

**T.C.**  
**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RÜZGÂR VE GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA  
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**NUR YAVAŞ**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Halil ATALAY**

**YOZGAT 2021**

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**RÜZGÂR VE GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA  
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

NUR YAVAŞ

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Halil ATALAY

**Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje  
Koordinatörlüğü tarafından 6602b-MUH/30-362 kodu ile  
desteklenmiştir.**

YOZGAT 2021

## TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



NUR YAVAŞ

21/12/2021

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## RÜZGÂR VE GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTMA SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

NUR YAVAŞ

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

TEZ DANIŞMANI: Doç. Dr. Halil ATALAY

Rüzgâr enerjisi kullanımı hızla artan yenilenebilir enerji kaynağı olup günümüzde en çok elektrik enerjisi üretiminde kullanılır. Kurutma ise öncelikle gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için kullanılır. Bu çalışma kapsamında rüzgâr ve güneş enerjisi gibi iki farklı yenilenebilir enerji kaynağından elde edilen enerjinin kurutma işlemi için kullanılması sağlanmıştır. Çalışmayı literatürdeki çalışmalardan ayıran en temel fark ise rüzgâr enerjisinin ilk defa kurutma işlemi için kullanılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda güneş enerjisi destekli küçük kapasiteli bir kurutma ünitesi geliştirilmiştir. Rüzgâr enerjisi ise bir bataryaya elektrik enerjisi şeklinde depolanarak kurutma sisteminde elektrik enerjisinin tüketimine neden olan fanın çalıştırılması için kullanılmıştır. Ayrıca, sistemin rüzgâr ve güneş açısından verimli her alanda çalışmasını sağlamak amacıyla küçük ölçekli olması planlanmıştır. Öncelikli olarak kurutma işlemi için gereken elektrik enerjisinin üretilmesi amacıyla enerji tüketimine uygun olarak rüzgâr türbini seçilmiştir. Aynı zamanda rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisi olarak depolandığı batarya kapasitesi de tespit edilmiştir. Bir sonraki adımda ise 1-2 kg ürün kurutma kapasitesine sahip kurutma ünitesinin dizaynı yapılmıştır. Kurutma ünitesinin dış kısmı paslanmaz çelik levha bükülerek yapılmıştır. Ara katmanda izolasyon malzemesi kullanılmıştır. İç kısımda ise paslanmaz çelik sac ile izolasyon malzemesi kaplanmıştır. Güneş kolektörü malzemesi olarak en alt katmandan en üst katmana doğru sırasıyla paslanmaz çelik sac, izolasyon malzemesi, siyah boya ile boyanmış alüminyum levha ve cam kullanılmıştır. Böylelikle kurutma işlemi için gereken enerjinin önemli bir kısmı yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilmiştir. Dolayısıyla gerçekleştirilen bu çalışma ile meyve ve sebze kurutma alanında yüksek enerji verimliliğine sahip bir sistemin literatüre ve kurutma endüstrisine kazandırılması söz konusu olmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Kurutma, Güneş Enerjisi, Rüzgâr Enerjisi, Muz, Yenilenebilir enerji

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

## **DEVELOPMENT OF WIND AND SOLAR ENERGY ASSISTED DRYING UNIT**

**NUR YAVAŞ**

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY**

**School of Graduates Studies**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. Halil ATALAY**

Wind energy is a rapidly increasing renewable energy source and is mostly used in electricity generation today. Drying is primarily used to extend the shelf life of food products. Within the scope of this study, it is aimed to use the energy obtained from two different renewable energy sources such as wind and solar energy for the drying process. The main difference that distinguishes the study from the studies in the literature is that wind energy is used for the first time for the drying process. For this purpose, a small scale drying unit supported by solar energy has been developed. Wind energy, on the other hand, is stored in a battery as electrical energy and used to operate the fan, which causes electrical energy consumption in the drying system. In addition, it is planned to be small-scale in order to enable the system to work in every wind and solar efficient area. First of all, a wind turbine was selected in accordance with the energy consumption in order to generate the electrical energy required for the drying process. At the same time, the battery capacity where wind energy is stored as electrical energy has also been determined. In the next step, a drying unit with a product drying capacity of 1-2 kg was designed. The outer part of the drying unit was performed by bending the stainless steel plate. Insulation material was used in the intermediate layer. On the inside, the insulation material was covered with stainless steel sheet. As the solar collector material, from the bottom layer to the top layer, stainless steel sheet, insulation material, aluminum plate painted with black paint, and glass were used, respectively. Thus, a significant part of the energy required for the drying process was obtained by using renewable energy sources. Therefore, with this study, a system with high energy efficiency in the field of fruit and vegetable drying has been brought to the literature and drying industry.

**KEYWORDS:** Drying, Solar Energy, Wind Power, Banana, Renewable Energy

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana destek olan, bilgisini esirgemeyen ve tezimin tüm aşamalarında yardımcı olan çok değerli hocam Doç. Dr. Halil ATALAY' a teşekkürlerimi borç bilirim.

Hayatımın ilk gününden bu yana doğularım ve yanlışlarımla beni kabul ederek, her zaman desteklerini gördüğüm başta babam İsmail YAVAŞ, annem Nihal YAVAŞ ablam Nil ERGÜN ve eniştem Sezgin ERGÜN olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Manevi olarak her zaman güç aldığım, tüm süreç boyunca desteklerini gördüğüm çok sevgili arkadaşlarım Beril KEMAH ve Başak YAPICI' ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü tarafından 6602b-MUH/30-362 kodlu projesi olarak desteklenmiştir.

Nur YAVAŞ

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
SİMGE LİSTESİ.....	xii
KISALTMA LİSTESİ .....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Araştırması.....	1
BÖLÜM 2	
GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİ .....	10
2.1 Güneş Enerjisi.....	11
2.2 Rüzgar Enerjisi .....	12
BÖLÜM 3	
KURUTMA VE KURUTMA ÇEŞİTLERİ.....	14
3.1 Kurutma .....	14
3.2 Kurutma Çeşitleri.....	15
BÖLÜM 4	
KURUTMA SİSTEMİ .....	18
4.1 Güneş Toplayıcı .....	21
4.2 Kurutma Kabini .....	21
4.3 Rüzgar Türbin Tasarımı .....	22
4.4 Ölçüm Cihazları .....	25
4.5 Kurutma Karakteristikleri .....	29
4.6 Kurutulacak Ürünün Belirlenmesi .....	31
4.7 Kurutma İşleminde Gerçekleşen Kütle Transfer Modellemesi .....	32
4.8 Kurutma İşleminde Gerçekleşen Isı Transfer Modellemesi .....	34
4.9 Hata Analizi ve Ölçüm Belirsizlikleri .....	35

## BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
5.1 Kurutma Deney Sonuçları .....	40
5.1.1 Birinci Gün Kurutma Deneyi Sonuçları .....	42
5.1.2 İkinci Gün Kurutma Deneyi Sonuçları .....	45
5.1.3 Üçüncü Gün Kurutma Deneyi Sonuçları .....	48
5.1.4 Dördüncü Gün Kurutma Deneyi Sonuçları .....	51
5.1.5 Beşinci Gün Kurutma Deneyi Sonuçları .....	54
5.2. Kurutma Modelinin Oluşturulması .....	57

## BÖLÜM 6

SONUÇLAR.....	60
KAYNAKÇA.....	63
EKLER	
KURUTMA DENEYİ SONUÇLARI .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	78

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Binalarda su eldesi için kullanılan güneş kollektörleri ..... 12
Şekil 2.2	Elektrik üretiminde kullanılan fotovoltaiik güneş panelleri ..... 12
Şekil 2.3	İlk keşfedildiği dönemlerde kullanılan yel değirmenleri ..... 13
Şekil 3.1	Kuruma hızının özgül nem değişimine göre kuruma eğrisi ..... 15
Şekil 4.1	Güneş ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sistemi akış şeması ..... 18
Şekil 4.2a	Güneş ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sistemi montaj resmi (önden görünüş) ..... 19
Şekil 4.2b	Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sistemi montaj resmi (arkadan görünüş) ..... 20
Şekil 4.3	Güneş toplayıcı sistemin şematik resmi ..... 21
Şekil 4.4	Kurutma kabini bilgisayar destekli tasarımı ..... 22
Şekil 4.5	Rüzgar türbini resmi ..... 23
Şekil 4.6	İnvertör ve jel akü resmi ..... 24
Şekil 4.7	Piranometre (güneş ışınımı ölçüm cihazı) resmi ..... 25
Şekil 4.8	Hassas terazi resmi ..... 26
Şekil 4.9	NTC sıcaklık sensörü ..... 26
Şekil 4.10	Dijital multimetre resmi ..... 27
Şekil 4.11	Datalogger resmi ..... 27
Şekil 4.12	Bağıl nem ölçüm sensörü ..... 28
Şekil 4.13	Anemometre (hava hızı ölçüm cihazı) resmi ..... 28
Şekil 5.1	Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş muz dilimleri görünüşü (Kalınlık 5mm) ..... 38
Şekil 5.2	Kurutma işlemi sonrasında muz dilimlerinin görünüşü (Kalınlık 5 mm).... 39
Şekil 5.3	Her deneyde gün içerisinde alınmış olan güneş ışınım değerleri ..... 41
Şekil 5.4	Her deneyde ölçülmüş kabin içi hava hızı değerleri ..... 41
Şekil 5.5	Her deneyde ölçülmüş gün içerisinde ki rüzgar hızı değerleri ..... 42
Şekil 5.6	İlk deneyde ölçülen kabin içerisinde ki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri ..... 43
Şekil 5.7	Birinci gün muz dilimleri için kurutma karakteristikleri ..... 45
Şekil 5.8	İkinci deneyde ölçülen kabin içerisinde ki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri ..... 46
Şekil 5.9	İkinci gün muz dilimleri için kurutma karakteristikleri ..... 48
Şekil 5.10	Üçüncü deneyde ölçülen kabin içerisinde ki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri ..... 49
Şekil 5.11	Üçüncü gün muz dilimleri için kurutma karakteristikleri ..... 51
Şekil 5.12	Dördüncü deneyde ölçülen kabin içerisinde ki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri ..... 52
Şekil 5.13	Dördüncü gün muz dilimleri için kurutma karakteristikleri ..... 54
Şekil 5.14	Beşinci deneyde ölçülen kabin içerisinde ki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri ..... 55
Şekil 5.15	Beşinci gün muz dilimleri için kurutma karakteristikleri ..... 57
Şekil 5.16	5 mm kalınlıktaki muz dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı değeri (1.kurutma deneyi) ..... 58
Şekil 5.17	2 mm kalınlıktaki muz dilimleri kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı değeri (2.kurutma deneyi) ..... 59

Şekil 5.18 2 ve 5 mm kalınlıktaki muz dilimleri için Wang and Sing model verileri ile deneysel verilerin karşılaştırılması ..... 59



## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve süreleri .....	17
Çizelge 4. 1 Güneş enerjili kurutucu ve rüzgar türbini için tasarım parametreleri .....	24
Çizelge 4. 2 Ölçüm ve test cihazları özellikleri.....	29



## SİMGE LİSTESİ

$A$	Rüzgarın süpürdüğü yüzey alanı ( $m^2$ )
$c_p$	Muz dilimi için özgül ısı değeri (KJ/kgK)
$C$	Güç Katsayısı
$D_{eff}$	Muz dilimi için difüzyon katsayısı
$t$	$t=t$ 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 ( $kg_{H_2O}$ )
$w$	Özgül nem değeri ( $kg_{H_2O}/ kg_{kuru\ hava}$ )
$w_2$	Kurutucu çıkışındaki özgül nem değeri ( $kg_{H_2O}/ kg_{kuru\ hava}$ )
$w_a$	Kurutucu çıkışındaki havanın doyma özgül nem değeri ( $kg_{H_2O}/ kg_{kuru\ hava}$ )
$E_a$	Aktivasyon enerjisi (J/mol)
$E_g$	Enerji girişi (tüm sistem için) (kWh)
$X$	Muz dilimi için nem değeri ( $kg_{H_2O}/kg_{kuru\ ağırlık}$ )
$X_i^*$	Muz dilimi için ortalama nem değeri ( $kg\ H_2O /kg_{kuru\ ağırlık}$ )
$\Delta P$	Basınç düşümü (Pa)
$\Delta t$	Zaman aralığı (dakika)

$\eta$	Nem alma verimi
$\lambda$	Gizli buharlaşma ısısı (J/kg)
$\rho$	Kurutma havası yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_a$	Akışkan yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{hava}}$	Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Türbin hızı
$F$	Rüzgarın uyguladığı kuvvet

## KISALTMA LİSTESİ

KA	Kuru Ağırlık
MER	Nem alma verimi (hızı)
MR	Nem oranı ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$ )
SMER	Özgül nem alma hızı ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kWh}$ )
SO	Su Oranı
YA	Yaş Ağırlık



# 1.GİRİŞ

## 1.1. Literatür Araştırması

Tarımda hasat zamanı elde edilen ürünlerin çok az miktarı taze olarak tüketilmektedir. Bu nedenle ürün israfını azaltmak, tüketiciye ulaşana kadar ürünün bozulmasını engellemek ve taşımacılıkta doğru depolama ile kapasiteyi arttırmak amacıyla konserve, kurutma, dondurma vb. birçok yöntem uygulanmaktadır.

Gıdaların kurutulması, insanlığın ilk çağlardan beri uygulamakta olduğu en eski muhafaza yöntemidir. Kurutma ürün içerisindeki su veya sıvının uzaklaştırılmasıdır. Uzaklaştırılan bu su veya sıvı ürünlerin içerisinde mikroorganizmaların yaşamasını engelleyerek gıda ürünlerinin uzun süreli dayanmalarını sağlamaktadır.

Doğada kurutma işlemi çeşitli tahıllar, baklagiller ve zirai ürünlerde kendiliğinden gerçekleşebilse de her ürün için doğrudan güneşte kurutma işlemi uygun değildir. Bu amaç doğrultusunda kurutma teknolojileri geliştirilmiştir. Hala ilerlemekte olan bu teknolojilerde en önemli ölçüt enerji tüketiminin az olmasıdır. Bu nedenle bu tarz sistemlerin geliştirilmesinde yenilenebilir enerji kaynakları sıklıkla kullanılmaktadır.

