,8	50,5	47,1	15,29	16,12	0,91	3,54	3,98	845
15:35	51,4	46	52,3	47,5	50	47,7	49,7	46,9	14,67	15,32	0,85	3,53	4,13	840
15:45	50,9	45,6	51,8	47,4	49,6	47,2	49,4	46,7	13,96	14,52	0,76	3,55	4,19	824
15:55	50,5	45,2	51,4	47,1	49,3	46,8	49	46,5	13,14	13,95	0,65	3,51	4,02	816
16:05	50,1	45,3	51,1	46,9	48,8	46,5	48,8	46,1	12,95	13,71	0,45	3,52	4,13	800
16:15	49,8	45,2	50,9	47,1	48,7	46,4	48,7	45,8	12,68	13,12	0,35	3,51	4,15	795
16:25	49,6	45	50,8	47	48,5	46,3	48,6	45,6	12,84	13,24	0,52	3,51	4,06	781

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı(gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı(gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı(gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
10:25	14,89	16,12	15,47	20,06
10:55	11,48	12,96	11,65	16,42
11:25	9,83	9,02	8,98	12,54
11:55	6,91	6,56	7,8	9,42
12:25	5,42	5,01	5,96	7,56
12:55	4,12	3,96	4,28	5,74
13:25	3,61	3,32	3,5	4,32
13:55	3,17	2,96	3,09	3,55
14:25	2,95	2,88	2,91	3,1
14:55	2,51	2,34	2,45	2,84
15:25	2,47	2,3	2,38	2,65
15:55	2,42	2,28	2,34	2,58
16:25	2,38	2,26	2,31	2,55
Kurutma Süresi: 6 Saat , 5,8 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:516,64 gr.				

Kurutma Deneyi No:2

Zaman	Kabin Sağ Kum Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kum Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kum Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kum Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%İlağıl Nem Değeri)	Kabin Çıkışı (%İlağıl Nem Değeri)	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m²)
09:55	50,2	48,2	54,6	49,9	53,1	51,7	52,9	51,5	45,31	43,85	0,53	3,74	4,11	725
10:05	51,4	48,4	54,8	50,1	53,3	51,9	53,1	51,8	41,48	43,08	0,35	3,57	4	744
10:15	52,5	48,5	54,8	50,2	53,4	52	53,2	51,9	30,75	32,86	0,32	3,55	4,16	752
10:25	53,1	48,6	54,9	50,2	53,5	52,1	53,2	52,1	28,64	29,9	0,29	3,53	4,08	748
10:35	53,6	48,7	55	50,3	53,6	52,2	53,3	52,2	27,97	29,33	0,34	3,56	4,12	761
10:45	53,8	48,7	55	50,3	53,6	52,2	53,3	52,3	25,1	26,34	0,42	3,57	4,25	774
10:55	53,9	48,9	55,1	50,4	53,7	52,3	53,4	52,4	24,03	25,4	0,51	3,54	4,14	763
11:05	54	49,1	55,2	50,5	53,8	52,4	53,5	52,5	23,17	24,58	0,62	3,55	4,15	770
11:15	54,1	49,2	55,3	50,6	53,9	52,5	53,6	52,6	22,25	23,64	0,65	3,55	3,96	780
11:25	54,2	49,4	55,4	50,7	54	52,6	53,7	52,8	21,96	23,31	0,34	3,58	4,19	786
11:35	54,4	49,5	55,5	50,8	54,1	52,7	53,8	52,9	21,67	23,02	0,43	3,52	4,03	790
11:45	54,5	49,6	55,6	51	54,2	52,8	54	53,1	21,29	22,65	0,54	3,51	4,15	782
11:55	54,6	49,7	55,7	51,1	54,3	53	54,1	53,2	21,07	23,12	0,35	3,53	4,09	821
12:05	54,8	49,8	55,8	51,2	54,4	53,2	54,3	53,3	22,54	23,95	0,72	3,52	4,13	838
12:15	54,9	49,9	55,9	51,4	54,5	53,3	54,4	53,5	22,03	23,43	0,85	3,54	4,02	872
12:25	55,1	50,1	56	51,5	54,6	53,5	54,5	53,7	22,41	23,73	0,81	3,61	4,07	904
12:35	55,2	50,3	56,1	51,6	54,8	53,6	54,6	53,8	21,48	22,8	1,05	3,55	4,11	967
12:40	55,4	50,5	56,2	51,7	54,9	53,7	54,7	54	21,09	22,32	1,23	3,54	4,13	952
12:55	55,5	50,6	56,4	51,9	55	53,8	54,9	54,1	22,15	23,44	1,35	3,53	4,1	964
13:05	55,6	50,8	56,5	52	55,1	54	54,9	54	21,64	23,04	1,43	3,82	4,25	954
13:15	55,4	50,8	56,3	51,9	55	53,9	54,8	53,8	21,13	22,56	1,21	3,59	4,02	948
13:25	55,2	50,7	56,1	51,8	54,8	53,7	54,6	53,7	20,45	21,54	1,1	3,54	3,97	944
13:35	55,1	50,6	55,9	51,6	54,7	53,5	54,5	53,5	20,13	20,96	1,01	3,53	3,93	938
13:45	54,9	50,4	55,8	51,4	54,5	53,3	54,3	53,4	19,81	20,61	1,19	3,55	4,16	930
13:55	54,7	50,3	55,6	51,4	54,3	53,2	54,1	53,3	19,11	19,9	0,96	3,55	3,78	927
14:05	54,5	50,2	55,4	51,1	54,2	53	53,8	53	18,42	19,19	0,91	3,55	4,24	916
14:15	54,2	50	55,1	50,6	53,7	52,5	53,5	52,8	17,24	18,02	0,84	3,53	4,26	909
14:25	54	49,7	54,6	50,4	53,2	52,1	53,4	52,6	17,96	18,64	0,62	3,55	4,16	900
14:35	53,7	49,5	54,1	50,1	52,8	51,6	53	52,2	16,91	17,52	0,56	3,83	4,5	892
14:45	53,2	49,3	53,6	49,8	52,4	51,1	52,8	51,9	17,06	17,62	0,59	3,53	4,02	880
14:55	52,9	49,1	53,1	49,5	51,9	50,5	52,3	51,2	16,07	16,52	0,75	3,68	4,3	872
15:05	52,1	48,8	52,4	49	51	50,1	51,6	50,7	15,56	16,04	0,42	3,53	4,05	864
15:15	51,4	48,2	51,8	48,6	50,4	49,6	51	50,2	15,24	15,81	0,35	3,54	3,92	855
15:25	50,9	48,1	51,2	48,4	50	49,1	50,6	49,5	14,96	15,25	0,56	3,55	4,18	848
15:35	49,7	47,9	50,3	47,8	49,5	48,5	50,4	49,3	14,81	15,02	0,61	3,53	4,22	832
15:45	49,1	47,8	49,2	47,6	48,9	48	49,7	48,8	14,3	14,51	0,47	3,54	4,09	828
15:55	48,4	47,7	48,6	47,5	48,5	47,8	49,1	48,3	13,96	14,08	0,37	3,51	4,17	820

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
09:55	18,48	13,12	18,8	17,58
10:25	15,49	11,26	16,12	15,23
10:55	12,64	9,62	13,24	13,02
11:25	9,56	7,54	10,56	9,98
11:55	7,35	5,87	8,64	8,72
12:25	5,96	4,64	7,25	7,34
12:55	5,28	4,02	6,65	6,51
13:25	4,84	3,43	6,12	5,84
13:55	4,43	2,97	5,82	4,96
14:25	3,94	2,26	5,03	3,87
14:55	3,56	1,99	4,69	3,1
15:25	3,24	1,98	3,87	2,82
15:55	3,19	1,98	3,22	2,56
Kurutma Süresi: 6 Saat , 6,5 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:614,45 gr.				

Kurutma Deneyi No:3

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Çıkışı (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m ²)
11:30	48	42,9	48,3	43,1	47,3	45,7	46,2	44,9	65,39	58,51	0,51	4,06	4,69	986
11:40	49,2	43,8	49,3	44,2	48,6	46,4	47,4	45	40,45	47,31	0,46	3,55	4,36	981
11:50	49,8	44,4	49,9	44,7	49,2	47	48	45,6	32,07	39,32	0,49	3,56	4,23	983
12:00	50,3	44,9	50,3	45,1	49,7	47,5	48,5	46,1	31,02	38,49	0,54	3,54	3,88	978
12:10	50,7	45,2	50,7	45,5	50,1	47,9	48,9	46,5	25,95	44,83	0,44	3,56	4,3	1002
12:20	50,8	45,5	50,8	45,8	50,2	48	49,1	46,6	28,97	42,15	0,52	3,54	4,15	1008
12:30	51,1	46,1	51	46,2	50,3	48,4	49,3	46,9	36,5	40,74	0,43	3,55	3,84	1002
12:40	51,4	46,7	51,3	46,6	50,4	48,9	49,8	47,5	37,89	40,3	0,49	3,58	3,98	1001
12:50	52,1	47,2	51,9	47,4	51	49,5	50,6	48,1	38,2	39,11	0,44	3,56	4,24	995
13:00	53,2	47,6	52,8	47,7	51,5	50,1	51,2	48,8	37,71	38,08	0,65	3,54	3,7	1011
13:10	53,9	48,3	53,5	48,1	51,7	50,4	51,7	49,5	37,58	38,73	0,81	3,55	4,05	1006
13:20	54,5	49,1	54,2	49	52,2	50,8	52	49,9	35,95	36,28	1,12	3,54	3,73	1015
13:30	54,8	49,7	55,1	49,8	53,3	51,6	52,6	50,2	34,84	35,35	1,42	3,54	3,93	1005
13:40	55,2	50,1	55,4	50,3	53,9	52,2	53,1	50,6	33,37	34,48	1,34	3,55	4,25	994
13:50	55,7	50,8	56,2	51,4	54,5	52,8	53,7	51,5	32,93	33,52	1,32	3,56	3,95	997
14:00	56,1	51,4	56,5	51,9	54,6	53,1	54,5	52,7	31,68	32,44	1,35	3,55	4,11	987
14:10	56,5	51,7	57,2	52,3	54,8	53,6	54,6	53	31,02	31,47	1,27	3,55	4,04	1010
14:20	56,8	52,4	58	52,9	54,9	53,7	54,7	53,6	30,42	30,91	1,24	3,53	4	990
14:30	57	53,1	58,5	53,8	55	53,8	54,9	53,8	29,76	30,32	1,13	3,55	4,17	933
14:40	56,7	52,6	58,4	53,5	55,1	54	54,9	54	29,28	29,75	1,21	3,54	4,28	898
14:50	56,5	51,8	57,9	52,9	55	53,9	54,8	53,8	28,61	29,47	1,08	3,53	4,23	872
15:00	56,2	51,6	57,5	52,7	54,8	53,7	54,6	53,7	27,85	28,79	1,19	3,53	4,34	852
15:10	55,9	51,2	57	52,1	54,7	53,5	54,5	53,5	26,59	27,89	1,04	3,54	3,97	839
15:20	55,4	50,4	56,4	51,4	54,5	53,3	54,3	53,4	27,29	27,85	0,97	3,53	4,03	824
15:30	55	50,3	55,6	51,3	54,3	53,2	54,1	53,3	27,11	27,66	0,85	3,54	3,77	802
15:40	54,5	50,2	55,4	51,1	54,2	53	53,8	53	26,65	27,15	0,92	3,55	4,25	798
15:50	54,2	50	55,1	50,6	53,7	52,5	53,5	52,8	26,43	26,99	0,83	3,56	3,97	756
16:00	54	49,7	54,6	50,4	53,2	52,1	53,4	52,6	26,74	27,29	1,03	3,57	4,28	735
16:10	53,7	49,5	54,1	50,1	52,8	51,6	53	52,2	24,45	25,38	0,78	3,55	4,25	724
16:20	53,2	49,3	53,6	49,8	52,4	51,1	52,8	51,9	22,15	22,48	0,76	3,56	4,05	703
16:30	52,8	49,1	53,1	49,5	51,9	50,5	52,3	51,2	20,56	20,95	0,89	3,58	4,31	686
16:40	52,1	48,8	52,4	49	51	50,1	51,6	50,7	19,65	19,96	0,65	3,56	4,02	660
16:50	51,4	48,2	51,8	48,6	50,4	49,6	51	50,2	18,42	18,56	0,74	3,54	4,29	652
17:00	50,9	48,1	51,2	48,4	50	49,1	50,6	49,5	16,45	17,51	0,6	3,56	4,32	624