Günümüzde yüksek enerji verimliliğine sahip kurutma teknolojileri olarak enerji depolama alanına sahip güneş enerjili kurutucular, ısı pompalı kurutucular ve bu iki sistemin birbirine entegre edildiği hibrit kurutma sistemleri ön plana çıkmaktadır. Fakat bu tarz sistemlerde fanların çalışması için şebekeden elektrik enerjisi kullanımı söz konusu olmaktadır. Bu da az da olsa enerji tüketimine sebep olmaktadır. Dolayısıyla kurutma sistemlerinin verimliliğini arttırmak tüketilecek elektrik enerjisini de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmek önemli bir çözüm yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisi üretimi içinde rüzgâr enerjisi oldukça önemli bir alternatiftir (Atalay, 2015; Darıcı vd., 2012)

Literatürde güneş enerji destekli kurutma sistemlerine ve rüzgâr türbinlerinin uygulama alanlarına yönelik yapılan önemli ölçüde çalışma yer almaktadır.

Doğan (1999), ısı borulu güneş kolektöründen bir kurutma sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem ısı borulu kolektör, kurutma kabini, hava akışını sağlayan bir fan ve nemi

ölçmek için kullanılan higrometreden oluşturulmuştur. 1420 gr ağırlığında ki kayısı ile yapılan deneyde kayısının 320 gr ağırlığa kadar düştüğü gözlemlenmiştir.

Leon ve Kumar (2008) güneş enerjisi-biyokütle hibrit bir hava ısıtıcı geliştirerek sabit sıcaklık (60°C) ve akış hızında sıcak hava sağlamışlardır. Geliştirilen bu sistemde örnek olarak biber %76.7 nem içeriğinden (w.b.) %8.4 nem içeriğine kadar 32 saat boyunca kurutulmuştur. Deneyler sonucunda açık güneşte kurutmaya kıyasla kurutma süresinin %66 oranında azaldığı ve sıcaklığın 21 saat boyunca 60±3°C 'de sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Slama ve ark. (2009), güneş enerjili hava kolektörü, bu kolektörde ki hava akımını sağlayacak olan fan ve kurutma kabininden oluşan bir kurutma sistemi tasarlamışlardır. Kabininde kullanılacak her tepsinin 3 kg ürün aldığı tespit edilmiş ve buna bağlı olarak kurutma kabinin kapasitesinin 10 kg olarak hesaplanmıştır. Eğik olarak tasarlanan güneş kolektörlerinin verimliliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Portakal dilimlerinin kurutulduğu bu sistemde, portakalın kabuklarının soyulmuş şekilde kurutulmasının kurutma hızını arttırdığı tespit edilmiştir.

Gülçimen ve ark. (2010) nane ve reyhan kurutma amacıyla güneş enerjisinden yararlanılan bir kurutma sistemi tasarlamışlardır. Hazırlanan bu sistemdeki güneş kolektörlerinin tasarımında 30°, 40° ve 60° açıda üç farklı kanatçık yerleştirilmiştir. Üç farklı hava debisiyle karşılaştırılan sistemde debi ile kolektörün verimliliğinin doğru orantılı arttığı gözlemlenmiş ancak güneş ışıını değeri gün içerisinde sabit olmadığından kanatçık açılarının karşılaştırılması yapılamamıştır.

Fudholi ve ark. (2013) kırmızıbiberi hem doğrudan güneş altında kurutarak hem de tasarladıkları kurutma sistemiyle kurutarak karşılaştırma yapmışlardır. Oluşturdukları kurutma sisteminde yapılan kurutmada 8 tepsi kırmızıbiber geceleri durdurularak yapılan kurutma 5 gün ve toplamda 33 saat sürmüşken açık alanda doğrudan güneş ile kurutulan biberlerin kuruma süreleri yaklaşık 65 saat sürmüştür. Biberlerin kurutma işlemi öncesi yaş bazda %80 olan nem oranı %10'a kadar düşürülmüştür.

Ülkemizde her yıl yaklaşık olarak üretilen 8 tonluk domatesin %70'lik kısmı taze olarak tüketilirken, %30'u depolanmak üzere işlemlere tabi tutulmaktadır. Polatçı (2013), yapmış olduğu çalışmada domatesin raf ömrünü uzatmak amacıyla kurutma işlemi

gerçekleştirilmiştir. Normal ve vakumlu etüv, hassas kurutucu, güneş enerjili destekli ısı pompalı kurutucu, gölgede kurutma ve güneşte kurutma şeklinde 6 farklı çeşit kurutma işlemini domates üzerinde denemiştir. 55 °C’de ısı pompalı kurutucuda, 55, 60, 65 ve 70 °C’ de diğer kurutucularda kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 55 °C’de 28 saat ile en hızlı kurutma ısı pompalı kurutucuda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Elma kurutmak için tasarlanan sistemde doğal akıştan yararlanarak bacalı ve güneş kolektörlü bir kurutma kabini oluşturulmuştur. Elmaların kurumasının 2 gün sürdüğü bu sistemde ilk başta %85 olan nem içeriği deneyler sonunda %5’e kadar düşmüştür. Sistem içerisinde ki sıcaklık deney süresinde 50 °C ile 90 °C arasında değişmiştir (Khan vd., 2013).

Şevik ve ark. (2014), kırmızıbiberin kurutma işlemini gerçekleştirmek için sera tipi bir kurutucu tasarlamışlardır. Güneş enerjisi destekli bu kurutucunun tabanı 4 cm yalıtım malzemesi ve siyaha boyanmış alüminyum sac ile kaplanmıştır. Seranın dış kısmı polikarbonat levha ile çevrilmiştir. Sisteme eklenmiş olan güneş paneli ile üretilen elektrik sera içerisinde bulunun hava akımını sağlayan fanları çalıştırmak için kullanılmıştır. Tasarlanan bu sistemde 0,34 m/s hava hızıyla kırmızıbiber kurutulmuştur.

Yapılan bir başka çalışmada ise tıbbi bitkilerin zarar görmeden kuruması için düşük sıcaklıklar altında çalışan hava kaynaklı ısı pompası destekli vakumlu kurutma fırını kullanıp, fesleğen, biberiye, dereotu ve maydanoz kurutulmuştur. Kurutma işlemleri 36 °C ile 46 °C sıcaklıklarda ve 0,4 ile 0,6 bar son vakumlama basıncı altında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar enerji verimliliği açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak vakum altında tıbbi ürün kurutulmasının buharlaşmaya katkı sağladığı ve ürün kalitesinin yükselttiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte ısı pompası destekli vakumlu kurutma fırınında kurutulacak en uygun tıbbi bitkinin enerji tüketimi ve kurutma süreleri göz önüne alındığında dereotu olduğu gözlemlenmiştir (Ayaz, 2015)

Yapılan başka bir çalışmada ise düşük maliyetli ürünlerin kullanımı dikkate alınarak kurutma kabini tasarlanmıştır. İki ahşap yüzey arasına konulan hava kanalları ile siyah cam eklenerek güneş kolektörü oluşturulmuş ve kurutulan ürünlerdeki nemi dışarıya çıkartabilmek amacıyla fan kullanılmıştır. Tasarlanan bu sistemde tepside ve şişte olmak üzere iki farklı şekilde muz kurutulmuştur. Deneyler sonucunda bu iki ürün arasında %3,1’lik bir nem farkı bulunmuştur. Ayrıca farklı hava hızlarındaki kurutma işlemleri

karşılaştırıldığında muzların tat, koku ve şeklinde herhangi bir farklılık oluşmadığı gözlemlenmiştir (Hedge vd., 2015).

Elhagar (2015) havanın fan yardımıyla akışının sağlandığı, güneş kolektöründen elde edilen ısı ile kuruma işleminin gerçekleştiği, çift tepsili bir kurutma sistemi tasarlamıştır. Güneş kolektörü yataya 30°'lik açıyla yerleştirilmiştir. Tasarlanan bu sistemde elma ve havuç kurutulmuştur. 1 kg elmanın deney sonucunda 288 gr olduğu, nem oranının %71.2 oranında düştüğü ancak aynı miktardaki havucun deney sonucunda 532 grama kadar düşebildiği ve nem oranında %53,3 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Elmanın kurutma işleminde verimliliğin %48.8, havucun kurutma işleminde ise verimliliğin %28,8 olduğu tespit edilmiştir.

Khuresi ve Walke (2016) tamamen ahşaptan oluşturdukları kurutma sisteminde ek bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaksızın güneş enerjisi yardımıyla kurutma yapmışlardır. İncir, muz, elma ve biber kurutulan bu sistemde iki adet raf bulunmaktadır. 1,5 kg kuru incir yaklaşık olarak 28 saatte kuruma işlemini tamamlarken 32 °C sıcaklık ve 0,6 m/s hava hızının mevcut olduğu ortamda incirlerin nem içeriği %85'den deney sonunda %46'ya düştüğü gözlemlenmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada Hindistan'daki ürünlerin depolama ve saklama koşullarının uygunsuzluğu göz önünde bulundurularak yüksek enerji tüketen sistemlerin kullanımını azaltmak amacıyla güneş enerjisi destekli bir sistem tasarlanmıştır. Yataya eğimli bir şekilde yerleştirilmiş güneş kolektörü, bir pompa ve kabinden oluşan bu sistemde kolektör veriminin %35, kurutucu veriminin de %13 olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilen bu sistemde yeşil elmalar kurutulup nem kaybı hesaplanmıştır. Başlangıçta 200 gr olan yeşil elmalar deney sonucunda 34 grama kadar düşmüştür. Sistem ile karşılaştırmak amacıyla aynı ağırlıktaki ürün doğrudan güneş altında kurutmaya maruz bırakılırken deney sonucunda aynı süre içerisinde yeşil elmaların 45 grama kadar düşebildiği gözlemlenmiştir (Bharadwaz, 2017).

Karakaya (2017) yaptığı çalışmada, doğal taşınımı ve güneş enerjisi destekli sistemin tasarımını ve imalatını yaparak Elazığ ilinin koşulları altında elma ve biber kurutma işlemi gerçekleştirmiştir. Güneş ışınımının, rüzgâr hızının, bağıl nem ve sıcaklık değerlerinin, ürün boyutlarının kurutma üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan ölçümlerde kurutma hava sıcaklığı ile bağıl nemin ters orantılı olduğu görülmüştür. Güneş ışınımına

bağlı olarak belirli dönemlerde sıcaklık değerinde artış ve azalış tespit edilmiştir. Bununla birlikte kurutulmuş ürünlerin kalınlıkları arttıkça nem içeriğinde ki düşüşün yavaşladığı ve kurutma süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Soğurucu yüzeyli kolektör ile tasarlanmış kurutma sisteminde elmaların nem oranı %86'dan %7,9'a, biberlerin nem oranlarının ise %94,5'den, %8,21'e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Her iki üründe de kurutucu içerisinde ki sıcaklık değeri 42 °C ile 56,5 °C arasında ölçülmüştür.

Yumurta viyolu üretiminde en çok enerji sarfiyatı kurutma işlemi sırasında gerçekleşir. Bunun göz önüne alınarak yapılan çalışmada içeriğinin %68'i su olan yumurta viyollerinin konveksiyon tipli bir kurutucuda kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 m/s hız, 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklık ve %9, %18 ve %27 bağıl nem değerlerinde yapılan deneylerin kurutmaya olan etkisi incelenmiştir. Kurutma süreleri 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarda sırasıyla 50, 45, 40 ve 35 dakika olarak ölçülmüştür. En düşük sıcaklık derecesiyle en yüksek sıcaklık derecesi arasında kurutma süreleri karşılaştırıldığında %30 oranında azalma belirlenmiştir (Al-Bayati, 2017).

Zoukit ve ark. (2019) yeni bir hibrit güneş-baca gazı kurutucu geliştirmiş ve aynı zamanda sistemin CFD analizini gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar birbirine yakın değerler göstermiş ve baca gazı modu, güneş modu ve hibrit mod için kurutucu verimleri sırasıyla %37, %42 ve %40 olarak belirlenmiştir.

Pathok ve ark. (2020) doğrudan güneş ışığına maruz kalınan kurutma işleminde ürünlerin yapışkanlığının artarak, toz tabakalarının oluştuğunu, kuşların ve böceklerin kuruyan ürün üzerinde herhangi bir engel bulunmadığından doğrudan ulaşabildiklerini fark etmişler ve güneş kolektörlü kapalı sistemli bir kurutucu sistem tasarlamışlardır. Geliştirdikleri kurutma sistemini emme odası, kurutma haznesi ve egzoz çıkışı olarak 3 ana bölümde toplamışlardır. Emme odası güneş kolektörü ve bir fan ile oluşmuştur. Kolektörde toplanan sıcak havayı fan yardımıyla ürünlerin tepsi üzerinde mevcut bulunduğu kurutma haznesine ileterek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Nemi içine hapsedilmiş olan atık havayı kurutma haznesinin üzerine yerleştirilen bir baca yardımıyla dışarı atılması sağlanmıştır. Kurutma işlemi sonucunda yapılan ölçümlerle birlikte kolektör verimliliğinin %33,73 olduğu ve yaz aylarında kolektörün enlem açısının daha az olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Acar ve ark. (2020) Karadeniz bölgesindeki engebeli araziler ve yağışlı günlerin yoğunluğu sebebiyle doğrudan kurutulan ürünlerde bozulmalar ve çürümelere meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bu nedenle findığın hızlı ve verimli kurumasını sağlamak amacıyla güneş enerjisi destekli bir fındık kurutma sistemi tasarlamışlardır. Yapılan çalışmada kurutma haznesine spiral mil monte edilip, mili tetiklemek için motorlu bir kayış-kasnak mekanizması kullanılmıştır. Kurutma haznesinin alt kısmına PVC boruları ve bu boruların temasını engellemek amacıyla boru üzerlerine çelik ızgara monte edilmiştir. 45 derecelik açıyla çelik profillerin üzerine kolektör yerleştirilmiştir. Sistemde elde edilen dairesel hareket sayesinde fındıkların toplamda 8 saatte kurumaları söz konusu olmuştur.

Ssemwanga ve ark. (2020) Doğu Afrika'da Hibrit Dolaylı Pasif (HIP) güneş kurutucusu geliştirilmiş ve direkt güneşte kurutmaya göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Geliştirilmiş olan bu sistemin yanı sıra Solar Fotovoltaik ve Elektrik (SPE) kurutucusu da imal etmişlerdir. Kurutma performansları ananas ve mango üzerinde değerlendirilmiştir. Solar Fotovoltaik Sistemde kurutma süresi 10 saat, Hibrit Dolaylı Pasif Sistemde kurutma süresi 18 saat ve direkt kurutma yöntemi ile kurutmada süre 30 saat olarak belirlenmiştir. Buna göre HIP kurutma sisteminin sera kabini ile bir araya getirilmiş yüksek miktarda güneş yoğunlaştırıcı ile tasarlanmasının performansı yüksek oranda arttırabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kong ve ark. (2020) güneş enerjisinin kullanımını verimli bir şekilde arttırabilmek için yapmış oldukları çalışmada fotovoltaik/termal kullanım kolektörü bir sıcak hava kurutma sistemi tasarlanmışlardır. Sistem içerisinde silikon ve polisilikon güneş pilleri kullanılmıştır. Bu piller kurutma esansında termal ve elektrik enerjisi sağlamıştır. Tasarlanan bu sistem ile şalgam kurutulmuş ve şalgamın kurutma süresini direkt güneşte kurutmaya göre 10 saat kısalttığı gözlemlenmiştir.

Nabnean vd. (2020) yaptıkları çalışmada düz plaka kolektör üstüne polikarbonat plaka kapaklı güneş kurutucuyu parabolik şekilde tasarlamışlardır. Polikarbonat plakayı ısı kaybını azaltmak için kullanmışlar ve ilave olarak güneş radyasyonunun kurutucuya geçmesine yardımcı olmuşlardır. Direkt cebri konveksiyonlu ev tipi kurutucu olarak üretilen bu sistemde 5 kez her defasında 10 kg olmak üzere toplamda 50 kg muz kurutulmuştur. Yapılan gözlemlerde kurutucuda ki hava sıcaklığının 08.00 ile 18.00 saatleri arasında 35°C ile 60°C civarında değiştiği belirlenmiştir. Muzun nem değeri

başlangıçta %72 iken tasarlanan sistemde yapılan kurutma işleminden sonra %28'e kadar düşmüştür. Direkt güneşte kurutmada ise bu değer ancak %40'a kadar düşebilmiştir. Kurutma sisteminde yapılan kurutmada kurutma süresinden de %48'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Özçelik (2020), tarafından yapılan çalışmada faz değiştirici parafin malzeme kullanılarak ısı geri kazanım üniteli, güneş enerjisi destekli kurutma kabininin tasarım ve üretimini gerçekleştirilerek sistemin verimliliğini test etmek amacıyla da 3,5 ve 10 mm kalınlıklar arasında değişen armut dilimleri kurutulmuştur. Geliştirilen kurutma kabine çapraz akışlı ısı değiştirici eklenerek atık ısının yeniden sisteme dönmesini sağlayıp enerji verimliliği artırılmıştır. Testler boyunca sistem içerisindeki sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı değerleri ölçülmüştür. Ürünlerin ağırlık değişimleri hassas terazi yardımıyla yarım saatlik aralıklar ile ölçülerek not edilmiştir. Sonuç olarak kurutma ürünü olan armudun 35 °C - 45 °C sıcaklıkta 7-18 saat aralığında kuruduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada, son yıllarda yaşanan Covid-19'un ilaç yapımında önemli rol alan zencefilin, kurutma süresini kısaltmak amacı ile ultrasonik kurutuculu nem alma ile geliştirilmiş bir kurutma sistemi tasarlanmıştır. Nemin giderilebilmesi için ultrasonik atomizör, enerji depolama sistemi içinde parafin mumu kullanılmıştır. Sistem 0,153 kg/s ve 0,077 kg/s hava akış hızlarında çalıştırılmıştır. %80'lik nem oranına sahip olan zencefil 0,153 kg/s hava akış hızında nem değeri %10'a düşerken, 0,077 kg/s hava akış hızında %20'ye kadar düşürüldüğü tespit edilmiştir (Sabareesh vd., 2021).

Hao ve ark. (2021) kurutma işleminin yalnızca güneş enerjisi kaynaklı olduğunu fark edip yaptıkları bu çalışmada ısı pompası destekli güneş enerjili kurutma sistemi geliştirmişlerdir. Camlı kolektör kullanıp sistemin performansını limon dilimleri kurutarak test etmişlerdir. Sonuçları direkt güneşte kurutmaya göre karşılaştırmışlardır. Kurutma kabininin sıcaklığı 40 °C ile 50 °C arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Limon dilimlerinin özgül nem çekme oranı ise 0,85 kg/kWh olarak belirlenmiştir.

Salve ve ark. (2021), yenilenebilir enerjinin geleceğe yönelik önemini fark edip, doğrudan yapılan kurutma işleminin süresini kısaltmak üzere tasarladıkları kurutma sisteminde 15 kg yeşilbiber kurutmuşlardır. Geliştirilen sistemde düz plakalı kolektör kullanılmış ve aktif kömür ile kara tahta boyası karıştırılıp kaplanmış bu sayede emicilik artırılmıştır. 0,008 kg/s hava akış hızında kolektör sıcaklığı, 96 °C ölçülüp verimi %33

olarak hesaplanmıştır. Doğrudan güneş enerjisiyle yapılan kurutma ile 28 saatte kuruyan 15 kg yeşilbiber, geliştirilen bu sistem sayesinde 16 saatte kurutulmuştur.

Roratto ve ark. (2021) güneşte kurutmanın sürdürülebilirliğine inanarak daha kısa süre ve daha yüksek verimde kurutmaya geçebilmek için hibrit-solar vakumlu bir kurutucu geliştirmişlerdir. Sistemde 90 °C' lik sıcak su elde etmek için elektrikli rezistansı yalıtımlı bir rezervuara bir güneş ısıtıcısı ile bağlamışlardır. Kurutma kabinlerinin kapasitesini 4 kg ürün kurutacak şekilde tasarlamışlar ve vakum altında çalıştırmışlardır. Sistemi deneysel olarak test edebilmek için muz, hurma ve havuç kurutmuşlardır. Tüm meyve ve sebzeler 3-4 saatte kurutulmuş ve gevrek ürünler elde edilmiştir. Vakum altında çalışan hibrit solar kurutucuda 70 °C üzerindeki sıcaklıkları için elektrik desteği alınmıştır.

Yapılan başka bir çalışmada, karma sistemli bir güneş kurutucusunda enerji ve ekserji akışı değerlendirilmiştir. Deney ürünü olarak ananas dilimleri kullanılmıştır. Doğal ve zorlamalı konveksiyonda karşılaştırılmıştır. Ananas dilimlerinin nem oranı yaş bazda başlangıçta %90 iken doğal konveksiyon altında 6,5 saatte 0,006 kg/s akış %29.66'ya kadar düşürülmüştür (Rani vd., 2021).

Benhamza ve ark. (2021) gıda kurutma için kanatlı güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin optimal geometrik ve işletme parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışmada sistemin optimum çalışma parametreleri enerji, ekserji analizi ile iyileştirme potansiyeli değerleri ile çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Elde edilen optimum tasarım parametrelerinin termal verimliliği %15,76 ve iyileştirme potansiyeli değerini ise %19,33 artırdığı gözlemlenmiştir.

Mugi ve Chandramohan (2021) bamyanın (*Abelmoschus esculentus*) dolaylı güneş kurutucusunda cebri ve doğal konveksiyon altında kurutulması sırasında enerji ve ekserji analizini gerçekleştirilmiş ve kurutucu performansının daha iyi değerlendirilmesi ve kurutmanın optimize edilmesi için sonuçlarını karşılaştırmıştır. Ortalama kurutma verimleri, cebri konveksiyon altında sırasıyla %74.98 ve %24.95, doğal konveksiyon altında ise aynı değerler sırasıyla %61.49 ve %20.13 olarak belirlenmiştir. Kurutma odası için ekserji kaybı ise cebri ve doğal konveksiyon altında sırasıyla 0.062 ila 21.99 W ve 0.394-24.99 W arasında değişmiştir.

Singh ve Gaur (2021) vakumlu güneş kolektörlü yeni sera kurutucusunun ekonomik uygulanabilirliği ve çevresel etkisini incelemiştir. Geliştirilen bu hibrit kurutma sisteminde yüksek nemli tarımsal ve tarımsal olmayan ürünlerin kurutulması hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda domates dilimleri 10 saatte %94,6'dan (ağırlık) %10'luk (ağırlık) nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda kurutucunun geri ödeme süresinin 1,73 yıl olduğu ve 169,10 ton CO2 azaltımı sağlayabileceği belirlenmiştir.

Hadibi ve ark. (2021) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada güneş enerjisi destekli-elektrikli hibrit kurutma sisteminin performansını araştırmıştır. Çalışmada sistemin zorlanmış konveksiyonlu modunda enerji geri ödeme süresi 0,62 ve 0,32 yıldır ve net CO2 azalımı ise 4,1 ve 6,9 m/ s hava hızları için sırasıyla 72,61 ve 140,81 ton olarak belirlenmiştir. %89.86 ile en yüksek ekserji verimliliği doğal konveksiyonlu modda 50 °C' lik kurutma sıcaklığında elde edilmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada ise Singh ve Gaur (2021) hibrit aktif güneş enerjisi destekli sera kurutucuyu performans ve ekonomik açıdan geleneksel kurutucularla domates, zencefil ve su kabağı gibi üç farklı ürün kurutarak karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre, geliştirilen kurutucunun geleneksel kurutuculara kıyasla su kabağı, zencefil ve domatesi kuruma süresini sırasıyla %61.90, %34.09 ve %47.36 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca zencefil, su kabağı ve domatesin enerji geri ödeme süresinin geleneksel kurutuculara göre yaklaşık 1.79, 2.87 ve 0.69 yıl daha az olabileceği öngörülmüştür.

Literatürde güneş enerjisi destekli kurutuculara yönelik gerçekleştirilen diğer çalışmalarda da genel olarak güneş kurutucuların enerji ve ekserji verimliliğinin konvansiyonel kurutuculara kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu sistemlerin ekonomik ve çevresel açıdan da olumlu katkılar sağladığı elde edilen deneysel sonuçlardan açıkça görülmektedir (Das vd., 2020; Demirpolat, 2019; Dutta vd., 2021; Kabeel vd., 2018; Prawiranto, 2021; Raj vd., 2021; Rashidi vd., 2021; Tuncer vd., 2020; Vijayan vd., 2020).

Araştırmaların önemli bir bölümü güneş enerjisi destekli kurutucuların performansını ve sürekliliğini artırmak için enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanıldığını göstermektedir. Özellikle çeşitli faz değiştirme malzemelerinin kullanıldığı gizli ısı depolama kapasitesine sahip enerji depolama sistemleri literatürde geniş bir yer

tutmaktadır (Atalay, 2020; Atalay ve Cankurtaran, 2021; Bhardwaj vd. 2021; Chen vd. 2020; Madhankumar vd. 2021; Ndukwu vd.2020; Ramirez vd. 2020). Bunun dışında enerji depolama malzemesi olarak çakıl taşı vb. materyalleri kullanan duyulur ısı depolama kabiliyetine sahip enerji depolama ortamlarının güneş enerjisi destekli kurutma uygulamalarında kullanımını da yaygın hale gelmektedir (Atalay vd. 2017; Atalay, 2019; Lamrani ve Draoui, 2020; Sözen vd. 2021). Elde edilen sonuçlar genel olarak enerji depolama sistemi destekli güneş kurutucularının klasik güneş kurutucularına kıyasla kullanım süresinin ve performansının önemli ölçüde arttığını işaret etmektedir.

Son yıllarda güneş enerjisi destekli hibrit kurutucular da literatürde oldukça önemli bir konuma sahiptir. Bu alanda en geniş yer tutan kurutucu tipleri ise güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutuculardır. Yapılan araştırmalarda bu tip kurutucuların özellikle performans, ekonomik ve enerji maliyet analizleri üzerinde durulmuştur (Hawlder vd., 2008; Morteza pour vd., 2012; Ozgener ve Hepbasli 2007; Singh vd., 2020). Bazı çalışmalarda ise güneş enerjisi ile farklı enerji kaynakları kullanılarak geliştirilen hibrit kurutucuların performanslarının ve çevresel etkilerinin incelendiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada rüzgâr ve güneş enerjisi gibi iki farklı yenilenebilir enerji ile çalışan hibrit bir kurutma ünitesi geliştirilmiştir. Sistemin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin tamamı rüzgâr enerjisinden karşılanmıştır. Literatürde güneş enerjisi destekli kurutma sistemlerinin performans değerlendirilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmaların önemli bir kısmında güneş kurutucuların performansını artırmak ve kurutma süresini kısaltmak amacıyla genellikle enerji depolama sistemleri, ısı pompaları, biyokütle ve mikrodalga gibi diğer enerji kaynakları ile birlikte hibrit bir şekilde kullanılmıştır. Bu çalışmanın temel farkı kurutma işleminin herhangi bir dış enerji kaynağına gereksinim duyulmadan sadece rüzgâr ve güneş enerjisinden yararlanılarak gerçekleştirilmiş olmasıdır. Temel amaç tükettiği enerjinin tamamını kendisi üreten çevre dostu, yüksek enerji ve ekserji verimliliğine sahip bir kurutma sistemini literatüre kazandırmaktır. Böylelikle iki temiz enerji kaynağı ile kurutma prosesinin çevresel etkisi yüksek, ekonomik ve kolay bir şekilde gerçekleştirilmesi söz konusu olmaktadır.

## **2. GÜNEŞ VE RÜZGÂR ENERJİSİ**

Meyve ve sebzelerin kurutulması çok eski yıllardan beri güneş enerjisi ile sağlanmaktadır. Doğrudan güneş altına serilerek yapılan kurutmaların yanı sıra

teknolojinin gelişmesiyle yenilenebilir enerji kullanılarak tasarlanan kurutma sistemleri genellikle güneş enerjisinden yararlanarak geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada hem rüzgar hem güneş enerjisi kullanarak yenilenebilir enerjiden en üst seviyede yararlanmak amaçlanmıştır.