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
11:30	18,21	16,2	19,16	18,54
12:00	16,04	15,02	17,84	17,21
12:30	14,75	13,86	17,15	15,85
13:00	13,96	13,2	16,12	14,56
13:30	12,36	12,03	15,33	13,58
14:00	8,87	8,65	11,32	9,87
14:30	6,51	6,98	6,96	8,12
15:00	4,93	5,06	5,24	7,04
15:30	4,02	4,31	4,93	6,11
16:00	3,57	3,96	4,32	5,06
16:30	3,14	3,72	3,95	4,01
17:00	2,64	3,4	3,66	3,75
Kurutma Süresi: 5 Saat 30 Dakika, 6,2 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:656,44gr.				

Kurutma Deneyi No:4

zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Çıkışı (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m²)
10:00	43,3	43,3	44	42,2	41,7	43,4	42,6	43,1	43,29	41,45	0,48	3,59	4,41	841
10:10	45	43,8	45,8	44,4	43,9	42,5	44,8	43,1	43,29	41,45	0,48	3,58	3,91	847
10:20	46,4	44,2	47,1	44,8	45,4	44	46,2	44,5	40,91	40,47	0,53	3,56	3,92	851
10:30	47,8	45,7	48,6	48,2	46,8	45,4	47,6	46,9	38,61	38,7	0,42	3,55	4,3	854
10:40	49	46,9	49,7	47,3	47,9	46,5	49,1	48,4	36,86	37,2	0,5	3,55	4,31	865
10:50	49,7	47,5	50,3	47,9	48,6	47,1	49,3	48,6	35,47	35,84	0,67	3,57	4,12	872
11:00	50,7	48,6	51,2	48,8	49,5	48	50,2	49,5	33,69	34,13	0,46	3,56	4,29	882
11:10	51,6	49,4	52	50,6	50,2	48,8	51	50,2	32,15	32,61	0,75	3,56	3,84	891
11:20	52,3	50,9	52,7	51,3	51	49,4	51,7	50,9	30,8	31,26	0,47	3,57	4,28	900
11:30	53,2	51	53,5	51,9	51,7	50,2	52,3	51,5	29,13	29,65	0,41	3,56	4,36	928
11:40	53,9	51,7	54,1	52,6	52,3	50,8	52,7	51,9	27,92	28,5	0,56	3,58	4,03	939
11:50	54,7	52,5	54,9	52,9	53,1	51,6	53,5	52,7	26,52	27,09	0,75	3,55	4,18	957
12:00	55,2	53,1	55,5	53,3	53,6	52	53,9	53,2	25,09	25,65	0,5	3,54	4,36	962
12:10	55,8	53,7	56	53,9	54,2	52,7	54,3	53,7	24,23	24,79	0,82	3,55	4,34	969
12:20	56,7	54,6	56,8	55,1	54,9	53,5	55,2	54,4	22,71	23,2	0,4	3,56	4	972
12:30	57,3	55,3	57,3	55,6	55,5	54,2	56	54,8	21,67	22,23	0,76	3,55	3,87	973
12:40	57,9	55,8	58	56,1	56,2	54,9	56,2	55,3	21,09	21,65	0,91	3,56	4,18	975
12:50	58,4	56,4	58,3	56,4	56,7	55,2	56,4	55,5	20,3	20,84	1,06	3,56	4,33	970
13:00	58,8	56,7	58,6	56,5	57	56	56,6	55,8	19,48	20,03	1,13	3,6	4,28	963
13:10	59	57,1	58,8	57,5	57,3	56,2	56,7	56	19,19	19,75	1,26	3,55	4,2	984
13:20	59,2	57,6	58,9	58	57,4	56,6	56,7	56,1	18,53	19,17	1,41	3,55	4,26	981
13:30	59,3	57,9	59	58,1	57,6	57,1	56,9	56,3	18,14	18,74	1,3	3,55	4,23	976
13:40	59,4	58,1	59,1	58,2	57,8	57,4	57,1	56,5	17,72	18,32	1,36	3,56	4,13	966
13:50	59,5	58,3	59,2	58,3	57,9	57,5	57,3	56,6	17,36	17,88	1,14	3,54	4,17	963
14:00	59,5	58,4	58,9	58	57,9	57,5	57,3	56,6	16,9	17,47	0,99	3,53	3,93	935
14:10	59,5	58,6	59	58,1	57,9	57,5	57,3	56,6	16,71	17,36	0,77	3,55	3,91	915
14:20	59,4	58,5	59	58,1	57,9	57,5	57,3	56,6	16,75	17,39	0,41	3,55	3,83	903
14:30	58,9	58	58,6	57,9	57,7	57	56,6	56,1	18,42	19,08	0,52	3,54	3,9	879
14:40	58,2	57,3	58	57,3	57,1	56,4	56,6	56	18,9	19,74	0,63	3,56	3,87	859
14:50	57,6	56,7	57,3	56,5	56,5	55,9	55,8	54,9	19,09	19,89	0,72	3,57	4,04	828
15:00	56,6	55,9	56,4	55,7	55,6	55,2	55,3	54,6	19,55	20,39	0,51	3,55	3,83	808
15:10	56,6	55,7	56,4	55,8	55,6	55,2	55,3	54,6	18,71	19,56	0,42	3,55	4,25	790
15:20	56,1	55,2	55,8	55,2	55,3	54,9	54,9	54,2	18,43	19,09	0,46	3,54	4,07	779
15:30	55,6	54,7	55,3	54,7	54,9	54,4	54,5	53,8	19,28	20,04	0,39	3,55	4,28	781
15:40	55,2	54,5	54,9	54,3	54,5	54	54,1	53,5	19,57	20,32	0,42	3,56	3,91	761
15:50	55	54,1	54,7	54,2	54,3	53,9	53,9	53,3	19,85	20,52	0,47	3,56	4,24	767
16:00	54,8	54	54,5	53,9	54,1	53,7	53,8	53,1	19,95	20,61	0,45	3,57	4,12	742

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
10:00	12,1	12,04	9,99	12,2
10:30	9,54	9,28	7,52	9,69
11:00	7,56	7,32	6,52	7,64
11:30	6,74	6,42	5,82	6,81
12:00	5,41	5,29	5,01	5,56
12:30	4,32	4,13	3,97	4,51
13:00	3,52	3,31	3,17	3,46
13:30	3,13	3,02	2,95	3,06
14:00	2,87	2,44	2,24	2,34
14:30	2,51	2,06	1,99	2,11
15:00	2,25	1,75	1,68	1,96
15:30	1,94	1,41	1,52	1,81
16:00	1,8	1,36	1,49	1,77
Kurutma Süresi: 6 Saat , 6,1 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:585,60 gr.				