## 2.1.Güneş Enerjisi

Hidrojen gazının %75, helyumun %24'lük kısmını oluşturduğu güneş canlıların yaşam kaynağıdır. Sürekli olarak 4 hidrojen atomunun 1 helyum çekirdeğine dönüştüğü füzyon reaksiyonları sırasında oluşan kütle farkı ısı enerjisi olarak boşlukta yayılım sağlar (Karamanay, 2017). Bu ışınım enerjisi ile ortaya çıkan ısı sayesinde birçok üretim söz konusu olmaktadır. Düşük enerjili uygulamalarda sıcak su eldesi, bina içi ısıtma, seralarda ısıtma, tarım ürünlerin kurutulması, güneş pilleri sistemi gibi alanlarda güneş enerjisinin kullanımı oldukça yaygındır. Orta dereceli sıcaklık uygulamalarında buhar ve elektrik üretiminde kullanılan güneş enerjisi çok yüksek sıcaklıklarda parabolik çanaklar ile elektrik üretimi sağlanmak amacıyla kullanılabilir (Abuska, 2015).

Güneş enerjisi uzun ömürlü bir enerji kaynağı olup çevre kirliliği oluşturmayan temiz bir enerji kaynağıdır. Dış ülkelere bağımlılığı olmadan üretilebilir. Karmaşık teknolojilere ihtiyaç duymadan basit sistemlerle çalışmaktadır. Kurulacak olan tesislerin bakım maliyeti minimum seviyededir.

Ülkemizde güneş enerjisinden yararlanmak için kullanılan 2 tip yöntem vardır. İlk olarak kullanımı yaygın olan güneş kolektörleri en yaygın sıcak su üretim şeklidir. Genellikle binalarda kullanılan bu yöntem son zamanlarda yüzme havuzlarının ısıtılması ve her türlü sıcak su gereksinimini karşılamak için kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem olan fotovoltaik sistem ise güneş ışınımını doğrudan elektrik üretimine çevirmek amacıyla kullanılmaktadır (Kılıç, 2015).



**Şekil 2.1.** Binalarda su eldesi için kullanılan güneş kolektörleri (Küçükkaya, 2016)



**Şekil 2.2.** Elektrik üretiminde kullanılan fotovoltaik güneş panelleri (Baybek, 2015)

## **2.2. Rüzgâr Enerjisi**

Yeryüzündeki sıcaklık değişimlerinden kaynaklı ortaya çıkan hava kuvvetleri olarak tanımlanan rüzgâr, daha teorik bir ifadeyle ısı enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmesiyle oluşan hareket şekli olarak belirtilebilir (Özdamar, 2020).

Atmosferimize giren güneş ışınları havayı ısıtır. Kara parçaları üzerinde bulunan hava ile denizlerimiz, göllerimiz gibi su kütleleri üzerinde bulunan havanın ısınma süreleri eşit değildir. Suyun üzerinde ki havanın ısınma süresi daha geçtir. Kara parçası üzerinde bulunan hava ısınıp henüz ısınmamış su parçası üzerinde yer alan havaya doğru hareket eder. Bu döngü rüzgarı oluşturur. Bu durum sıcaklık etkilerin farklılıklarından kaynaklı mevsimsel olarak farklılık göstermektedir. Genellikle rüzgar önünde engel bulunmayan yüksek kesimlerde ve vadiler de daha çok meydana gelmektedir (Akınsal, 2009).

Rüzgârın önüne engel konulduğunda o engele uyguladığı basınçtan yararlanarak kullanılan itme kuvveti rüzgâr enerjisinin en temel çalışma prensibidir (Şen, 2000). İlk olarak yelkenli gemilerde güç kaynağı olarak kullanılsa da rüzgâr enerjisi denildiğinde ilk akla gelen yel değirmenleridir. İlk kez M.Ö. 2000'li yıllarda Japonya'da icat edildiği kabul edilen yel değirmenleri o yıllardan bu yana tahıl öğütmede sıklıkla kullanılmıştır. Zamanla Avrupa'da yaygınlaşan yel değirmenleri endüstriyel devrim ile birlikte elektrik üretiminde kullanılmak üzere bugünkü rüzgâr türbinleri oluşturulmuştur. Elektrik üreten ilk rüzgâr santrali ABD'de Vermont eyaletinde 1940 yılında, ülkemizde ise 1998 yılında İzmir Çeşme bölgesinde 3 adet rüzgâr türbini ile kurulmuştur (Şipar, 2011).



**Şekil 2.3.** İlk keşfedildiği dönemlerde kullanılan yel değirmeni

Rüzgâr enerjisi temiz bir enerji kaynağı olup daha küçük alanlara kurulum sağlanabilmektedir. Gece- gündüz fark etmeden yeterli rüzgâr koşullarında üretim sağlayabilir. Bununla birlikte kurulumları kolay olmayıp ciddi ölçümler ve hesaplamalar gerekmektedir. İlk yatırım maliyetleri çok yüksek olması ve gürültülü çalışmaları rüzgâr enerjisinin dezavantajları arasında sayılabilir (Uyar, 2016).

### 3. KURUTMA VE KURUTMA ÇEŞİTLERİ

#### 3.1.Kurutma

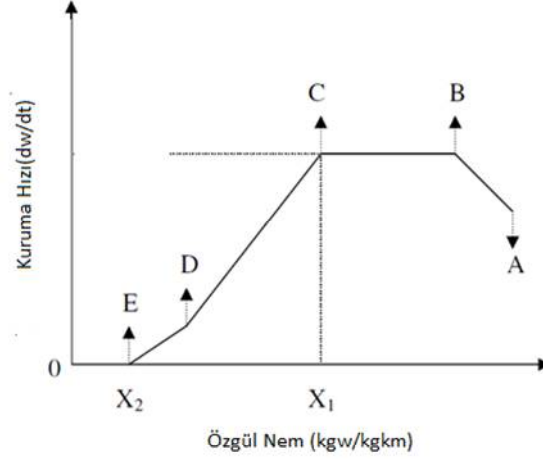
Kurutma işlemi besin maddelerinin uzun ömürlü kullanımını sağlamak amacıyla yıllardır süregelen bir depolama şeklidir. Kurutma ürün içerisindeki su ve nemi uzaklaştırdığından mikroorganizmaların yaşamasını engelleyerek ürünün raf ömrünü uzatır. Daha bilimsel olarak ürün içerisinde birebir zamanlı ısı ve kütle transferi ile nem kaybı kurutma olarak tanımlanır (Sontakke, 2015).

Kurutma 3 evrede gerçekleşmektedir. Bunlar malzemenin ısınması, sabit hızla kurutma ve azalan hızda kuruma olarak tanımlanabilir.

Malzemenin ısınma evresi kuruma başlangıcında gerçekleşir. Malzemenin sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığına gelene kadar bu evre devam eder. Bu evre malzemenin tamamen kuruyuncaya kadar geçen süresi göz önüne alındığında çok kısadır.

Malzemenin yüzeyinde, sabit hızla kurutma evresinin başlangıcında ince bir su katmanı oluşur. İlk kez bu evrede su katmanından buharlaşma gerçekleşir. Bu su katmanı sabit bir kuruma hızı ile buharlaşırken madde içerisindeki su da kılcal kanallar yardımıyla bu katmana taşınır. Sabit hızla kurutma evresi boyunca yüzeyden buharlaşan suyun hızı ile suyun malzeme üzerine iletim hızı birbirine eşittir.

Sabit hızla kurutma evresinde malzeme içerisindeki su kılcal kanallar yardımıyla, buharlaşan su katmanına taşındığı için bir süre sonra malzeme içerisindeki taşınması gereken su miktarı minimuma inecektir. Bununla birlikte de malzeme yüzeyindeki su katmanı gittikçe azalacaktır. Buharlaşan su miktarı öncekine göre azalacağından bu evre azalan hızla kurutma evresi olarak adlandırılır (Yağcıoğlu, 1999).



**Şekil 3.1.** Kuruma hızının özgül nem değerine göre kuruma eğrisi

Şekil 3.1.'de kuruma hızının nem değeri ile olan değişimi basit bir eğriyle gösterilmiştir. Grafikte bulunan C noktası kurutulacak ürünün özelliklerine bağlı değişen kritik nem miktarını belirtmektedir. Ürün yüzeyinde ilk olarak ortaya çıkan kuru bölgeye “kritik nokta” denir. Kritik nokta sabit kuruma evresi sonu ile azalan hızda kuruma evresinin başını temsil etmektedir. AB alanı kurutucunun ve kurutulan ürünün ısınma süresidir. BC alanı ise buharlaşma bölgesi olarak tanımlanabilir. Şekil 3.1.' de verilen kurutma hızının grafiği farklı periyotlar barındırmaktadır. Öncelikle nem doymuş halde ürün yüzeyinden buharlaşarak ayrılır. Kurutma işlemi devam ettikçe buharlaşacak sıvı miktarı giderek azalır. DE alanı ürün içerisindeki suyun yüzeye çıkararak en yavaş şekilde buharlaştığı alandır. AB alanı ise kararsız durum olarak adlandırılırken, BC alanı sabit hız zamanını belirtir.

### 3.2. Kurutma Çeşitleri

Isı ve kütle giriş çıkışının olduğu kurutma işlemleri farklı çeşitlerde gerçekleşebilir. Bu farklılık endüstriyel ortamda kurutucu çeşitlerini sınıflandırmamıza yardımcı olmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle artan bu sistemler genel başlıklar altında direkt kurutma ve indirekt kurutma olarak ayrılabilir. Direkt kurutma işlemi konveksiyonlu kurutma olarak isimlendirilirken indirekt kurutma kontakt ve radyasyonla kurutma şeklinde ayrılabilir.

Kurutma çeşitleri en bilinenleriyle 3 şekilde gerçekleşir.

Konveksiyonla kurutma işleminde madde içerisinde ki suyun buharlaşması için gereken ısı, bir gaz (çoğunlukla hava) tarafından taşınır. Taşınan sıcak hava kurutulacak maddenin içinden, üzerinden ve arasından geçerek maddeyi kurutur. Bu yöntemin ısı verimi, egzoz havasındaki enerjinin geri kazanımı zorluğu nedeniyle azdır. Ancak kullanımı en yaygın kurutma tipidir. Kurutma gazının sıcaklığı 40 °C - 500 °C arasında değişir.

Kontakt kurutmada ise malzeme içerisindeki suyun buharlaşması için gerekli ısı, iletim yoluyla taşınır. Yani kurutulacak maddenin temas ettiği yüzeyden, maddeye ısı geçişi olur. Gaz akışının olmadığı bu kurutma tipinde, kurutulacak malzemenin bulunduğu ortamın neminin doymuş duruma gelmemesi için vakum uygulaması yapılması gerekir.

Radyasyonla kurutma her ne kadar indirekt kurutucular içerisinde girse de bu kurutma tipinde kurutma işlemi ışın yoluyla olur. Radyasyonla kurutma tipine örnek olarak mikrodalga kurutucular ve radyo frekanslı kurutucular verilebilir. Kullanımı yaygın olmasa da bu kurutma tipi ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında kullanılır. Genellikle mikrodalga kurutucular kâğıt toplama ve kalın ağaç parçalarının kurutulmasında tercih edilir. Hem yatırım hem de işletim maliyetleri yüksektir (Al-Bayati, 2017; Atalay, 2015).

İletim, taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşen kurutma sistemlerinin yanı sıra iletim-taşınım, taşınım-ışınım gibi birlikteliklerle gerçekleşen kurutma sistemleri de mevcuttur. Bu ikili ısı transferlerini barındıran kurutma sistemlerinin ilk kurulum maliyetleri yüksek olmasına rağmen kurutulan ürünün kalitesi oldukça yüksektir.

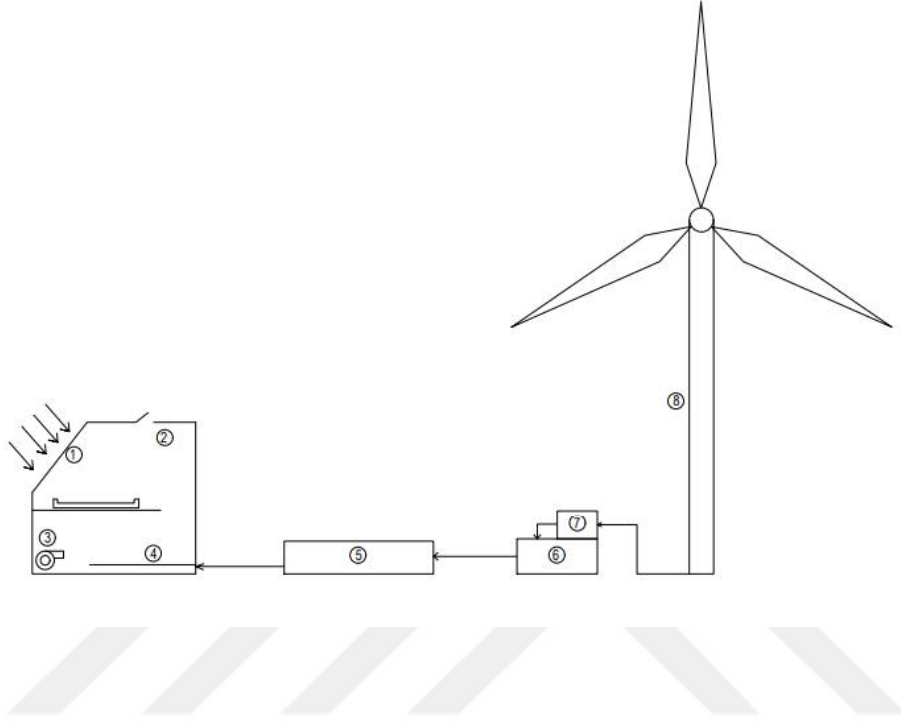
İstenilen ürüne uygun kurutucu seçiminde göz önüne alınacak kriterler ön maliyetin belirlenmesi, yatırım ve işletme maliyetleri ile kurutma testi davranışlarıdır. Bu değerlendirmeler dışında ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve süreleri dikkate alınmalıdır. Buna örnek olarak çizelge 3.1 verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve 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	
Hindistan Cevizi	65-92			4-20
<b>Meyveler</b>	55-80			6-24
Üzüm	60-65			24
Elma(1.Kademe)	70-88			8
Elma(2.Kademe)	74			8
Şeftali, Armut	68			24-30
<b>Sebzeler</b>	50-65			2-18
Havuç	70			14-24
Mantar				
Soğan	65			14-24
Çay Yaprakları(Fanaj veya İlk Kurutma)	55-60			10-15
Çay Yaprakları(Kurutma)	38			4-8
	70-110			1-2

## 4.KURUTMA SİSTEMİ

Bu çalışma kapsamında geliştirilen güneş ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sisteminin akış şeması Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



1. Güneş Paneli

5.Jel Akü

2. Kurutma Kabini

6.İnverör

3. Fan

7. Rüzgâr Jeneratörü

4. Rezistans

8.Rüzgâr Türbini

**Şekil 4.1.** Güneş ve rüzgâr enerjisi destekli kurutma sistemi akış şeması

Şekil 4.1.'de akış şeması verilen bu sistemin çalışma prensibi kısaca şu şekildedir:

Sistem hem güneş hem de rüzgâr enerjisini alabilecek bir konuma yerleştirilmiştir. Kurutma işlemi güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisi ile gerçekleştirilmiştir. Kolektörden gelen sıcak hava fan yardımıyla sisteme üflenmiş ve sistemin üst kısmından alt kısmına doğru ilerleyerek kabin içerisindeki tepside yer alan ürünün nemini ısı ile buharlaştırmış ve kurutma havasına karışmasını sağlamıştır. Kurutma havası belirli bir süre

sonunda nem alma yeteneğini kaybederek ve ağırlaşarak aşağı doğru inmiş ve bu durumda kurutma ünitesinin üst kısmında yer alan klape açılarak kurutma iç havasının atmosfere atılması sağlanmıştır. Sistemde elektrik enerjisine fanın çalıştırılması için ihtiyaç duyulmuştur. Fanın çalışması için gereken bu elektrik enerjisi ise rüzgâr enerjisi ile karşılanmıştır. Bunun için rüzgâr enerjisi elektrik enerjisi olarak bataryaya (jel aküye) depolanmıştır. Sistemin alt kısmına ayrı bir rezistans koyulmuş olup güneş enerjisinin yetersiz kaldığı zamanlarda sistemin alt kısmına yerleştirilen rezistans devreye alınarak kurutma işleminin 45°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Rezistansın tükettiği enerji ise yine jel aküde depolanan rüzgâr enerjisi ile karşılanmıştır. Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b’de rüzgâr ve güneş enerjisi destekli hibrit kurutma sisteminin montaj resimleri gösterilmiştir.



**Şekil 4.2a.** Güneş ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sistemi montaj resmi (önden görünüş)



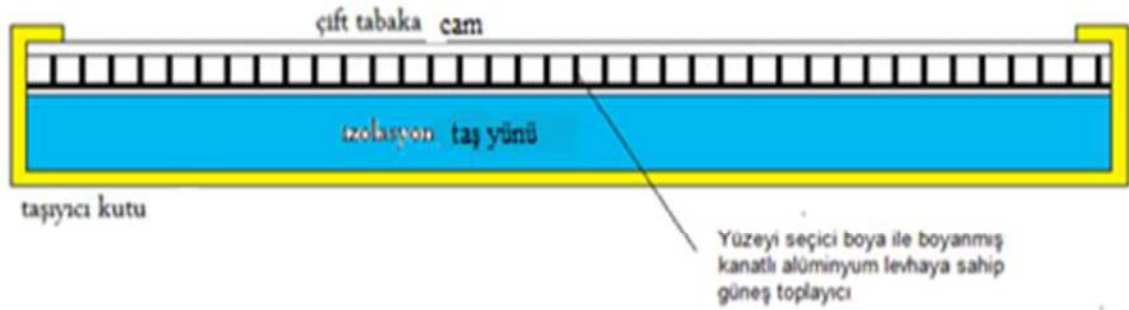
**Şekil 4.2b.** Güneş ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sistemi montaj resmi (yandan görünüş)

Kurutma ünitesi kolektör, fan, rezistans ve kurutma kabininden oluşmuştur. 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 paslanmaz çelik sac malzemeden kalıpta hazırlanmış bir ana parçanın içine yerleştirilmiş izolasyon malzemesi (taş yünü), siyaha boyanmış güneş toplayıcı alüminyum levha ve iki katlı cam tabakadan meydana gelmiştir. Kurutma kabininin dış kısmı paslanmaz çelik malzeme bükülerek oluşturulmuştur. Kurutma kabininin ara kısmında ise izolasyon malzemesi olarak taş yünü kullanılmış ve izolasyon malzemesi paslanmaz çelik sac ile kapatılmıştır. Kurutma kabini tek raftan meydana gelmektedir. Sistemde hava akışını sağlayan fan ise kurutma kabininin iç ön kısmına yerleştirilmiştir. Ayrıca sistemin alt kısmına rezistans yerleştirilmiş olup rezistans güneş enerjisi ile kurutma esnasında devre dışı bırakılmıştır. Bu sayede güneş ışınımının yetersiz kaldığı zamanlarda sistem alt kısmına yerleştirilen termostat yardımıyla kurutma işleminin ortalama 45°C sabit sıcaklıkta rezistans ile gerçekleştirilmesi söz konusu olabilmektedir. Rüzgâr türbini 1.5 m uzunluğunda alüminyum malzemeden oluşan direk üzerine yerleştirilmiştir. Rüzgâr türbininin gövde ve kanat bölümleri kompozit malzemeden

yapılmıştır. Rüzgârdan elde edilen enerji şarj kontrol cihazı ve dönüştürücü yardımıyla jel aküde AC akım olarak depolanmıştır.

#### 4.1. Güneş Toplayıcı

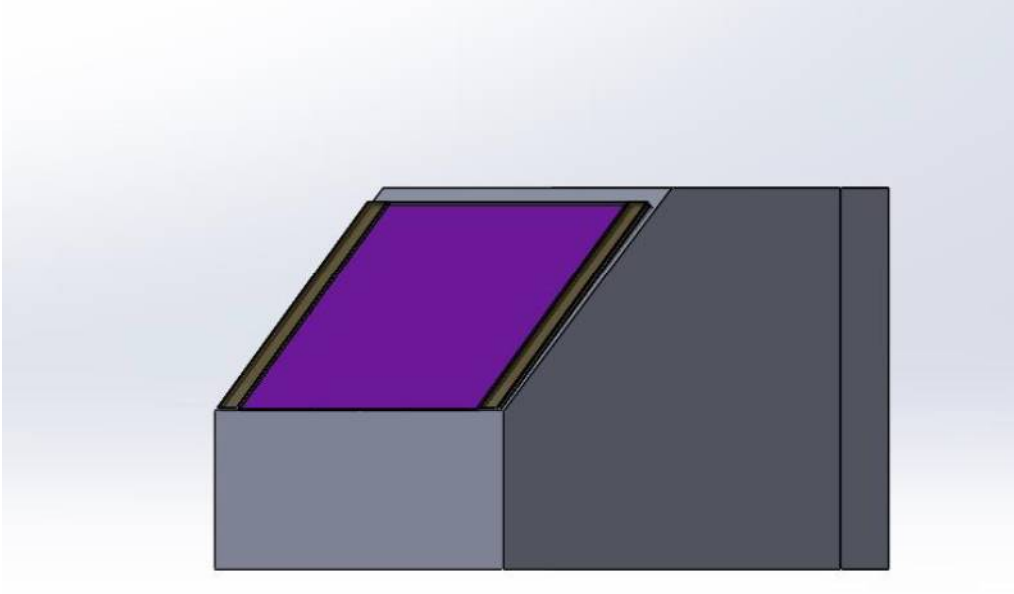
Güneş toplayıcı olarak kullanılan havalı güneş kolektörü, sistemin kanatlı bir yapıda olmasının daha uygun olacağı göz önüne alındığında sistemin temel olarak iki ucu tamamen açık olan toplayıcıların ana gövdesi paslanmaz çelik sac malzemedен kalıpta hazırlanmış bir ana parçanın içine yerleştirilmiş izolasyon malzemesi (taş yünü), siyaha boyanmış güneş toplayıcı alüminyum levha ve iki katlı cam tabakadan meydana gelmiştir. Güneş toplayıcının şematik resmi Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Güneş toplayıcı şematik resmi

#### 4.2. Kurutma Kabini

Deney düzeneğinde kullanılan kurutma kabinin dış kısmı paslanmaz çelikten bükülerek oluşturulmuştur. Isı sızıntısının en aza indirilmesi sağlamak amacıyla bağlantı elemanı kullanılmadan paslanmaz çelik bükülerek şekil verilmiştir. Ara kısımda izolasyon malzemesi olarak güneş panelinde olduğu gibi taş yünü kullanılmış ve paslanmaz çelik ile kapatılmıştır. Kurutma kabini tek raftan meydana gelmektedir. Sistemde hava akışını sağlayacak fan ise kurutma kabininin iç ön kısmına yerleştirilmiştir. Ayrıca sistemin alt kısmına rezistans yerleştirilmiş olup rezistans güneş enerjisi ile kurutma esnasında devre dışı bırakılmıştır. Güneş ışığı olmadığı zamanlarda ise sistem alt kısmına yerleştirilen termostat yardımıyla kurutma işlemi 45°C sabit sıcaklıkta rezistans ile gerçekleştirilmiştir. Rezistans çalıştırılması için gereken elektrik enerjisi yine rüzgâr enerjisinden karşılanmıştır.



**Şekil 4.4.** Kurutma kabini bilgisayar destekli tasarımı

### 4.3. Rüzgâr Türbininin Tasarımı

Bu çalışmada rüzgâr türbini kurutma sistemindeki fanın çalıştırılması için gerekli elektrik enerjisini ve kurutma kabinin altına yerleştirilen rezistansın elektrik enerjisini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu nedenden dolayı rüzgâr türbini kurutma sisteminden bağımsız olarak düşünülmüştür. Rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisi jel aküde depolanmış ve kurutma ünitesi doğrudan jel aküye bağlanmıştır. Rüzgâr türbininden elde edilebilecek maksimum güç değeri Betz yasası kullanılarak tespit edilebilir (Royal vd., 2018):

$$P = \frac{1}{2}CF\rho AV^3 \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'de ifade edildiği üzere rüzgâr türbininden elde edilen güç havanın yoğunluğuna ( $\rho$ ), rüzgârın süpürdüğü alana (A) ve türbin hızına(V) bağlıdır. Rüzgâr türbinlerinin tasarımlarında kullanılan teorik maksimum verimlilik Betz limiti olarak adlandırılır. Bu limit %59,3'tür.

Rüzgâr türbin gücünü belirlemek için 5 mm kalınlıktaki muz dilimlerinin kuruma davranışının incelendiği deney baz alınmıştır. Öncelikli olarak türbin maksimum rüzgâr alabilecek bir yere 6 saat süren deneyde fanın çalıştırılması için gerekli enerji miktarı Eşitlik(4.1) ve Eşitlik(4.2) kullanılarak toplam 1.62 kWh olarak tespit edilmiştir. Rüzgâr

türbininin konumlandırıldığı bölgeye göre jel akünün depolandığı akşam saatlerinde minimum rüzgâr hızı 3m/s, hava yoğunluğu ise 1.215 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Bu durumda Betz limiti olarak tanımlanan CF değerini rüzgâr türbininden elde edilen gücün (P) rüzgârdaki gerçek güce (P<sub>0</sub>) oranı olarak ifade etmek mümkündür (Danish, 2021; Ndukwu vd., 2020):

$$\frac{P}{P_0} = 0.5 \left( 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \right)^2 \left( 1 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \right) \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de verilen  $v_1$  değeri rotor yönündeki hız,  $v_2$  ise rotorun akış aşağısındaki hızdır. Bu deney süresince kurutucudan elde edilen güç değeri Eşitlik(4.1) ve Eşitlik(4.2)’ye eşitlenerek rüzgârın süpürdüğü alan 0.0085 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.5.** Rüzgar türbini resmi



Şekil 4.6. İnverter ve jel akü resmi

Çizelge 4.1. Güneş enerjili kurutucu ve rüzgar türbini için tasarım parametreleri

Güneş Enerjili Kurutucu Elemanları	Boyutlar
Kolektör Uzunluğu[m]	0.4
Kolektör Genişliği [m]	0.5
Kurutma Kabini Uzunluğu [m]	0.75
Kurutma Kabini Genişliği [m]	0.6
Kurutma Kabini Yüksekliği [m]	0.6
Rüzgar Türbini Elemanları	
Rüzgar Türbini Ağırlığı [kg]	5
Rüzgar Türbini Kanat Ağırlığı[kg]	0.66
Kanat Rotor Çapı [m]	0.22
Kanat Uzunluğu[m]	0.107
Başlangıç Rüzgar Hızı[km/h]	3
Optimum Rüzgar Hızı[km/h]	12.5
Kesme Rüzgar Hızı[km/h]	45
Maksimum Güç [W]	500
Ortalama Güç[W]	400
Elektriksel Güç Değeri	40 amp /12V-AC
Jel Akü Güç Değeri	12V/100Ah
Modifiye Sinüs İnverter Güç Değeri	12 V/1000 W

#### 4.4. Ölçüm Cihazları

Güneş ve rüzgar enerjisi destekli kurutma sisteminde testlerin yapılabilmesi için, güneş ışınımını ölçmek amacıyla piranometre, muzun ağırlık değişimini test edebilmek amacıyla hassas terazi, sıcaklık sensörü, rüzgar türbininin ürettiği akımı ölçebilmek amacıyla dijital multimetre, veri kaydı için data logger, bağıl nem ölçüm sensörü ve rüzgar hızını ölçebilmek adına anemometre kullanılmıştır. Ölçümler deneyler sırasında data logger ile veri tabanına aktarılmış ve bilgisayar ortamına işlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazların fotoğrafları Şekil 4.7- Şekil 4.13. arasında verilmiştir. Ayrıca ölçüm cihazlarının hassasiyetine ilişkin veriler de Tablo 4.2' de verilmiştir.