Kurutma Deneyi No:5

zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Çıkışı (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m²)
10:10	38,5	34,3	39,2	38,2	36,9	36,5	37	36,8	43,68	42,15	0,62	3,61	4,41	800
10:20	39,4	35,5	39,7	38,4	38,5	38,2	38,5	38,3	43,33	42,33	0,46	3,59	4,16	818
10:30	41,2	36,8	41,4	39,2	40,3	38,9	40,3	40	39,86	40,46	0,51	3,6	4,3	835
10:40	42,1	37,6	42,3	40,1	41,3	39,9	41,2	40,9	39,29	39,57	0,49	3,59	3,85	852
10:50	43,4	38,4	43,5	41,8	42,5	41,1	42,4	42	37,56	38,08	0,53	3,6	4,26	863
11:00	44,6	39,4	44,8	42,5	43,5	42,1	43,5	43,1	36,54	36,69	0,48	3,61	3,89	878
11:10	46	40,4	46,1	43,7	44,8	43,3	44,7	44,3	34,25	35,19	0,5	3,59	4,33	903
11:20	47,1	41,2	47,3	44,9	45,9	44,5	45,8	45,4	32,16	32,54	0,53	3,58	3,79	940
11:30	48,1	42,1	48,3	45,9	46,8	45,4	46,8	46,3	31,46	31,94	0,47	3,59	4,29	943
11:40	48,9	42,7	49	46,6	47,6	46,1	47,5	46,9	30,28	30,56	0,43	3,58	4,15	901
11:50	49,5	42,9	49,5	47,1	48,1	46,6	48	47,3	29,74	29,96	0,53	3,6	3,88	920
12:00	50,2	43,4	50,2	47,8	48,8	47,3	48,6	48	28,64	28,8	0,45	3,59	4,34	945
12:10	50,4	43,8	50,5	48	49	47,6	48,9	48,4	28,53	28,63	0,49	3,6	4,42	930
12:20	51,6	44,6	51,6	49,1	50	48,6	49,8	49,2	27,74	27,82	0,65	3,59	4,43	921
12:30	52,3	45	52,3	49,7	50,7	49,3	50,4	49,6	26,54	27,05	0,44	3,58	4,18	915
12:40	53	45,5	52,9	50,3	51,4	50	51,1	50,3	25,49	25,97	0,54	3,57	3,91	908
12:50	53,6	46,1	53,5	50,9	52	51,7	52,7	51,8	24,32	24,67	0,83	3,58	4,21	923
13:00	53,5	46	53,5	51	52,2	50,8	51,8	50,9	23,3	23,66	0,95	3,6	4,25	904
13:10	54,4	46,7	54,2	51,6	52,6	51,3	52,3	51,5	22,88	23,12	1,08	3,59	4,11	916
13:20	54	46,5	53,6	52,1	52,8	51,5	52,5	51,6	21,83	22,16	1,2	3,59	4,23	910
13:30	55	47,2	54,7	53	53,2	51,9	52,8	52	20,24	20,52	0,93	3,6	3,84	896
13:40	53,9	46,7	53,6	52,5	53,1	51,7	52,7	51,8	20,23	20,7	1,07	3,58	4,31	924
13:50	53,4	46,3	52,9	51,4	52,4	51,1	52	51,1	20,03	20,42	0,82	3,59	3,8	919
14:00	53,7	46,3	53,3	51,7	52,4	51,2	52	51,1	19,19	19,66	0,74	3,6	4,11	941
14:10	54,8	47,1	54,4	52,1	53,1	51,8	52,5	51,7	19,02	19,47	0,65	3,59	4,35	911
14:20	55,5	47,6	55	53,3	53,8	52,5	53,2	52,3	18,98	19,32	0,85	3,57	4,25	925
14:30	55,9	48,2	55,5	52,7	54,5	53	53,8	52,9	17,86	18,23	0,55	3,59	4,26	886
14:40	55,9	48,1	55,4	52,5	54,5	53,2	53,8	52,9	17,51	18,04	0,47	3,57	3,85	836
14:50	55,9	48,1	55,4	52,7	54,5	53,3	53,8	52,9	16,7	17,09	0,43	3,58	4,02	901
15:00	55	47,4	55	52,1	54,3	53	53,7	52,8	16,53	16,96	0,48	3,56	4,09	876
15:10	55,3	47,7	54,9	52,6	54,2	52,9	53,6	52,7	16,43	16,8	0,56	3,59	4,13	864
15:20	55,3	47,7	54,8	53,1	54,2	53	53,6	52,5	16,05	16,61	0,41	3,58	4,3	810
15:30	55	47,6	54,4	52,8	53,9	52,6	53,3	52,4	15,96	16,52	0,47	3,56	3,79	902
15:40	54,5	47,3	53,8	52,2	53,5	52,3	52,9	51,9	15,86	16,42	0,49	3,58	4,28	879
15:50	53,9	46,8	53,3	51,7	53	51,9	52,4	51,4	15,77	16,33	0,53	3,57	4,07	874
16:00	52,9	46,1	52,3	51,4	52,1	51,3	51,6	50,7	15,87	16,43	0,44	3,59	4,21	812
16:10	52,8	46,1	52,2	51,3	52	51,1	51,5	50,6	15,96	16,52	0,47	3,57	3,84	867

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm
10:10	14,1	13,51	13,8	13,89
10:40	11,82	12,17	12,14	12,51
11:10	10,56	10,83	10,4	11,13
11:40	8,06	8,8	8,19	8,77
12:10	5,55	6,76	5,97	6,41
12:40	4,39	5,63	4,82	5,21
13:10	3,23	4,49	3,67	4,01
13:40	2,77	3,74	3,03	3,38
14:10	2,31	2,98	2,38	2,75
14:40	2,24	2,66	2,23	2,61
15:10	2,18	2,38	2,04	2,46
15:40	2,15	2,33	2,01	2,43
16:10	2,14	2,26	1,98	2,41
Kurutma Süresi : 6 Saat 30 Dakika , 7 kg yağ üründen kalan toplam ağırlık:706,19 gr.				

Kurutma Deneyi No:6

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Çıkışı (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m ²)
09:50	38	34,4	39,2	36,2	36,7	36,3	36,9	36,5	43,07	39,30	0,68	3,60	4,19	921
10:00	39,4	36	40,1	36,8	38,5	38,1	38,7	36,7	40,81	39,39	0,46	3,59	4,26	940
10:10	40,7	37,1	41,4	37,2	40	39,6	40,1	37,1	38,05	38,35	0,52	3,6	3,84	953
10:20	42	37,8	42,7	38,4	41,2	40,8	41,3	37,9	36,84	37,01	0,47	3,58	3,86	941
10:30	43,2	38,8	43,8	39,5	42,3	41,9	42,3	38,9	35,65	36,12	0,53	3,59	4,26	952
10:40	44,3	39,6	44,9	40,1	43,3	42,9	43,3	40,7	33,75	34,29	0,44	3,6	4,11	961
10:50	45	40,1	45,5	41,1	43,9	43,5	43,9	41,3	32,06	32,63	0,52	3,58	4,35	984
11:00	46	41	46,5	42,1	44,9	44,4	44,8	42,1	30,85	31,46	0,48	3,58	4,22	996
11:10	46,8	41,5	47,3	42,9	45,6	45,1	45,5	42,8	28,9	29,56	0,53	3,59	4,2	1007
11:20	48,2	42,5	48,5	43,1	46,8	46,3	46,7	43,4	28,06	28,8	0,5	3,58	4,37	1011
11:30	48,6	43	48,9	43,5	47,2	46,7	47,1	43,7	26,24	26,88	0,49	3,58	3,94	1013
11:40	49,2	43,5	49,5	44	47,8	47,2	47,6	43,9	22,97	23,56	0,53	3,59	4,12	1017
11:50	50	44,1	50,2	44,7	48,4	47,9	48,2	44,5	24,29	24,99	0,47	3,58	3,98	1005
12:00	50,8	44,8	50,9	45,4	49,2	48,6	49	45,2	23,1	23,78	0,43	3,59	4,17	1007
12:10	51,2	45,2	51,5	46	49,6	49,1	49,5	45,5	22,91	23,66	0,65	3,58	3,86	996
12:20	51,6	45,7	52	46,5	50	49,6	49,5	46,2	22,05	22,7	0,52	3,58	3,91	982
12:30	52,2	46,4	52,9	47,3	51,6	50,9	50,4	47,1	21,38	22,04	0,73	3,58	3,79	968
12:40	53	47,1	53,5	47,9	52,6	51,7	51,3	47,6	21,29	21,98	0,85	3,58	4,17	964
12:50	53,7	48	54,3	48,2	53,7	53	52,4	47,8	23,36	23,64	0,91	3,6	3,99	958
13:00	53,5	48	54,3	49,2	53,7	53	52,4	48,3	22,88	23,12	0,94	3,58	4,25	936
13:10	54,4	48,6	55	49,8	54,5	54	53,2	48,7	21,83	22,16	1,02	3,6	4,36	930
13:20	54	48,8	55,1	50	54,6	54,2	53,4	49,3	20,24	20,52	1,15	3,58	4,18	940
13:30	55,2	49,6	55,8	50,5	55,2	54,8	54,1	49,8	20,23	20,7	1,25	3,58	4,24	945
13:40	55,4	50	56	51,2	55,4	55	54,3	50,7	20,03	20,42	1,37	3,58	4,21	960
13:50	55,4	50,2	56,1	51,8	55,4	55	54,3	51,2	19,19	19,66	1,17	3,61	4,36	972
14:00	56,5	51,1	56,8	52,8	55,8	55,5	54,8	52,1	19,02	19,47	1,04	3,59	4,23	965
14:10	56,5	51,1	56,8	53,5	55,8	55,5	54,8	53,1	17,86	18,23	1	3,58	4,17	963
14:20	57,6	51,3	57,9	53,8	56,7	56,5	55,8	53,5	17,48	18,09	0,96	3,58	4,31	970
14:30	58,2	51,4	58,3	54,4	57,2	57	56,4	53,8	16,53	17	0,85	3,6	3,95	950
14:40	59	51,4	57,7	55,7	57,4	57,1	56,6	54,7	16,43	16,8	0,86	3,59	4,35	940
14:50	58,4	51	57,7	56	57,2	57	56,4	55,5	13,2	13,75	0,71	3,57	4,25	945
15:00	58,4	51,1	57,7	56,2	57,2	57	56,4	55,5	13,18	13,76	0,49	3,59	4,26	940
15:10	58,3	50,9	57,6	56,3	57	56,8	56,2	55,3	13,1	13,75	0,51	3,6	3,89	938
15:20	57,7	50,5	57,1	55,8	56,6	56,3	55,8	54,8	13,31	13,95	0,41	3,59	4,22	927
15:30	57,1	50,1	56,4	55,1	56	55,7	55,3	54,3	13,58	14,14	0,44	3,57	4,06	922
15:40	56,5	49,8	55,8	54,2	55,5	55,3	54,8	53,8	13,58	14,15	0,47	3,58	4,25	908
15:50	55,8	49,2	55,2	53,6	54,9	54,7	54,2	53,3	13,48	14,08	0,52	3,57	3,95	875
16:00	55,5	49	54,8	53,3	54,6	54,4	53,9	53,1	13,67	14,23	0,42	3,58	4,17	844

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm
09:50	11,96	15,89	12,77	19,55
10:20	10,2	14,1	10,59	16,62
10:50	8,41	12,19	8,4	13,7
11:20	7,11	10,51	6,91	11,51
11:50	5,8	8,83	5,42	9,32
12:20	5,13	7,24	4,73	8,02
12:50	4,45	5,65	4,03	6,72
13:20	3,78	4,89	3,61	5,48
13:50	3,12	4,14	3,18	4,24
14:20	2,6	3,43	2,74	3,81
14:50	2,07	2,73	2,29	3,38
15:20	2,04	2,65	2,26	3,31
16:00	2,01	2,56	2,24	3,25
Kurutma Süresi: 6 Saat 10 Dakika , 7,3 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:801,66 gr.				

Kurutma Deneyi No:7

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Çıkışı (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m ²)
09:25	40,5	35,9	41,7	36,3	38,1	37,6	38,4	36,5	43,29	35,21	0,66	3,60	4,39	800
09:35	41,5	37,3	42	36,7	40,4	40	40,5	37,5	41,63	37,48	0,5	3,59	3,91	812
09:45	42,4	38,4	42,8	37,6	41,4	41	41,5	37,9	35,92	36,34	0,55	3,6	4,22	824
09:55	43,4	39,1	43,7	38,5	42,4	42	42,5	38,5	35,45	35,79	0,48	3,58	4,01	852
10:05	45,2	40,4	45,3	39,1	44,1	43,7	44,1	38,8	32,44	32,7	0,45	3,59	4,13	864
10:15	45,8	41,1	45,9	40,7	44,6	44,2	44,7	39,4	31,8	32,21	0,52	3,6	4,25	891
10:25	46	40,7	46,5	41,2	45,4	45	45,4	41	28,2	28,72	0,46	3,58	4,02	905
10:35	46,6	41,4	46,8	41,5	45,5	45,1	45,4	41,5	28,42	28,99	0,48	3,58	3,88	925
10:45	47,9	42,5	47,9	42,5	46,6	46,1	46,5	42	25,95	26,59	0,51	3,59	4,26	932
10:55	48,4	42,7	48,4	43	47	46,5	46,9	42,7	25,72	26,42	0,43	3,58	3,91	936
11:05	48,9	43,1	48,9	43,5	47,5	47	47,3	43,1	24,91	25,61	0,5	3,58	4,33	944
11:15	50,1	44,2	50	44,6	48,6	48,1	48,4	44,3	22,85	23,57	0,46	3,59	4,08	951
11:25	50,7	44,5	50,6	45,2	49,2	48,6	48,9	45,1	21,19	21,75	0,61	3,58	4,43	994
11:35	51,3	45	51,2	45,7	49,7	49,2	49,4	45,7	21,39	22,04	0,54	3,59	3,76	950
11:45	51,9	45,4	51,7	46,2	50,2	49,6	49,9	46,5	21,26	21,88	0,75	3,58	4,4	942
11:55	52,6	46	52,4	46,8	50,9	50,3	50,5	47	20,05	20,94	0,96	3,58	3,85	944
12:05	53,5	46,6	53,1	47,6	51,6	51,1	51,2	47,5	19,94	19,81	1,02	3,58	4,28	935
12:15	54,3	47,1	53,8	48,3	52,5	52	52	48,1	18,64	19,13	1,13	3,58	3,76	931
12:25	54,9	47,8	54,5	48,9	53	52,5	52,6	48,7	17,56	18,08	1,42	3,6	4,06	923
12:35	55,4	48,1	54,9	49,3	53,4	52,8	53	49,3	15,38	16,04	1,21	3,58	4,11	945
12:45	55,8	48,7	55,3	49,7	53,8	53,3	53,4	50,5	15,29	15,95	1,28	3,6	3,9	956
12:55	56,2	48,8	55,6	50,2	54,3	53,9	53,8	50,7	14,24	14,87	1,03	3,58	4,14	957
13:05	56,8	49,3	56,1	51,1	54,9	54,5	54,2	51,5	13,87	14,34	0,87	3,58	4,21	945
13:15	57,1	49,8	56,4	51,5	55,2	54,8	54,5	52,1	13,2	13,85	0,95	3,58	3,88	936
13:25	57,4	50,1	56,7	51,8	55,6	55,2	54,8	52,6	13,19	13,76	0,76	3,61	3,93	956
13:35	57,8	50,5	57	52,1	56	55,6	55,2	53,3	13,11	13,75	0,7	3,59	3,74	924
13:45	57,7	50,3	57,1	52,4	56,2	55,8	55,3	53,7	13,02	13,66	0,48	3,58	3,88	932
13:55	58	50,3	57,2	53,5	56,2	55,8	55,4	54,5	12,94	13,56	0,5	3,58	4,21	941
14:05	58	50,4	57,4	54,1	56,2	55,8	55,5	54,5	12,91	13,55	0,42	3,6	3,91	942
14:15	58,3	50,7	57,6	54,5	56,6	56,2	55,9	55	12,01	12,61	0,49	3,59	4,04	952
14:25	58,3	50,8	57,7	55	56,6	56,3	56	55	11,96	12,6	0,51	3,57	4,13	970
14:35	57,6	50,2	57,3	55,3	56,4	56,1	55,7	54,7	11,86	12,52	0,39	3,59	4,02	965
14:45	57,7	50,4	57,3	55,5	56,4	56,1	55,7	54,7	11,78	12,4	0,54	3,6	3,98	959
14:55	57,7	50,3	57	55,3	56,3	56	55,6	54,6	11,76	12,32	0,46	3,59	4,19	933
15:05	57,5	50,2	56,7	55,1	56,2	55,9	55,4	54,6	11,96	12,52	0,38	3,57	4,05	960
15:15	57,3	50,2	56,6	54,9	56,1	55,9	55,4	54,5	11,58	12,14	0,44	3,58	4,11	961
15:25	56,4	49,6	55,7	54,2	55,4	55,2	54,7	53,8	11,64	12,14	0,53	3,57	4,08	977
15:35	55,9	49	55,3	53,7	55	54,7	54,4	53,3	11,01	11,57	0,45	3,58	4,25	967
15:45	55,3	48,7	54,6	53,1	54,4	54,1	53,7	52,9	10,98	11,56	0,52	3,59	3,94	948
15:55	54,5	48,3	53,9	52,4	53,7	53,3	53,1	52,3	10,81	11,43	0,41	3,61	4,12	942
16:05	54	48	53,4	51,9	53,3	52,9	52,7	52	10,75	11,32	0,47	3,58	4,23	974

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm
09:25	13,8	17,7	14,53	19,46
09:55	11,76	15,17	11,94	17,27
10:25	9,72	12,64	9,34	15,08
10:55	7,98	10,18	7,15	12,95
11:25	6,25	7,72	4,96	10,81
11:55	4,78	5,85	3,84	8,76
12:25	3,25	3,97	2,72	6,7
12:55	2,87	3,55	2,63	5,61
13:25	2,48	3,17	2,53	4,53
13:55	2,45	3,13	2,52	4,17
14:25	2,4	3,08	2,5	3,82
14:55	2,35	3,05	2,49	3,45
15:25	2,28	3,03	2,47	3,07
16:05	2,27	3,02	2,47	3,05
Kurutma Süresi: 6 Saat 40 Dakika, 6,9 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:679,52 gr.				

Kurutma Deneyi No:8

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Çıkışı (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m ²)
09:30	39,6	35,9	40,6	36,6	38,2	37,7	38,4	36,5	45,18	35,16	0,70	3,59	4,41	901
09:40	41,1	37,3	41,4	37,1	40,1	39,7	40,2	37,2	43,46	38,44	0,55	3,58	3,91	910
09:50	42,8	38,7	43	37,7	41,8	41,4	41,9	37,8	38,99	39,87	0,48	3,56	3,92	935
10:00	44,9	40,3	45,1	38,7	43,8	43,4	43,9	38,7	36,64	36,97	0,45	3,55	4,3	921
10:10	45,5	40,8	45,6	39,3	44,4	44	44,5	39,4	35,64	36,06	0,52	3,55	4,31	930
10:20	46,3	41,4	46,9	40,1	45,2	44,9	45,3	40,9	34,6	35,15	0,49	3,57	4,12	941
10:30	46,9	42	47,1	40,8	46	45,6	46	41,2	32,32	33,1	0,51	3,56	4,29	945
10:40	47,5	42,6	47,6	41,3	46,4	46	46,4	42,1	31,77	35,53	0,54	3,56	3,84	951
10:50	49,2	43,6	49,3	41,8	47,9	47,5	47,9	42,6	28,42	29,11	0,46	3,57	4,28	954
11:00	49,9	44,1	49,9	43,3	48,4	48	48,4	44,1	28,58	29,3	0,48	3,56	4,36	958
11:10	50,5	44,6	50,6	44,5	49,1	48,7	49	44,7	28,89	29,79	0,52	3,58	4,03	959
11:20	51,6	45,6	51,7	46	50,1	49,7	50,1	46,3	26,53	27,39	0,42	3,55	4,18	976
11:30	52	45,8	52,1	46,3	50,5	50	50,5	47	26,05	26,9	0,56	3,54	4,36	975
11:40	52,3	46,4	52,4	47,1	50,9	50,4	50,8	47,4	25,3	26,15	0,49	3,55	4,34	983
11:50	53	46,5	53	48,1	51,6	51,1	51,3	48,3	24,05	24,81	0,64	3,56	4	987
12:00	53,7	47	53,5	48,6	52,1	51,5	51,8	49,2	23,58	24,42	0,57	3,55	3,87	984
12:10	54,3	47,4	54,1	49,1	52,6	52,1	52,3	49,7	21,03	21,91	0,72	3,56	4,18	989
12:20	55,2	48,4	54,9	49,9	53,5	52,9	53,1	50,4	20,24	21,09	0,92	3,56	4,33	978
12:30	55,8	48,7	55,5	50,6	54	53,5	53,7	51,1	19,37	20,22	1	3,6	4,28	982
12:40	56,1	49,3	56	51,2	54,8	54,3	54,4	51,7	18,63	19,47	1,13	3,55	4,2	985
12:50	57	50	56,6	51,6	55,2	54,7	54,8	52,1	18,26	19,09	1,26	3,55	4,26	979
13:00	57,6	50,3	57,1	52	55,7	55,2	55,2	52,3	16,96	17,78	1,07	3,55	4,23	982
13:10	57,7	50,3	57,1	53	55,8	55,2	55,2	53,3	16,44	17,14	1,31	3,56	4,13	987
13:20	57,9	50,4	57,3	53,2	56	55,4	55,3	53,7	15,68	16,42	1,27	3,54	4,17	966
13:30	58,1	50,5	57,4	53,3	56,1	55,6	55,5	54,1	14,72	15,47	0,97	3,53	3,93	974
13:40	58,4	50,9	57,8	53,7	56,6	56	55,8	54,9	14,34	15,01	0,89	3,55	3,91	986
13:50	58,5	51	57,8	54,1	56,7	56,2	56	55	14,15	14,8	0,8	3,55	3,83	1000
14:00	58,3	50,7	57,8	54,6	56,7	56,2	56	55	13,77	14,51	0,66	3,54	3,9	1002
14:10	58,3	50,7	57,8	54,9	56,7	56,2	56	55	13,1	13,75	0,81	3,56	3,87	1000
14:20	58,3	50,9	57,8	55,6	56,7	56,2	56	55	13,2	13,95	0,75	3,57	4,04	995
14:30	58,3	50,9	57,8	55,5	56,7	56,2	56,1	55	13,1	13,84	0,85	3,55	3,83	976
14:40	58,4	51	57,8	55,7	56,7	56,4	56,1	55,2	13	13,75	0,61	3,55	4,25	977
14:50	57,9	50,4	57,3	55,3	56,8	56,4	56,2	55,2	13,03	13,74	0,52	3,54	4,07	980
15:00	57,9	50,6	57,3	55,1	56,8	56,4	56,2	55,2	12,82	13,47	0,45	3,55	4,28	984
15:10	57,9	50,9	57,3	55	56,8	56,4	56,2	55,2	12,91	13,66	0,48	3,56	3,91	976
15:20	57,9	50,7	57,2	54,8	56,7	56,4	56,1	55,1	13,01	13,75	0,41	3,56	4,24	967
15:30	57,5	50,7	56,8	54,7	56,4	56,4	55,9	54,9	12,34	12,97	0,44	3,57	4,12	960
15:40	57,4	50,5	56,6	54,5	56,3	56,1	55,8	54,9	12,44	13,09	0,52	3,58	4,25	952
15:50	56,9	50,3	56,2	54,4	56	55,7	55,4	54,4	12,52	13,19	0,4	3,59	3,94	912
16:00	56	49,7	55,2	53,8	55,1	54,8	54,6	53,8	12,62	13,19	0,49	3,61	4,12	923
16:10	55,7	49,5	55	53,5	54,8	54,5	54,4	53,6	12,89	13,57	0,43	3,58	4,23	924

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
09:30	16,05	15,86	16,99	12,97
10:00	13,14	13,69	14,09	10,88
10:30	10,22	11,51	11,19	8,79
11:00	8,02	9,55	8,88	7,14
11:30	5,81	7,59	6,57	5,48
12:00	4,51	6,19	5,33	4,49
12:30	3,19	4,78	4,08	3,49
13:00	2,88	3,89	3,71	3,01
13:30	2,57	2,99	3,31	2,53
14:00	2,54	2,83	3,27	2,48
14:30	2,52	2,71	3,22	2,44
15:00	2,49	2,68	3,19	2,41
15:30	2,46	2,64	3,18	2,4
16:10	2,45	2,62	3,15	2,39
Kurutma Süresi: 6 Saat 40 Dakika , 7,1 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:752,06 gr.				