**Şekil 4.7.** Piranometre (güneş ışınımını ölçüm cihazı) resmi



Şekil 4.8. Hassas terazi resmi



Şekil 4.9. NTC sıcaklık sensörü



Şekil 4.10. Dijital multimetre resmi



Şekil 4.11. Datalogger resmi



Şekil 4.12. Bağlı nem ölçüm sensörü resmi



Şekil 4.13. Anemometre (hava hızı ölçüm cihazı) resmi

**Çizelge 4.2.** Ölçüm ve test cihazları ve özellikleri

<b>Ölçüm Cihazı</b>	<b>Model</b>	<b>Ölçüm Aralığı</b>	<b>Ölçüm Türü</b>	<b>Hassasiyeti</b>
<b>PLC Datalogger</b>	VTPLC		Veri Aktarma Cihazı	Kalibre Edildi.
<b>Anemometre</b>	SIEMENS	(0-5) m/s	Hava Hızı	0,03 m/s
<b>Sıcaklık Hissedici Eleman</b>	PT1000	(-40, +70 <sup>0</sup> C)	Sıcaklık, Nem	DIN IEC751'e göre Klas B.
<b>Dijital Multimetre</b>	TT T-ECHNI-C DT-830D	200m-2000m-20-200-1000V Voltaj	Akım, Gerilim ve Direnç	%0,5
<b>Piranometre</b>	APOGEE MP-200	Max.1750 W/m <sup>2</sup>	Güneş Enerjisi Ölçümü	± %5
<b>Hassas Terazi</b>	WTC 2000	Max. 2 kg	Ağırlık Ölçer	0.01 gr

#### 4.5. Kurutma Karakteristikleri

Kurutma sistemlerinin ne kadar etkili olduğunun hesaplanabilmesi için özgül nem alma hızı, kuruma hızı ve nem alma verimlerinden faydalanılmaktadır. Aşağıda bu ifadelerin tanımları verilmiştir:

##### **Özgül Nem Alma Hızı (SMER):**

Bir kurutma sisteminin enerji verimliliği sıklıkla özgül nem uzaklaştırma (SMER: Specific Moisture Extraction Rate) hızı ile belirlenir. Bu değer, birim kWh enerji kullanımı için, kurutulacak üründen uzaklaştırılan su kütlesini belirtmektedir. Özgül nem çekme miktarı kurutma işleminin enerji verimliliği için önemli bir parametredir.

SMER için  $SMER_{hp}$  (ürün içerisinden uzaklaşan nem oranı) ve  $SMER_{ts}$  (ürün içerisinden uzaklaşacak nem oranı) şeklinde iki belirtilebilir.

$$SMER_{hp} = \frac{Mwa}{Eg} \text{ (kg}_{H_2O}\text{/kWh)} \quad (4.3)$$

$$SMER_{ts} = \frac{Mwb}{Eg} \text{ (kg}_{H_2O}\text{/kWh)} \quad (4.4)$$

#### **Nem Alma Verimi (Hızı) (MER):**

Kurutucudan birim zamanda atılan nemin kütlesi olarak belirtilir.

$$MER = \frac{Mwc}{t_a} \eta \text{ (kg}_{H_2O}\text{/h)} \quad (4.5)$$

#### **Nem Alma Verimi ( $\eta$ ):**

Kurutma havası tarafından hapsedilen nemin kurutma havasınca alınabilecek maksimum neme oranı olarak belirtilmiştir.

$$\eta = \frac{w_2 - w_1}{w_a - w_1} \quad (4.6)$$

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

$$\eta = \frac{m_0 - m_t}{V\rho t_k (w_a - w_1)} \quad (4.7)$$

Kurutma sıcaklığının yükselmesi nem oranındaki hızı azaltmaktadır. Nem oranı (MR) aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir:

$$MR = \left( \frac{M_{d,i} - M_e}{M_{d,o} - M_e} \right) \quad (4.8)$$

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

$$MR = \frac{M_{d,i}}{M_{d,o}} \quad (4.9)$$

Kurutulacak ürünün boyutları, kuruma zamanını belirlemede etkili rol oynar.

#### 4.6. Kurutulacak Ürün Belirlenmesi

Günümüzde kuru meyveye gerek yurt içi gerekse yurt dışı artan talep kuru meyve üretimini daha seri bir hale getirmiştir. Ülkemizde de kuru meyve ihracatında 2014 yılında en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Kuru muz, bebek maması, bisküvi, kek, kahvaltılık buğday gevreklerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yaş hali kadar kuru hali de sağlıklı olan kuru muz başta mideye olmak üzere, kalp ve damar hastalıklarına, öksürüğe, göğüs ağrılarına iyi gelmektedir. Ayrıca stresi azaltarak tansiyonu düşürmeye de yardımcı olmaktadır (Atalay, 2015).

Bu sistem içerisinde gerçekleştirilen güneş ve rüzgâr enerjisi destekli kurutma sisteminde kurutulacak ürün olarak muz tercih edilmiştir. Günümüzde yerli ve ithal olarak her mevsim kolaylıkla ulaşılabilir olması bu meyveyi tercih etmemizin sebepleri arasındadır.

Muzlar kabukları soyulduktan sonra değişik kalınlıklarda (2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm) dilimlenmiştir. Her deney için taze olarak soyulup dilimlenerek kurutma tepelerine yerleştirilmiştir. Bunun sebebi ise muzların havayla temasından kaynaklanan kararmaların oluşmasına engel olmaktır.

Muz içerisinde ki su oranları belirli hesaplamalarla bulunabilir:

Yaş Ürün Ağırlığına Göre Su Oran Hesabı:

$$SO = \frac{YA - KA}{YA} \quad (4.10)$$

Kuru Ürün Ağırlığına Göre Su Oranı Hesabı:

$$SO = \frac{KA - YA}{KA} \quad (4.11)$$

TSE muz kurusu için oluşturulmuş standart değer TS 13691 olarak isimlendirilmiştir. Bu Standartlara göre kuru muzun öncelikle sağlam, parçalara dağılmamış bir bütün halinde ve temiz olması gerekmektedir. Yabancı bir tat ve koku bulunmamalıdır. Herhangi bir zirai ilaç ürününün üzerinde bulunmamalı ve yabancı maddeler üzerinde olmamalıdır.

Sunulan bu çalışmada gerçekleştirilen her bir deneyde farklı kalınlıklara sahip muz dilimlerinin kurutma karakteristiği belirlenmiştir. Farklı kalınlığın tercih edilmesindeki en önemli amaç sistem için optimum kurutma süresini belirlemektir. Muz dilimlerinin kuruma davranışları literatürde farklı kurutma teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Tünel tipi elektrikli kurutucular (Abona ve Sam-Amoah, 2011; Karim ve Hawlader, 2005), güneş enerjisi ve ısı eşanjörü destekli hibrit güneş enerjisi kurutucu (Amer vd., 2010), mikrodalgada dondurarak kurutma yöntemi (Jiang vd., 2010), mikrodalga ve mikrodalgakızılötesi kombinasyonu (Öztürk vd., 2017) ve ince tabaka dolaylı bir güneş kurutucusu (Fadhel, 2011) literatürde muz dilimlerinin kurutma karakteristiğini belirlemek amacıyla tercih edilen kurutma teknolojileri arasında yer almaktadır. Çalışmalarda muz dilimleri genel olarak, 40-60°C sıcaklık aralığında, ortalama 5-7 mm kalınlığında dilimlenerek %75-77 (wb) nem içeriğinden %16.8-27 (wb) nem içeriğine düşürülünceye kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi öncesinde 5-7 mm kalınlığındaki muz dilimleri limon suyu, bal daldırma, askorbik asit ve tuz çözeltisi gibi 4 farklı ön işleme tabi tutulmuştur (Abona, 2011). Sunulan çalışmada gerçekleştirilen deneylerde ise muz dilimleri herhangi bir ön işlem yapılmadan, her bir deneyde farklı kalınlık olmak üzere kurutma tepsisine yerleştirilerek kurutulmuştur. Muz dilimleri 4 farklı kalınlık için (2, 3, 4 ve 5 mm) ayrı ayrı incelenmiştir. Kurutma süreleri ise 2mm kalınlık için ortalama 4 saat, 5 mm kalınlık için ortalama 6 saat olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla farklı kalınlıklardaki ürün için kurutma süreleri 4-6 saat aralığında değişim göstermiştir.

#### **4.7. Kurutma İşleminde Gerçekleşen Kütle Transfer Modellenmesi**

Bu modelleme sisteminde 2. Fick kanununun difüzyon katsayısından yola çıkılmıştır. Bu katsayı aşağıdaki gibi belirtilmektedir;

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 (X) \quad (4.12)$$

4.10 da gösterilmiş olan değer değişik geometriler üzerinde işlenebilir. Belirli kalınlığa sahip olan ve sabit difüzyon sayılı bir ürün için nem değeri aşağıdaki gibi çözümlenebilir;

$$X_i^* = \frac{x_i - x_e}{x_0 - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4x l^2}\right) x t_k\right) \quad (4.13)$$

Eşitliğin başında ki  $X_i^*$  değeri herhangi bir meyvenin nem içeriğini belirtmekte olup bizim çalışmamızda bir muz dilimi için kullanılan nem değeridir.

Arrhenius eşitliği muz dilimi üzerinde değerlendirilerek uygulanmıştır. Bu eşitlik değerleri aşağıda verilmiştir;

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R(T + 273)}\right) \quad (4.14)$$

$$D_{eff} = 2,74 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{24034,2}{R(T + 273)}\right) \quad (4.15)$$

$$\rho = 770 + 16.18X - 295,1e^{-X} \quad (4.16)$$

$$c_p = 1,675 + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{X} + 1} 2,5\right) \quad (4.17)$$

Katı maddeden nem geçişi kütle transferinin temel taşıdır. Nem transferi ısı transferini takip etmektedir. Isı transferi ısı oluşumunu ve maddeden havaya transfer gerçekleşirken oluşan iletimsel ısı transferini kapsamaktadır. Muz dilimleri kurutma esnasında gerçekleşecek olan sıcaklık ve nem değerlerini belirlemek için bu deney içerisinde gerçekleşen matematiksel model kabulleri altta belirtilmektedir;

1. Muz dilimleri içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımları homojen şekilde oluşmaktadır.
2. Isı transferi iletim ve taşınım yoluyla oluşmaktadır.
3. Sıcaklık ve nem değeri nem geçişine bağlıdır.

4. Muz dilimleri kuruduktan sonra da sıcaklık dağılımı homojendir.

#### 4.8. Kurutma İşleminde Gerçekleşen Isı Transferi Modellemesi

$$\frac{d(MCp\bar{T})}{dt} = Qu + hA(Ta - \bar{T}) + \lambda \frac{dM}{dt} \quad (4.18)$$

Sıcaklığın artma miktarı güneş paneli üzerinden içeriye gelen ısı miktarı yani  $Qu$ , taşıma gerçekleşirken kaybedilen veya kazanılan ısı miktarı ile buharlaşma sebebiyle meydana gelen ısı değerinin toplamına eşit olduğu 4.16'da ki eşitlikte belirtilmiştir.

Taşınım yoluyla ısı transfer katsayısı ( $hs$ ) aşağıdaki formülasyon ile bulunabilmektedir;

$$\frac{T - Ta}{T_0 - Ta} = \exp\left[-\left(\frac{hsA}{\rho CpV}\right)t_k\right] \quad (4.19)$$

Sonlu farklar metodu kullanılarak hesaplanan nem içeriği bağlantıları 4.18 ve 4.19 da verilmektedir.

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_{n+1} - \bar{X}_n}{2} \quad (4.20)$$

$$M = Ms(1 + \bar{X}) \quad (4.21)$$

Kurutulacak muz dilimleri kütlesi  $M$ , kurumuş olan muz dilimlerinin kütlesi  $Ms$ ' dir. Diğer değişken ise nem değerini belirtir (Atalay, 2015).

Isı transferi aşağıdaki bağlantılar yoluyla hesaplanır;

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}}{dt} + \frac{2,5Ms(dX/dt) + hA\bar{T}}{Ms(1,675 + 2,5\bar{X})} \\ = \frac{Qu + hATa + \lambda Ms(dX/dt)}{Ms(1,675 + 2,5\bar{X})} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \frac{\bar{X}_{n+1} - \bar{X}_n}{\Delta t} \quad (4.23)$$

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{\bar{T}_{n+1} - \bar{T}_n}{\Delta t} \quad (4.24)$$

$$\bar{T} = \frac{\bar{T}_{n+1} + \bar{T}_n}{2} \quad (4.25)$$

#### 4.9. Hata Analizi ve Ölçüm Belirsizlikleri

Deneysel çalışmalar süresince elde edilen sonuçların doğruluk miktarını ölçmek için hata analizi yapılmalıdır. Yapılan deney sonuçlarında ki hata iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. İlki deney düzeneğinden ve ölçme cihazlarının yapısından kaynaklı hatalardır, diğeri ise deneyi yapan kişinin ihmali kaynaklı hatalardır (Akpınar, 2005).

Muz kurutma deneylerinde oluşan ölçüm hataları hata analizi yapılarak belirlenmiştir. Çizelge 4.2' de bu çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının duyarlılıkları verilmiştir.

##### **Sıcaklık ölçümlerinden kaynaklı belirsizlikler:**

Kurutma sisteminin 2 ayrı noktasından sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için kullanılan NiCr-Ni termo elemanlar (termocouple)  $\pm 0.05$  hassasiyetindeki kalibrasyon termometresi ile kalibre edilmiştir. Deneyler sırasında ölçülen sıcaklık değerleri kalibrasyon sonucunda elde edilen katsayılarla çarpılarak belirlenmiştir. Kurutma sistemi içerisindeki sıcaklık ölçümünü yapabilmek adına kullanılan termometreden okunan sonuçlar  $\pm 0.05$  ölçüm hassasiyetinde alınacaktır.