Kurutma Deneyi No:9

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Çıkışı (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m²)
09:40	42,1	36,8	43,4	39,8	39	38,5	39,2	36,5	42,52	33,18	0,51	3,54	4,19	829
09:50	43,3	38,7	43,5	40,3	42	41,7	42,1	38,1	39,02	36,25	0,6	3,55	3,91	834
10:00	44,7	39,9	44,8	41,6	43,5	43,1	43,5	40,4	35,01	35,79	0,47	3,54	3,87	841
10:10	46,1	41,2	46,3	42,2	45	44,6	45	41,9	33,77	33,97	0,51	3,53	3,98	877
10:20	47,5	42,3	47,5	43,4	46,2	45,9	46,3	43,1	31,49	34,77	0,48	3,54	4,26	891
10:30	48,9	43,2	48,9	44,7	47,5	47,2	47,6	44,2	30,33	32,72	0,43	3,56	4,2	914
10:40	49,6	43,9	49,6	45,4	48,3	47,9	48,3	44,9	28,82	32,29	0,49	3,55	4,13	925
10:50	50,4	44,4	50,3	46,1	49	48,6	48,9	45,6	26,82	31,3	0,51	3,53	4,01	948
11:00	51,2	45,1	51,1	46,8	49,7	49,3	49,7	46,2	26,91	31,33	0,45	3,54	3,89	959
11:10	51,9	45,7	51,8	47,5	50,4	50	50,3	46,9	25,49	28,14	0,53	3,53	4,24	971
11:20	52,6	46,2	52,5	51,1	50,6	51	50,6	47,5	24,74	26,5	0,65	3,55	4,32	972
11:30	53,1	46,7	53	49,7	51,6	51	51,5	48	23,85	25,7	0,52	3,53	3,94	974
11:40	53,8	47,3	53,7	50,3	52,2	51,6	52,1	48,6	23,28	24,06	0,73	3,54	4,24	981
11:50	54,5	47,7	54,4	51	52,9	52,2	52,8	49,3	23	23,75	0,87	3,54	4,05	977
12:00	55,2	48,3	55	51,7	53,5	52,9	53,4	50,8	22,24	23,18	0,69	3,53	4,2	975
12:10	55,4	48,4	55,2	52,1	53,7	53	53,6	51,5	22,11	22,98	1,06	3,54	4,27	996
12:20	55,8	48,8	55,6	52,6	54	53,3	53,9	52,2	21,95	22,89	1,32	3,55	3,89	993
12:30	56,1	49	55,9	53,1	54,3	53,6	54,2	52,6	21,38	22,32	1,51	3,54	4,21	1000
12:40	56	49	55,8	53,3	54,3	53,6	54,2	53,1	20,9	21,94	1,43	3,54	3,92	988
12:50	56,9	49,9	56,6	53,5	55,2	54,6	54,9	53,2	19,76	20,79	1,24	3,53	4,17	990
13:00	57,2	50,2	56,8	53,4	55,4	54,9	55,1	53,5	19,76	20,62	1,08	3,53	4,01	980
13:10	57,4	50,2	57,1	53,5	55,7	55,2	55,4	53,6	17,57	18,42	0,97	3,53	4,04	995
13:20	58	50,8	57,5	53,9	56,2	55,8	55,8	54	17,2	17,95	0,86	3,52	3,97	981
13:30	58,2	50,9	57,7	54,1	56,5	56,1	56	54,2	16,84	17,66	0,93	3,54	4,17	987
13:40	58,1	50,8	57,6	54,3	56,8	56,4	56,1	54,4	15,57	16,3	0,84	3,55	4,12	977
13:50	58,4	51	57,8	54,7	56,8	56,4	56,2	55	14,43	15,09	0,8	3,56	4,15	984
14:00	58,5	51,3	57,9	54,9	57	56,6	56,4	55,2	14,45	15,19	0,63	3,54	4,07	981
14:10	58,5	51,3	57,9	55,3	57	56,6	56,4	55,5	14,53	15,28	0,68	3,55	4,05	966
14:20	58,5	51,2	57,9	55,3	57	56,6	56,4	55,5	14,72	15,48	0,56	3,55	4,17	952
14:30	58,4	51,2	57,8	55,2	57	56,6	56,4	55,5	14,91	15,75	0,51	3,54	4,02	965
14:40	58	50,9	57,4	54,8	56,8	56,5	56,1	55,3	15,29	16,05	0,41	3,54	3,98	945
14:50	57,5	50,6	56,9	54,4	56,5	56,1	55,7	55	15,38	16,14	0,59	3,53	4,13	940
15:00	57,1	50,3	56,5	54	56,1	55,8	55,4	54,6	15,29	15,96	0,42	3,55	4,19	960
15:10	56,8	50,1	56,2	53,6	55,9	55,6	55,1	54,4	15,11	15,85	0,57	3,51	4,02	942
15:20	56	49,6	55,4	52,9	55,1	54,8	54,5	53,8	15,2	15,92	0,49	3,52	4,13	950
15:30	55,5	49,2	55	52,5	54,7	54,4	54,2	53,5	15,85	16,36	0,47	3,51	4,15	940
15:40	53,8	47,9	53,8	52	53,6	53,3	53	52,3	15,29	15,95	0,41	3,51	4,06	942
15:50	53	46,6	53,4	51,7	53,1	52,8	52,5	52,1	12,44	13,09	0,52	3,58	4,25	935
16:00	52,5	46,2	53	51,5	52,7	52,3	51,2	50,8	12,52	13,19	0,4	3,59	3,94	920
16:10	51,8	45,9	52,2	51	51,6	51,2	50,8	50,4	12,62	13,19	0,49	3,61	4,12	900

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 10mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 8mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm
09:40	32,03	18,1	26,17	17,41
10:10	28,57	15,29	22,09	14,06
10:40	25,1	12,49	18,01	10,71
11:10	22,58	10,55	15,41	8,46
11:40	20,05	8,6	12,82	6,21
12:10	17,89	7,08	10,81	5,11
12:40	15,73	5,55	8,8	4,01
13:10	14,11	4,79	6,11	3,82
13:40	12,49	4,03	6,52	3,63
14:10	11,39	3,85	6,11	3,59
14:40	10,3	3,68	5,68	3,56
15:10	9,21	3,57	5,36	3,53
15:40	8,12	3,46	5,03	3,51
16:10	7,63	3,43	4,98	3,51
Kurutma Süresi: 6 Saat 30 Dakika, 7,3 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:832,7 gr.				

Kurutma Deneyi No:10

Zaman	Kabin Sağ Kum Girij Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kum Girij Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	İsı Odası Sağ Kum Girij Sıcaklığı(°C)	İsı Odası Sağ Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	İsı Odası Sol Kum Girij Sıcaklığı(°C)	İsı Odası Sol Kum Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girij (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Çıkış (%Bağıl Nem Değeri)	Kabin Girij Hava Hızı (m/s)	Kabin Çıkış Hava Hızı (m/s)	Kabin Girij Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkış Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınım (w/m²)
10:00	39,8	34,5	41,4	36,4	38,5	38,4	39	38,1	40,12	30,47	3,14	2,52	3,60	4,10	936
10:10	40,2	35,2	41,4	36,9	39,9	39,5	40	39,1	33,43	35,48	3,11	2,43	3,59	3,65	975
10:20	41,9	36,6	42,7	37,8	41,8	41,4	41,8	39,8	35,5	38,03	3,21	2,34	3,58	3,7	981
10:30	43,8	37,9	44,5	38,6	43,6	43,2	43,6	41,5	34,91	38,99	3,17	2,28	3,59	4	990
10:40	45,1	38,6	45,9	39,9	44,9	44,5	44,9	40,8	34,13	39,24	3,1	2,26	3,6	3,68	995
10:50	46,9	39,2	47,7	40,6	46,5	46,2	46,6	43,4	32,56	40,94	3,32	2,23	3,58	4,07	1003
11:00	47,3	40,3	48,3	41,1	47,1	46,7	47,1	45,8	31,01	41,03	3,25	2,01	3,6	4,17	1000
11:10	48,5	41,1	49,1	41,9	48	47,6	47,9	46,6	29,83	41,15	3,07	1,86	3,59	4,3	997
11:20	49,4	41,7	50	42,7	48,8	48,4	48,7	47,3	29,54	42,28	2,99	1,74	3,59	4,2	985
11:30	50,5	42,5	51	43,6	49,7	49,3	49,6	47,8	28,95	43,04	2,98	1,59	3,57	3,76	986
11:40	51,7	42,9	52,2	44,1	50,8	50,4	50,7	48,4	28,61	43,56	2,84	1,64	3,59	3,81	981
11:50	52,9	43,3	53,3	44,9	51,8	51,4	51,7	49,3	28,11	44,04	2,75	1,41	3,58	3,86	983
12:00	53,8	44	54,2	45,7	52,7	52,2	52,6	50,5	27,99	43,65	2,69	1,48	3,6	4,16	978
12:10	54,6	44,6	55	46,5	53,4	53	53,3	50,8	27,71	42,04	2,68	1,32	3,58	4,21	1002
12:20	55,6	45,4	55,8	47,3	54,3	53,8	54,1	51,7	26,81	41,28	2,72	1,25	3,59	4,07	1008
12:30	56,2	45,8	56,3	47,9	54,9	54,4	54,7	52,1	26,04	40,46	2,94	1,51	3,58	3,89	1002
12:40	57,1	46,5	57,1	48,6	55,6	55,2	55,4	52,9	25,11	38,96	2,66	1,32	3,6	4,16	1001
12:50	58,3	47,3	58,3	49,1	56,7	56,3	56,4	53,9	23,79	36,79	2,51	1,49	3,59	4,29	995
13:00	59,1	47,8	59	49,6	57,4	56,9	57	54,3	24,12	35,66	2,46	1,52	3,6	3,89	1011
13:10	59,1	48,4	59,9	50,2	57,5	57,1	57,1	54,5	23,48	33,24	2,28	1,41	3,59	4,05	1006
13:20	59,4	48,7	59,1	51,4	57,5	57,1	57,1	54,8	23,24	32,81	2,06	1,45	3,59	4,07	1015
13:30	59,9	49,2	59,5	51,8	57,9	57,4	57,5	55,6	22,56	31,19	1,81	1,24	3,58	4,09	1005
13:40	60,1	50,3	59,6	52,9	58,1	57,7	57,7	56,7	21,58	29,81	1,74	0,91	3,6	3,9	994
13:50	60,2	51,3	59,7	53,3	58,2	57,8	57,8	56,7	20,06	29,04	2,01	1,32	3,58	4,01	997
14:00	60,5	51,6	59,9	54,2	58,5	58	58	57,1	19,96	28,08	2,09	1,21	3,58	3,76	987
14:10	60,9	52	60,3	54,6	58,9	58,5	58,4	57,6	18,79	26,84	1,76	1,28	3,59	4,12	1010
14:20	61,3	52,6	60,6	54,9	59,3	58,9	58,9	57,9	17,68	25,65	1,64	1,32	3,58	3,87	1002
14:30	61,7	52,9	61	55,3	59,8	59,4	59,3	56,5	16,43	25,05	1,52	1,35	3,6	4,3	990
14:40	61,8	53,2	61,1	55,7	60,1	59,8	59,6	58,7	15,56	23,95	1,5	1,38	3,59	3,79	1007
14:50	61,9	53,3	61,2	56,4	60,3	60	59,8	58,9	14,79	24,56	1,46	1,41	3,58	4,19	998
15:00	61,9	53,3	61,2	56,3	60,4	60,1	59,8	59	13,96	23,48	1,41	1,36	3,59	4,01	986
15:10	61,9	53,3	61,2	56,2	60,4	60,2	59,8	59	13,68	21,42	1,32	1,28	3,58	4,2	976
15:20	61,9	53,4	61,2	56,6	60,5	60,3	59,8	59	12,95	19,91	1,3	1,27	3,58	3,86	980
15:30	61,1	52,8	60,2	56,4	60	59,8	59,1	58,5	12,06	17,56	1,25	1,21	3,57	3,99	962
15:40	60,7	52,6	59,8	56,2	59,7	59,4	58,9	58,3	11,54	15,98	1,15	1,12	3,59	4,24	942
15:50	60,3	52,4	59,4	55,8	59,4	59	58,5	57,9	11,06	13,76	1,08	1,03	3,59	4,16	945
16:00	59,6	51,8	58,6	55	58,8	58,5	57,9	57,3	10,84	11,54	1,03	1,02	3,58	3,88	920
16:10	59,3	51,4	58,3	54,7	58,4	58,2	57,6	57	12,44	13,09	0,72	0,67	3,59	3,9	921
16:20	58,6	51,3	57,8	54,2	57,8	57,4	57,1	56,5	12,52	13,19	0,6	0,55	3,6	4,06	910
16:30	58	50,7	57,3	53,7	57,3	56,8	56,6	56,1	12,62	13,19	0,55	0,48	3,59	4,09	885

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 7mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 7mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 9mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
10:00	19,82	17,31	27,14	12,85
10:30	16,72	15,49	22,15	11,35
11:00	13,62	13,68	19,16	9,86
11:30	10,66	11,63	16,33	7,99
12:00	7,7	9,58	13,5	6,13
12:30	6,07	8,09	10,61	4,71
13:00	4,44	6,61	7,73	3,28
13:30	3,91	5,49	6,35	2,68
14:00	3,38	4,38	4,98	2,08
14:30	3,32	3,68	4,41	2,03
15:00	3,24	2,99	3,83	1,89
15:30	3,23	2,96	3,81	1,89
16:00	3,22	2,93	3,78	1,88
16:30	3,21	2,88	3,75	1,88

Kurutma Süresi: 6 Saat 30 Dakika, 30 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:3097,5 gr.

Kurutma Deneyi No:11

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	İst Oda Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	İst Oda Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	İst Oda Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	İst Oda Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Giriş (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Çıkış (%)Bağıl Nem Değeri	Kabin Giriş Hava Hızı (m/s)	Kabin Çıkış Hava Hızı (m/s)	Kabin Giriş Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkış Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m²)
09:30	43,9	36,6	48,3	43,3	35,9	35,3	36,3	37,3	44,26	36,39	1,15	1,05	3,48	4,06	860
09:40	41,4	37,1	43,6	42,4	39,5	39,1	40,2	40,3	40,45	37,87	0,52	0,36	3,49	4,14	872
09:50	42,7	38,8	44,1	43,9	42	41,6	42,5	42,4	36,26	35,47	0,57	0,32	3,48	3,9	884
10:00	44,5	40,1	45,6	45,6	43,8	43,4	44,2	44,1	34,44	33,98	0,53	0,21	3,46	4,26	890
10:10	46,8	42,1	47,9	45,9	46,1	45,7	46,4	46,2	31,64	31,56	0,52	0,24	3,45	4,13	897
10:20	48,1	43	49,1	47,1	47,3	46,9	47,6	47,4	29,88	29,97	0,59	0,27	3,46	3,74	902
10:30	49,6	44,3	50,6	47,5	48,7	48,3	48,9	48,7	28,39	28,6	0,7	0,51	3,46	4,34	910
10:40	50,9	45,2	51,8	48,2	50	49,6	50,1	49,8	26,84	27,1	0,64	0,48	3,46	4,26	920
10:50	52,1	46,1	52,9	48,8	51,2	50,7	51,3	50,9	25,38	25,76	0,78	0,64	3,45	4,2	931
11:00	53	46,9	53,9	49,8	52	51,5	52,1	51,7	24,18	24,62	1,06	0,79	3,48	4,33	953
11:10	54,2	47,8	55,1	49,8	53,2	52,6	53,2	52,8	22,55	22,99	1,38	1,09	3,45	4,11	970
11:20	54,7	48,2	55,6	50,3	53,7	53,1	53,7	53,3	22,24	22,8	1,55	1,2	3,47	3,86	979
11:30	55,4	48,7	56,2	50,9	54,3	53,6	54,4	53,9	21,04	21,56	1,81	1,59	3,49	4,34	983
11:40	56,3	49,3	56,9	51,5	55	54,4	55	54,4	19,98	20,46	2,22	1,96	3,62	4,06	988
11:50	57	50	57,6	52,2	55,7	55,1	55,6	55,1	18,65	19,02	2,51	2,23	3,64	4,18	987
12:00	57,7	50,5	58,2	52,8	56,3	55,6	56,2	55,6	17,64	18,42	2,65	2,51	3,63	3,96	972
12:10	59,1	50,8	58,6	53,1	56,6	56	56,6	56	16,89	17,58	2,63	2,47	3,62	4,25	978
12:20	58,7	51,1	59	53,6	57,1	56,5	57	56,4	15,96	16,63	2,92	2,81	3,63	3,91	986
12:30	59	51,5	59,2	53,8	57,4	56,6	57,3	56,6	15,95	16,61	2,93	2,78	3,62	4,14	992
12:40	59,3	51,6	59,4	54	57,6	56,9	57,5	56,8	15,86	16,51	2,9	2,76	3,62	4,4	1001
12:50	59,6	51,9	59,7	54,2	57,9	57,1	57,7	57	15,68	16,42	3,18	2,94	3,61	3,75	1010
13:00	59,6	51,9	59,7	54,2	57,9	57,1	57,8	57	15,76	16,42	2,75	2,61	3,63	3,99	1005
13:10	59,8	52	59,7	54,2	58	57,2	57,9	57	15,76	16,46	2,91	2,75	3,65	4,26	1005
13:20	59,8	52	59,7	54,2	58	57,3	57,9	57,1	16,19	16,8	2,82	2,68	3,64	3,79	993
13:30	59,8	52	59,7	54,2	58	57,3	57,9	57,1	16,34	17	2,89	2,74	3,64	4,22	995
13:40	59,8	51,9	59,7	54,2	58	57,3	57,9	57,1	16,43	17,09	2,71	2,59	3,65	4,29	990
13:50	59,1	51,2	58,6	53,5	57,7	56,9	57,5	56,6	16,62	17,49	2,67	2,43	3,64	3,86	1000
14:00	59,1	51,2	58,6	53,5	57,5	56,8	57,3	56,5	16,82	17,47	2,55	2,32	3,64	3,78	987
14:10	58,8	51,2	58,6	53,5	57,3	56,5	57	56,2	17,48	18,04	2,46	2,38	3,63	3,7	989
14:20	58,6	51	58,3	52,8	57,1	56,3	56,8	56	17,46	18,18	2,06	1,95	3,64	3,84	982
14:30	58,5	51	58,2	52,7	57,1	56,3	56,7	55,9	17,42	18,05	2,19	2,06	3,64	3,63	985
14:40	57,7	50,6	57,3	52,5	56,7	56,2	56,4	55,6	17,39	18,04	2,14	2,05	3,62	4,02	981
14:50	57,7	50,6	57,3	52,5	56,6	56	56,3	55,4	17,68	18,33	1,97	1,91	3,63	3,94	973
15:00	57,4	50,4	57,1	52,3	56,3	55,7	55,9	55,1	17,74	18,42	1,75	1,69	3,63	3,99	966
15:10	56,9	50,1	56,5	52,1	55,9	55,3	55,5	54,7	17,84	18,52	1,82	1,77	3,65	4,35	968
15:20	56,5	49,9	56,2	51,7	55,6	55,1	55,2	54,4	18,62	19,04	1,41	1,38	3,61	4,12	952
15:30	55,5	49	55,1	51,4	54,8	54,4	54,5	53,8	18,44	19,09	1,49	1,47	3,62	3,98	956
15:40	55,2	49	54,8	51,4	54,4	53,8	54	53,3	18,32	18,76	1,18	1,16	3,63	4,04	951
15:50	54,5	48,5	54,1	50,7	53,8	53,1	53,5	52,8	18,22	18,54	1,29	1,27	3,64	4,18	961
16:00	54,2	48,3	53,8	50,4	53,5	52,9	53,2	52,5	18,31	18,62	1,24	1,23	3,62	4,24	932
16:10	52,8	47,2	52,5	50,1	52,3	51,5	52,1	51,4	18,18	18,44	1,05	1,03	3,63	3,97	945

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 10mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 9mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 8mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm
09:30	31,78	26,24	24,77	17,54
10:00	29,09	24,16	21,96	15,44
10:30	26,4	22,09	19,16	13,35
11:00	23,34	19,41	16,13	11,19
11:30	20,27	16,73	13,1	9,03
12:00	16,81	13,27	10,36	7,64
12:30	13,36	9,82	7,62	6,24
13:00	11,17	8,73	6,03	4,86
13:30	8,98	7,64	4,44	3,48
14:00	8,01	6,85	4,25	3,39
14:30	7,03	6,01	4,07	3,31
15:00	6,37	5,48	4,01	3,27
15:30	5,72	4,95	3,97	3,25
16:10	5,13	4,56	3,94	3,23
Kurutma Süresi: 6 Saat 40 Dakika , 7,2 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:735,50 gr.				