(a1) Termometreden kaynaklanan hata payı  $\pm 0.05$  °C

(b1) Duyar elemandan kaynaklanan hata payı  $\pm 0.4$  °C

(c1) Kontrol ünitesinden kaynaklanan hata payı  $\pm 0.01$  °C

##### **Zaman ölçümlerinden kaynaklı belirsizlikler:**

Kurutma deneyi süresince yarım saatte bir yapılan ağırlık ölçümleri, 15 dakikada bir yapılan rüzgar ve güneş ışınımları ölçümlerinde dijital saat kullanılmıştır. Bu ölçümlerde zamandan kaynaklanan hata payları aşağıdaki gibidir:

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

(b2) Periyodik olarak yapılan ölçümlerden oluşacak hata payı  $\pm 0.01$  dakika

**Kütle kayıpları ölçümlerinden kaynaklanan belirsizlikler:**

Çalışmada kullanılan WTC 2000 marka 0.01 gram duyarlıklı ve 2000 grama kadar ölçüm yapabilen dijital göstergeli cihazın hata payları aşağıda verilmiştir:

(a3) Hassas teraziden kaynaklanan hata payı  $\pm 0.01$  gr

(b3) Okumaktan kaynaklanan hata payı  $\pm 0.01$  gr

**Kurutma havası hızı ölçümlerinden kaynaklanan belirsizlikler:**

Kurutma kabini giriş ve çıkış hava hızını, rüzgâr hızını ölçmek adına anemometre kullanılmıştır. Anemometre ölçümü yapılırken karşılaşılabilecek hatalar aşağıdaki gibi verilmiştir:

(a4) Proben hassasiyetinden kaynaklanan hata  $\pm 0.03$ m/s

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

Genel formülüyle belirsizlik analizi şu şekildedir;

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.26)$$

Bu denklemden R sonuç,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  bağımsız değişkenlerdir. R değeri için toplam belirsizlik Eşitlik 4.26 ile ifade edilmektedir.

**Sıcaklık ölçümünde yapılan hataların matematiksel ifadesi:**

Deney süresince kurutma havası için yapılabilecek sıcaklık ölçümlerinin değerleri Eşitlik 4.27 ile hesaplanmıştır.

$$W_n = [(a1)^2 + (c1)^2]^{1/2} \quad (4.27)$$

$$W_n = [(0,05)^2 + (0,01)^2]^{1/2} \quad W_n = \pm 0,051 \text{ değerine ulaşılmıştır.}$$

**Zaman ölçümünde yapılan hataların matematiksel ifadesi:**

Deneyler boyunca ölçülen kütle kayıpları, depolanan enerji miktarı zamana bağlı olmuştur.

Bu ölçümlerden doğabilecek toplam hata değeri Eşitlik 4.28 de verilmiştir.

$$W_n = [(a2)^2 + (b2)^2]^{1/2} \quad (4.28)$$

$$W_n = [(0,0003)^2 + (0,01)^2]^{1/2} \quad W_n = \pm 0,01 \text{ değerine ulaşılmıştır.}$$

#### **Ktle kayıpları ölçümünde yapılan hataların matematiksel ifadesi:**

Kurutma işlemi sırasında zamana bağlı olarak ölçümü yapılabilcek ktle kaybının hata değeri Eşitlik 4.29 ile hesaplanmaktadır.

$$W_n = [(a3)^2 + (b3)^2]^{1/2} \quad (4.29)$$

$$W_n = [(0,01)^2 + (0,01)^2]^{1/2} \quad W_n = \pm 0,014 \text{ değerine ulaşılmıştır.}$$

#### **Kurutma havası hızı ölçümünde yapılan hataların matematiksel ifadesi:**

Deneyler süresince kurutma havasının hızı ölçülürken yapılabilcek toplam hata değeri aşağıda belirtilmiştir.

$$W_n = [(a4)^2 + (b4)^2]^{1/2} \quad (4.30)$$

$$W_n = [(0,03)^2 + (0,02)^2]^{1/2} \quad W_n = \pm 0,036 \text{ değerine ulaşılmıştır.}$$

## **5. DENEYSEL ALIşMALAR**

Bu çalışmada rüzgar ve güneş enerjisinden yararlanarak tamamen yenilenebilir enerji ile çalışan hibrit bir kurutma sistemi tasarlanıp geliştirilmiştir. Sistemin gerekli tasarımları ve imalat aşamalarından sonra çalışabilirliğini ve verimliliğini test etmek amacıyla deneyler 6.09.2021-12.09.2021 tarihleri arasında yapılmıştır.

Deneyde kullanılmak üzere kurutulacak ürün seğiminin yapılması ve miktarının belirlenmesi ilk aşamadır. İlk olarak bu çalışmada kullanılacak ürünün muz olmasına karar verilmiştir. Her mevsim kolaylıkla ulaşılabilecek olan bu ürün için yerli muz seğilmiştir. Soyulduktan sonra 2mm, 3mm, 4mm ve 5mm olacak şekillerde dilimlenerek hava akımını kolaylıkla sağlayacak olan delikli tepsiye yerleştirilmiştir. Her bir deneyde farklı kalınlıktaki muz dilimleri kurutulmuştur. 1 adet rafı bulunan kurutma kabini için her deneyde yaklaşık olarak 1 kg muz kullanılmıştır. Yapılan 5 deneyde toplam 5 kg muz kullanılmıştır. Herhangi bir n aşama uygulamadan kurutulan muz dilimlerinde renk değişiminin gözle görülebilir şekilde mevcut olduğu ancak koku ve tat olarak herhangi bir değişikliğe maruz kalınmadığı gözlemlenmiştir.

Muz üzerindeki kütle kaybını tespit edebilmek amacıyla 5 adet muz dilimi numune olarak seçilmiş ve kurutma işlemine başlamadan önce ağırlık ölçümü yapılmıştır.



**Şekil 5.1.** Dilimlenerek tepsilere yerleştirilmiş muz dilimleri görünüşü (Kalınlık 5mm)

Ağırlık oranları kuru sayılabilecek düzeye gelene kadar yarım saatte bir hassas terazi ile ağırlık ölçümü yapılmıştır.



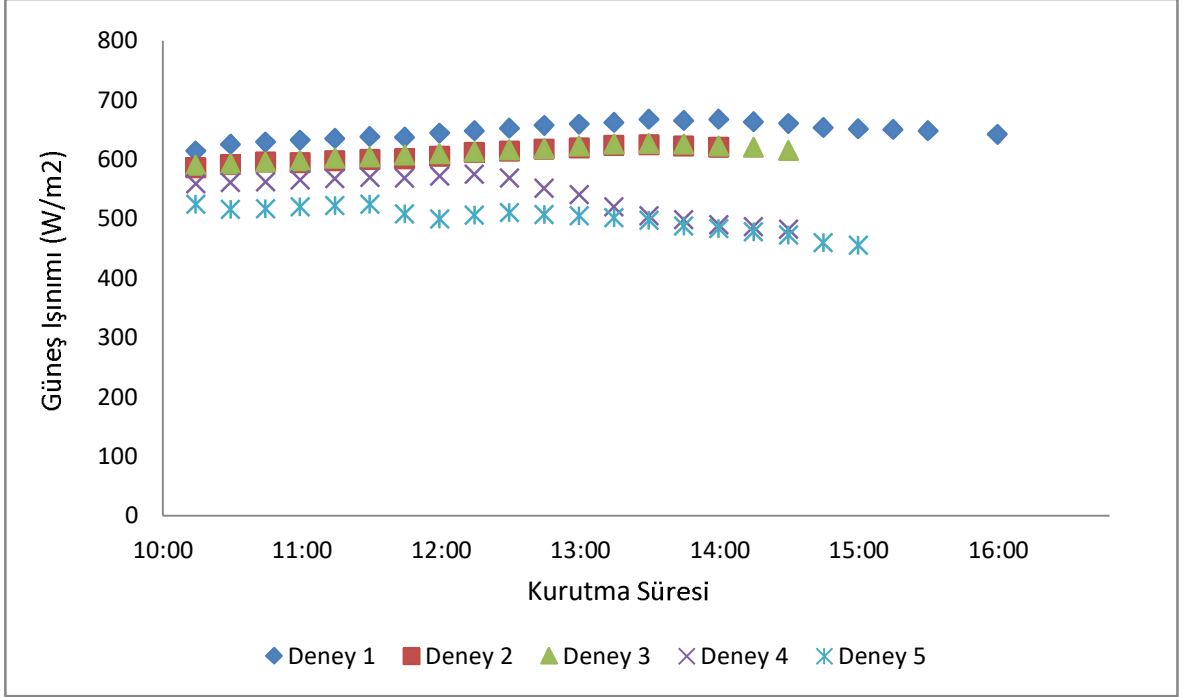
**Şekil 5.2.** Kurutma işlemi sonrasında muz dilimlerinin görünüşü (Kalınlık 5mm)

Kurutma öncesi muz dilimlerine herhangi bir ön işlem uygulanmamıştır. Kurutma işlemi sırasında sisteme yerleştirilen sıcaklık, nem sensörleri ile kabin içerisindeki sıcaklık ve nem değerleri takip edilmiştir. Sistemin giriş ve çıkışına yerleştirilen anemometre ile de kurutma işlemi boyunca hava akış hızı tespit edilmiştir. Ayrıca piranometre ile 15 dakikalık periyotlarda güneş ışınım miktarı ölçülmüştür. Kurutulacak ürünün ağırlık ve nem değişimleri ise 0.01 gr hassasiyete sahip bir hassas terazi ile 30 dakikada bir yapılan ölçümler vasıtasıyla belirlenmiştir. Kurutma işlemi sonucunda elde edilen numuneler nem,

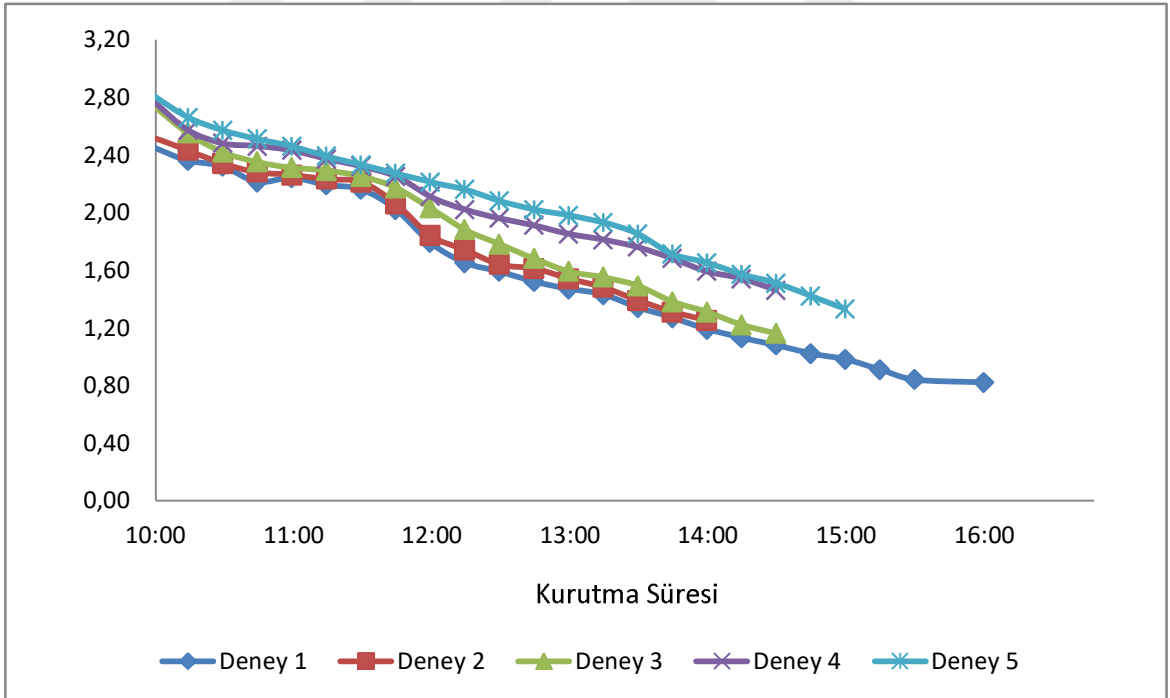
su aktivitesi gibi çeşitli gıda analizlerine tabi tutulmuş ve böylelikle kurutulan ürünün standartlara uygun olup olmadığı tespit edilmiştir.