Kurutma Deneyi No:12

Zaman	Kabin Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Kabin Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sağ Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Giriş Sıcaklığı(°C)	Isı Odası Sol Kısım Çıkış Sıcaklığı(°C)	Kabin Girişi (%)Bağıl Nem Değerleri	Kabin Çıkışı (%)Bağıl Nem Değerleri	Kabin Girişi Hava Hızı (m/s)	Kabin Girişi Hava Basıncı (Pa)	Kabin Çıkışı Hava Basıncı (Pa)	Güneş Işınımı (W/m²)
09:45	42,4	34,1	38,9	35,3	32	31,5	32,6	33,1	52,98	43,56	1,06	3,65	4,35	832
09:55	38,9	35	40,4	37,4	37,4	37	37,7	37,7	48,85	45,49	0,53	3,64	4,13	851
10:05	40,4	36,6	41,3	38,2	39,8	39,4	40	39,8	44,05	43,04	0,51	3,64	3,72	864
10:15	41,9	37,8	42,7	38,7	41,4	41	41,5	41,3	42,79	42,08	0,46	3,65	4,29	887
10:25	42,7	38,5	43,5	39,5	42,2	41,8	42,3	42	41,68	41,2	0,56	3,63	3,98	902
10:35	44,8	40,1	45,6	40,5	44,3	43,9	44,3	43,9	37,1	36,98	0,52	3,64	4,18	920
10:45	46	41,1	46,8	40,8	45,5	45,1	45,5	45,1	34,97	34,99	0,54	3,64	4,31	921
10:55	46,7	41,5	47,4	41,3	46	45,6	46	45,6	33,78	33,86	0,56	3,58	4,15	925
11:05	48,2	42,7	48,9	41,8	47,5	47	47,4	47	31,51	31,72	0,6	3,59	4,17	937
11:15	49,9	44	50,7	42,5	49,1	48,7	49,1	48,7	30,37	30,52	0,63	3,6	4	941
11:25	50,4	44,3	51,2	42,9	49,6	49,1	49,5	49,1	28,84	29,1	0,77	3,58	4,07	947
11:35	50,9	44,9	51,7	44,4	50,1	49,6	50	49,6	27,77	28,01	0,88	3,58	4,18	950
11:45	51,9	45,4	52,6	44,8	51	50,5	51	50,5	26,62	27,09	1,23	3,56	3,78	952
11:55	52,3	45,8	53	45,7	51,3	50,7	51,3	50,8	24,81	25,18	1,29	3,6	4,28	944
12:05	53,4	46,6	54,1	45,9	52,3	51,8	52,3	51,8	24,46	24,97	1,26	3,59	3,68	944
12:15	54,1	47,3	54,8	46,8	53	52,5	52,9	52,4	23,96	24,54	1,63	3,61	3,79	948
12:25	54,9	47,7	55,3	47,9	53,6	53,1	53,5	52,9	22,52	23,08	1,94	3,57	4,09	953
12:35	55,4	48,1	55,9	48,4	54,1	53,6	53,9	53,3	21,3	21,85	1,84	3,58	4,36	960
12:45	55,7	48,4	56,1	49,6	54,4	53,9	54,2	53,6	20,71	21,37	1,69	3,59	3,99	963
12:55	56,5	49,1	56,8	50,3	55,1	54,6	54,8	54,1	19,87	20,52	2,08	3,6	4,18	965
13:05	56,8	49,2	57	51,1	55,3	54,9	55	54,4	19,81	20,45	2,44	3,59	3,93	972
13:15	57,6	49,9	57,8	52,1	56,1	55,5	55,7	55,1	18,76	20,13	2,4	3,59	4,23	960
13:25	58,2	50,2	58,1	52,5	56,6	56,1	56,1	55,4	18,08	19,2	1,84	3,6	4,24	957
13:35	58,4	50,5	58,4	52,8	56,9	56,4	56,4	55,7	17,76	18,41	2,21	3,63	3,73	956
13:45	58,6	50,7	58,5	53,1	57	56,5	56,6	55,9	17,5	18,28	2,36	3,61	3,93	954
13:55	58,1	50,2	58	52,8	57	56,5	56,6	55,9	17,86	18,61	2,14	3,62	3,59	959
14:05	58,1	50,3	58,1	52,8	57	56,5	56,6	55,9	18,04	18,7	2,45	3,61	4,05	960
14:15	58,1	50,3	58,1	52,5	56,9	56,3	56,5	55,8	18,04	18,89	2,2	3,62	3,73	957
14:25	57,7	49,9	57,5	51,9	56,4	55,8	56	55,3	18,24	19,08	2,29	3,62	4,01	963
14:35	57,4	49,7	57	51,4	56,1	55,6	55,8	55,1	18,24	18,99	2,23	3,63	4,05	970
14:45	57	48,9	56,7	51,1	55,7	55,1	55,4	54,7	18,71	19,56	2,08	3,61	4,43	954
14:55	56,3	48,7	56	50,5	55,1	54,6	54,8	54,1	18,9	19,83	1,96	3,61	3,98	955
15:05	56	48,7	55,7	50,2	54,9	54,4	54,5	53,8	19,1	20,04	1,82	3,64	4,18	943
15:15	55,3	48,2	55	50	54,3	53,8	54	53,3	19,29	20,13	1,79	3,63	3,72	948
15:25	55	48	54,6	49,6	54	53,5	53,7	53	20,15	21	1,27	3,61	4,71	926
15:35	53,7	47,3	53,1	49,3	53	52,3	52,8	52,2	20,43	21,18	1,25	3,63	4,03	920
15:45	52,8	47	52,4	48,7	51,3	49,6	51,8	51,1	20,91	21,76	1,31	3,65	4,59	912
15:55	51,4	46	51	48,1	49,9	48,1	50,5	49,9	18,32	18,76	1,11	3,64	4,38	903
16:05	51,1	45,8	50,7	47,3	49,6	47,8	50,2	49,6	18,22	18,54	0,81	3,68	4,63	908
16:15	49,5	44,7	49,2	47,2	48,2	46,4	48,8	48,3	18,31	18,62	0,86	3,67	4,58	902
16:25	49	44,4	48,7	47,1	47,8	46	48,4	47,8	18,18	18,44	0,71	3,59	4,46	860
16:35	48,7	44,3	48,2	46,9	47,2	45,5	48,1	47,5	17,84	18,04	0,69	3,61	4,24	844
16:45	48,2	44,1	47,9	46,7	47	45,3	47,6	47,1	17,56	17,95	0,72	3,62	4,31	838

Saat	Kabin Sol Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 8mm	Kabin Sol Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 6mm	Kabin Sağ Üst Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 7mm	Kabin Sağ Alt Rafı Numunesi Ağırlığı (gr) Kalınlık 5mm
09:45	23,29	21,88	19,01	19,32
10:15	20,23	19,35	16,29	15,93
10:45	17,17	16,82	13,57	12,54
11:15	15,44	15,02	11,82	10,42
11:45	13,71	13,22	10,06	8,3
12:15	11,45	10,87	8,06	6,24
12:45	9,18	8,52	6,05	4,17
13:15	7,41	6,69	4,84	3,55
13:45	5,62	4,87	3,63	2,93
14:15	5,08	4,39	3,45	2,9
14:45	4,53	3,92	3,28	2,86
15:15	4,31	3,71	3,22	2,84
15:45	4,08	3,51	3,17	2,82
16:15	4,01	3,45	3,14	2,81
16:45	3,95	3,43	3,13	2,81
Kurutma Süresi: 7 Saat , 7,1 kg yaş üründen kalan toplam ağırlık:714,99 gr.				

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ DENEYİ SONUÇLARI
Enerji Depolama Sistemi Deneyi No:1

Zaman	Çakıl Taşı Yatağı İç Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Depolanan Enerji Miktarı (MJ)	Basınç Düşümü(Pa)	Güneş Işınımı(W/m ²)
09:00	32,2	32,4	0,22	13,6	752
09:15	32,6	34,6	2,47	14,5	723
09:30	33,2	35,2	4,71	15,1	725
09:45	33,5	36,2	7,75	15,4	715
10:00	34,9	38,7	12,01	15,5	818
10:15	36	39,8	16,28	15,5	894
10:30	36,7	40,3	20,32	15,4	824
10:45	36,9	40,6	24,47	15,5	850
11:00	37,9	43,2	30,42	15,5	875
11:15	40,3	45,8	36,60	15,5	948
11:30	41,8	47,1	42,55	15,5	968
11:45	43,3	48,5	48,38	15,6	939
12:00	44,3	49,4	54,11	15,5	940
12:15	45,3	50,7	60,17	15,6	946
12:30	46,4	52	66,46	15,6	953
12:45	47,1	53	73,08	15,6	940
13:00	47,9	53,7	79,59	15,6	965
13:15	48,8	54,5	85,99	15,6	987
13:30	49,3	54,6	91,94	15,7	992
13:45	49,9	55,1	97,78	15,6	957
14:00	50,1	55,5	103,84	15,7	965
14:15	50,3	55,9	110,12	15,7	949
14:30	50,3	56,6	117,20	15,7	957
14:45	50,3	56,4	124,04	15,7	937
15:00	50,3	56,1	130,56	15,8	938
15:15	50,3	55,6	136,50	15,8	943
15:30	50,3	55,2	142,01	15,7	926
15:45	50,2	54,6	146,94	15,7	887
16:00	49,9	54	151,55	15,7	874
16:15	49,2	53,1	155,93	15,8	852
16:30	48,7	52	159,63	15,8	803
16:45	47,4	50,5	163,11	15,7	787
17:00	45,3	49,4	167,71	15,8	822

Enerji Depolama Sistemi Deneyi No:2

Zaman	Çakıl Taşı Yatağı İç Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Depolanan Enerji Miktarı (MJ)	Basınç Düşümü(Pa)	Güneş Işınımı(W/m ²)
09:00	32,2	35,6	3,82	13,1	705
09:15	33,5	35,9	6,51	14	736
09:30	34,5	37,5	9,88	14,7	771
09:45	35,2	39,4	14,59	15,2	797
10:00	36,1	40,6	19,65	15,6	808
10:15	37,5	41,2	23,80	15,4	831
10:30	38,2	42,4	28,51	15,4	861
10:45	39,5	44,1	33,68	15,5	824
11:00	40,1	45,6	39,85	15,3	867
11:15	40,7	46,2	46,03	15,2	898
11:30	41,3	47	52,42	15,5	897
11:45	42,7	48,8	59,27	15,6	900
12:00	43	49,1	66,12	15,8	938
12:15	43,7	50,4	73,64	15,7	919
12:30	44,1	51,2	81,61	15,7	933
12:45	45,4	51,9	88,91	15,6	902
13:00	46,3	52,4	95,76	15,7	908
13:15	47	53,1	102,60	15,6	933
13:30	47,7	54,9	110,69	15,7	952
13:45	48,1	55,6	119,11	15,7	972
14:00	48,2	56,2	128,09	15,8	980
14:15	48,4	57	137,74	15,8	987
14:30	48,7	57,8	147,96	15,7	975
14:45	49,2	58,5	158,40	15,7	990
15:00	49,5	58,9	168,95	15,8	995
15:15	50,4	60,1	179,84	15,7	990
15:30	51,3	58,8	188,26	15,8	981
15:45	51	57,5	195,55	15,7	976
16:00	50,8	57,1	202,62	15,6	983
16:15	50,7	56,8	209,47	15,7	930
16:30	50,7	56,5	215,98	15,5	884
16:45	50,6	56,4	222,49	15,4	863
17:00	50,5	56,4	229,12	15,5	833

Enerji Depolama Sistemi Deneyi No:3

Zaman	Çakıl Taşı Yatağı İç Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Depolanan Enerji Miktarı (MJ)	Basınç Düşümü(Pa)
09:00	31,9	35,8	4,38	12,7
09:15	32,2	36,9	9,65	13,8
09:30	33,5	38,1	14,82	14,5
09:45	35	39,5	19,87	14,9
10:00	35,5	40,9	25,93	15,3
10:15	36,5	42,6	32,78	15,6
10:30	38	45,1	40,75	15,4
10:45	38,9	46,9	49,73	15,5
11:00	40,5	48,7	58,94	15,3
11:15	41	50,6	69,71	15,5
11:30	43	51,4	79,14	15,5
11:45	44,4	52,8	88,57	15,6
12:00	44,9	53,2	97,89	15,8
12:15	45,6	53,9	107,21	15,7
12:30	46,1	54,8	116,97	15,7
12:45	46,7	56,1	127,52	15,6
13:00	47,3	56,6	137,96	15,7
13:15	47,5	57,2	148,85	15,6
13:30	48	57,6	159,63	15,7
13:45	48,9	57,7	169,51	15,7
14:00	49,1	58	179,50	15,8
14:15	49,4	58,5	189,72	15,8
14:30	50	59,8	200,72	15,7
14:45	50	61,3	213,40	15,7
15:00	50,2	60	224,40	15,8
15:15	50,2	58,8	234,06	15,7
15:30	50,1	58,5	243,49	15,8
15:45	50	58,2	252,69	15,7
16:00	49,8	58	261,90	15,6
16:15	49,4	57,7	271,21	15,7
16:30	49,4	57,5	280,31	15,6
16:45	49,3	57,2	289,18	15,4
17:00	49,1	56,8	297,82	15,7

Enerji Depolama Sistemi Deneyi No:4

Zaman	Çakıl Taşı Yatağı İç Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Depolanan Enerji Miktarı (MJ)	Basınç Düşümü(Pa)	Güneş Işınımı(W/m ²)
09:00	32,4	35,7	3,70	13,1	875
09:15	32,5	37,2	8,98	13,4	896
09:30	33,6	38,7	14,71	13,7	906
09:45	34,7	40,5	21,22	14,1	901
10:00	35,9	42,5	28,63	14,6	898
10:15	37,2	44,5	36,82	14,9	895
10:30	35,9	45,9	48,05	15,4	911
10:45	39,7	49,3	58,82	15,5	929
11:00	40,8	48,8	67,80	15,3	935
11:15	41,7	50,1	77,23	15,5	933
11:30	42,7	51,4	87,00	15,7	943
11:45	43,7	52,9	97,33	15,6	937
12:00	44,9	54,1	107,65	15,8	945
12:15	46	56,4	119,33	15,7	947
12:30	47,6	57,2	130,11	15,4	942
12:45	48,5	59,1	142,01	15,5	936
13:00	49,4	59,6	153,46	15,7	952
13:15	49,7	60	165,02	15,6	971
13:30	50,9	60,8	176,13	15,8	979
13:45	51,2	61	187,13	15,7	973
14:00	51,8	61,5	198,02	15,6	982
14:15	51,9	61,6	208,91	15,8	959
14:30	52,4	61,7	219,35	15,7	972
14:45	52,7	62,3	230,13	15,7	968
15:00	52,7	63,5	242,25	15,8	959
15:15	52,7	62,7	253,48	15,7	952
15:30	52,7	62,1	264,03	15,8	957
15:45	54,1	61,6	272,45	15,7	964
16:00	54,2	60,2	279,18	15,6	945
16:15	54,2	59,1	284,68	15,7	936
16:30	54,2	58,7	289,74	15,6	922
16:45	53,8	57,8	294,23	15,4	947
17:00	53,2	57,5	299,05	15,6	906

Enerji Depolama Sistemi Deneyi No:5

Zaman	Çakıl Taşı Yatağı İç Sıcaklığı (°C)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Depolanan Enerji Miktarı (MJ)	Basınç Düşümü(Pa)	Güneş Işınımı(W/m ²)
09:00	34,5	35,4	1,01	12,6	654
09:15	34,6	37,9	4,71	12,9	658
09:30	35,7	38,8	8,19	13,5	672
09:45	36,4	40,3	12,57	13,9	714
10:00	37,4	41,6	17,29	14,4	753
10:15	38,4	43,1	22,56	14,8	776
10:30	39,7	44,2	27,62	15	802
10:45	40,5	46,2	34,01	15,2	840
11:00	41,6	47,7	40,86	15,3	871
11:15	42,8	49,1	47,93	15,5	883
11:30	43,6	50,4	55,57	15,7	912
11:45	44,6	51,8	63,65	15,6	919
12:00	45,2	53,2	72,63	15,8	930
12:15	46,3	53,9	81,16	15,7	928
12:30	46,6	54,4	89,92	15,4	934
12:45	47,3	55,6	99,24	15,5	948
13:00	47,7	56,3	108,89	15,6	954
13:15	48,4	56,7	118,21	15,7	963
13:30	49,2	57,3	127,30	15,8	952
13:45	49,5	57,5	136,28	15,7	948
14:00	49,5	58,1	145,93	15,6	951
14:15	49,6	58,6	156,04	15,8	953
14:30	49,7	59,2	166,70	15,5	958
14:45	49,9	60,2	178,26	15,7	954
15:00	49,7	59,8	189,60	15,8	945
15:15	49,7	59,5	200,60	15,7	961
15:30	49,7	58,8	210,82	15,8	967
15:45	49,7	57,6	219,69	15,7	922
16:00	49,4	57	228,22	15,5	909
16:15	49,1	56,2	236,19	15,7	874
16:30	48,9	55,5	243,60	15,6	842
16:45	48,5	55	250,90	15,5	811
17:00	48,2	54,6	258,08	15,4	782

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :HALİL ATALAY
Doğum Tarihi ve Yeri :1984/GEMLİK
Yabancı Dili :İNGİLİZCE
E-posta :halil.atalay@bozok.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	ISI-PROSES ABD.	YILDIZ TEKNİK ÜNV.	2015
Y. Lisans	ENERJİ ABD	EGE ÜNİVERSİTESİ	2011
Lisans	MAKİNE MÜH.	AFYON KOCATEPE ÜNV.	2006
Lise	FEN BİLİMLERİ	GEMLİK LİSESİ (Y.D.A.)	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	SARTEN AMB. SAN.VE TİC. A.Ş.	AR-GE PROJE UZMANI
2008	TÜRKOĞLU MAK. SAN. LTD.ŞTİ.	PROJE MÜHENDİSİ
2007	KEMİ METAL SAN. VE TİC. LTD.ŞTİ.	İMALAT SORUMLUSU

YAYINLARI

Uluslararası Makale

1. ATALAY H. , ÜÇÖK, T. (2012),".Develpoment of Induction Heating Furnace Used in Gasket Curing for Increasing Energy Efficiency in Tinplate Packaging Industry."Journal of Science&Technology(JESTECH), 15(2), 93-96.
2. ATALAY, H., ÇOBAN, M.T.,(2015), "Modeling of Thermodynamic Properties for Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures by Using The Helmholtz Equation of State and Cubic Spline Curve Fitting Method."Universal Journal of Mechanical Engineering, (Accepted for Publication in November 2015).

Ulusal Makale

- 1.ATALAY, H. , GÜNGÖR,A.,(2011)," Termoelektrik Soğutma Sistemlerinin İncelenmesi." Soğutma Dünyası Dergisi, Sayı:54-55.
2. ATALAY,H., ÇOBAN, M.T.,(2010),"Nemli Havanın Termodinamik Özellikleri ve Yaş Hava Proseslerinin Modellenmesi."Soğutma Dünyası Dergisi.

Uluslararası Bildiriler

- 1.ATALAY,H. (2012), "Modeling of R22 Refrigerant's Thermodynamic Properties by Using Japan Cooling Society Equation of State and ISO17584:2005 Helmholtz Equation of State. 6th. Ege Energy Symposium.

Ulusal Bildiriler

- 1.ATALAY, H., ÇOBAN,M.T.,KINCAY, O.,(2015), " Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolama Sistemli Kurutma Sisteminde Elma Dilimi Üzerinde Isı ve Kütle Transferinin Modellenmesi." 20.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi(ULIBTK 2015).

2. ATALAY, H., ÇOBAN, M. T., KINCAY, O., (2015), "Çakıl Taşı Yatağı Enerji Depolama Sisteminin Modellenmesi." 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (TESKON 2015).

3. ATALAY, H., ÇOBAN, M. T., (2012), "Amonyak (R717) Soğutucu Akışkanının Termodinamik Özelliklerinin ISO17584:2005 Uluslararası Standardı Gerçek Gaz Hal Denklemi Kullanılarak Modellenmesi." 1. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu

4. ATALAY, H., ÇOBAN, M. T., (2013), "HFO-1234yf Soğutucu Akışkanının Termodinamik Özelliklerin Modellenmesi." 19. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi.

5. ATALAY, H., ÇOBAN, M. T., (2011), "Soğutkan Karışımların Termodinamik ve Termofiziksel Özelliklerinin Peng-Robinson-Stryjek-Vera (PRSV) Denklemi Kullanılarak Modellenmesi," 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (TESKON 2011).

Kitap

1. ATALAY, H., ÇOBAN, M. T. (2014). "Soğutucu Akışkanların Termofiziksel Modellenmesi." (ISBN : 978-3-639-67167-4)-Alim Kitabevi.

Proje

1. Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolama Sistemli Ziraî Ürün Kurutma Sisteminin Geliştirilmesi. 0348.STZ.2013-2 NOLU San-Tez Projesi. Doktora Öğrencisi