### 5.1. Kurutma Deney Sonuçları

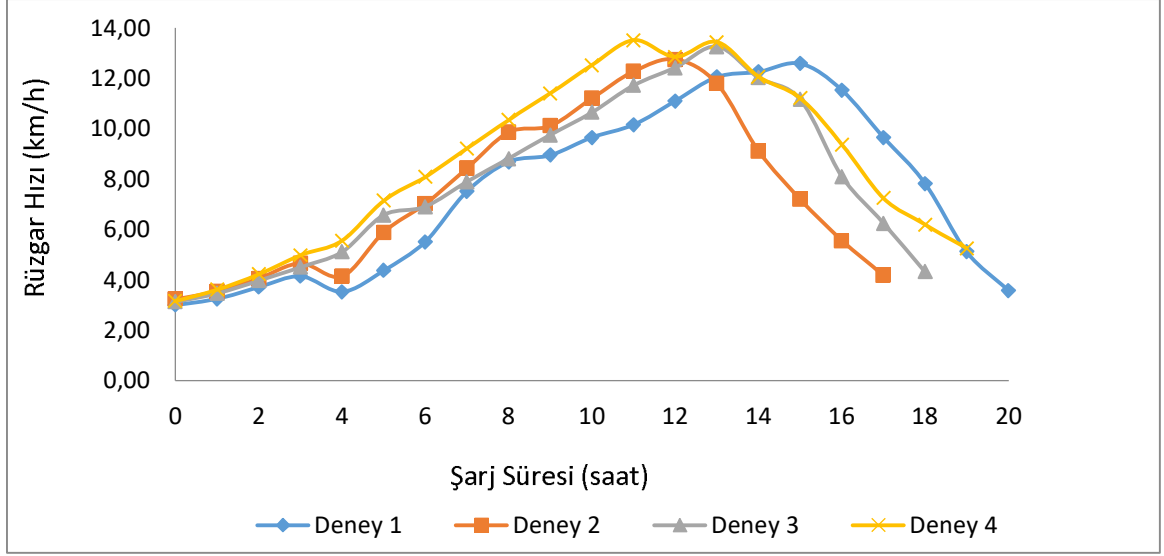
Kurutma deneyleri süresince piranometre ile ölçülen güneş ışıınımı değerleri, anemometre ile ölçülen kabin içi hava hızı değerleri ve rüzgâr enerjisinin jel aküye depolanması sırasında anemometre ile ölçülen rüzgâr hızı değerleri Şekil 5.5 'de gösterilmiştir. Güneş ışıınım verilerine bakıldığında en düşük güneş ışıınım değerleri 4. Gün yapılan deney sırasında elde edilirken, en yüksek güneş ışıınımı değerlerinin ise 1. Gün yapılan deney süresince ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde güneş ışıınımı verilerinin 300-632 W/m<sup>2</sup> arasında değiştiği tespit edilmiştir. 5 gün boyunca deneylerde kabin içindeki hava hızı değerlerinin dış hava verilerine bağlı olarak 0.82-2.81 m/s arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.5' de gösterilen rüzgâr hızı değerleri ise özellikle akşam saatlerinde rüzgâr enerjisinin jel aküye depolanması sırasında ölçülmüştür. Yapılan deneyler süresince rüzgar enerjisi rüzgar hızının etkin olduğu akşam saatlerinde jel aküye elektrik enerjisi olarak depolanmış ve depolanan bu enerji güneş ışıınımının olduğu saatlerde kurutma ünitesindeki fanın çalıştırılması için kullanılmıştır. Bu nedenle rüzgâr hızının ölçümleri rüzgârın etkin olmaya başladığı akşam saat 14.00'da başlatılmış ve jel akü tamamen doluncaya kadar devam ettirilmiştir. Jel akünün tamamen dolun süresi ise rüzgâr etkinliğine ve kurutma süresine bağlı olarak en fazla 20 saat sürmüştür. Şarj işleminin başlatıldığı gündüz saatlerinde rüzgâr hızı değeri belirli aralıklarla ölçülmüş ve saat 17.00'a kadar hava şartlarına bağlı olarak rüzgâr hızının ortalama 0.98-7 km/h arasında değiştiği görülmüştür. Özellikle akşam saatlerinde rüzgârın etkisini artırmasından dolayı rüzgâr hızının maksimum 13.50 km/h seviyelerine kadar çıktığı ve depolama süresince de hava koşullarına bağlı olarak 3.00-13.50 km/h arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Jel aküde depolanan toplam güç miktarının 1.2 kWh'dir. Kurutma işleminin süresine bağlı olarak fanın tükettiği maksimum güç miktarı ise 0.96 kWh' dir. Jel akünün depolama süreleri incelendiğinde en kısa ve en uzun depolama sürelerinin sırasıyla 2. ve 1. deney öncesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeninin ürün kalınlıklarına bağlı olarak değişen kurutma süreleri olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar jel aküde depolanan enerji ile kurutma sistemindeki fanın çalıştırılması için gerekli enerjinin sağlandığını ve ek bir dış enerji kaynağına gereksinim duyulmadığını açıkça ortaya koymuştur.



Şekil 5.3. Her deneyde gün içinde alınmış olan güneş ışınım değerleri (6-12.09.2021)



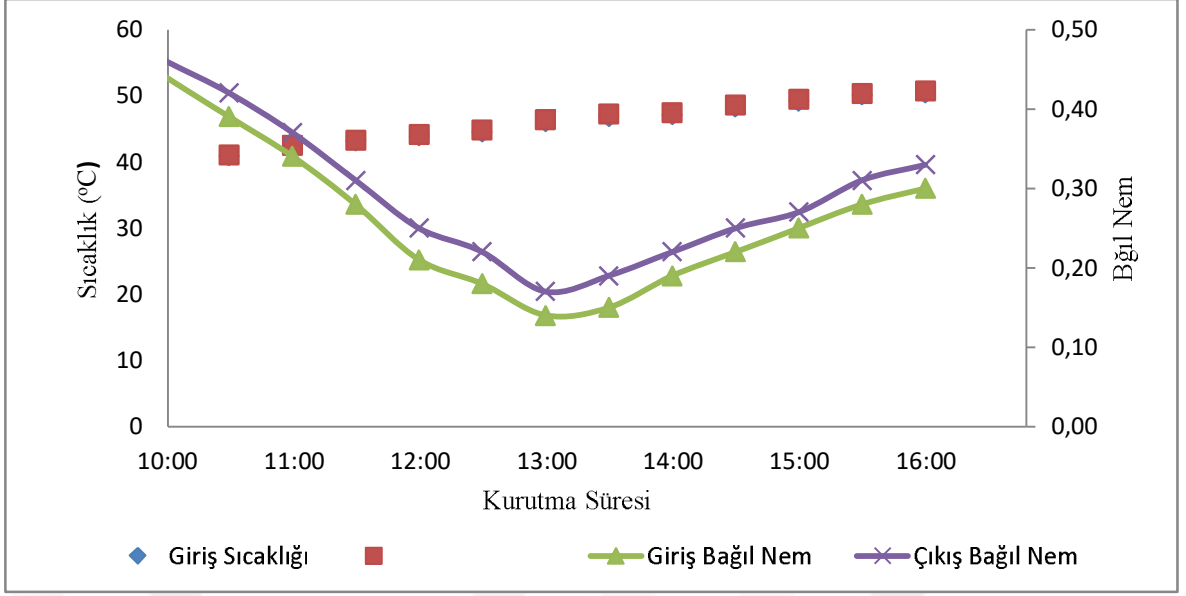
Şekil 5.4. Her deneyde ölçülmüş kabin içi hava hızı değerleri (6-12.09.2021)



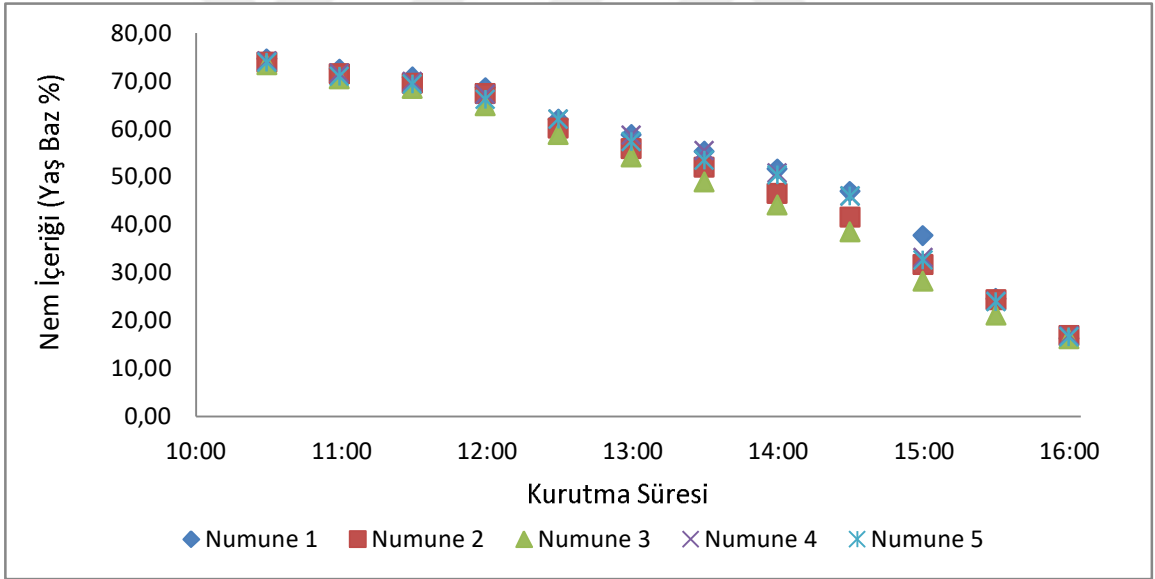
Şekil 5.5. Her deneyde ölçülmüş gün içerisinde ki rüzgar hızı değerleri (6-12.09.2021)

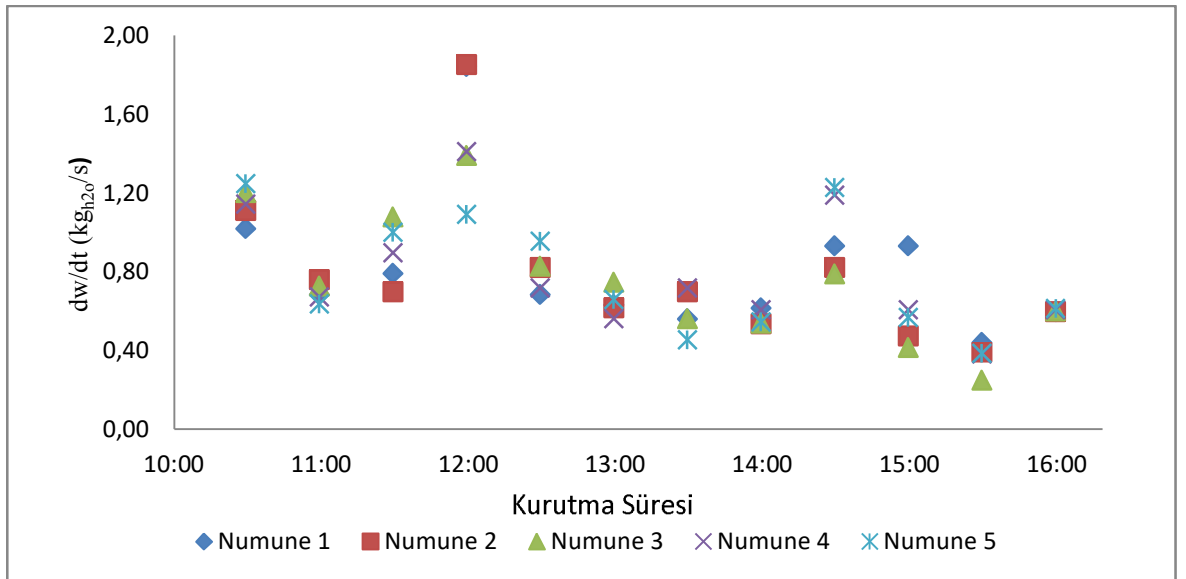
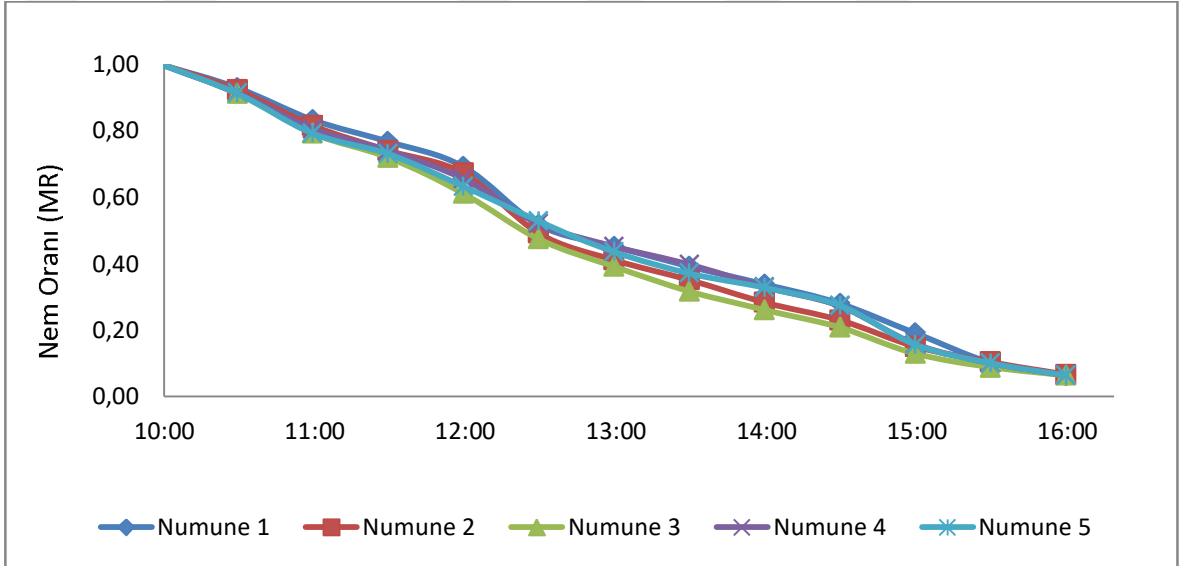
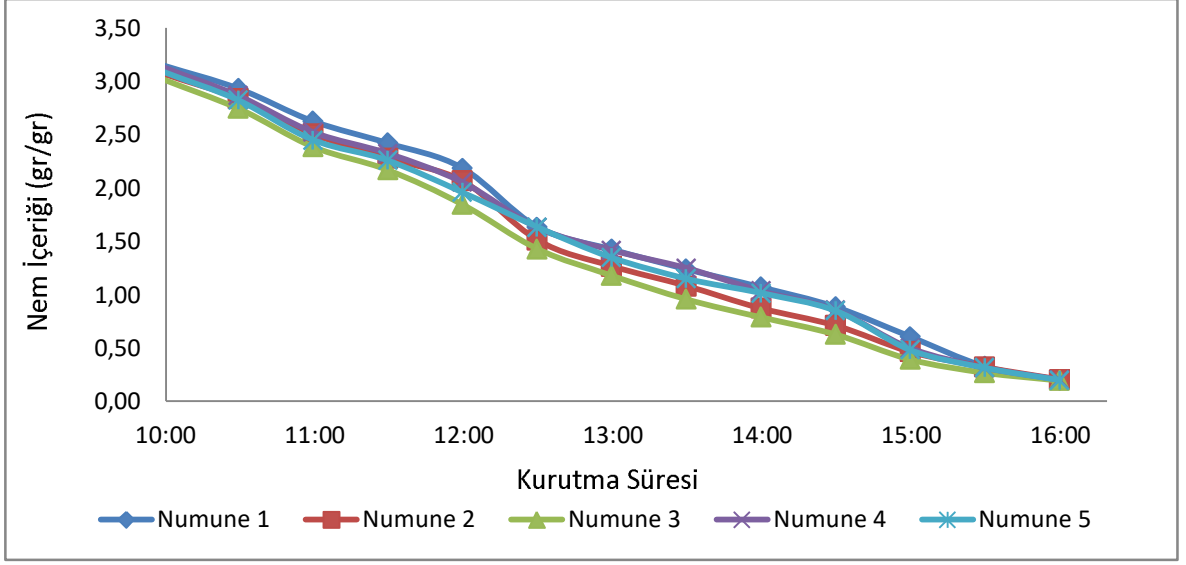
### 5.1.1. Birinci Gün Kurutma Deney Sonuçları

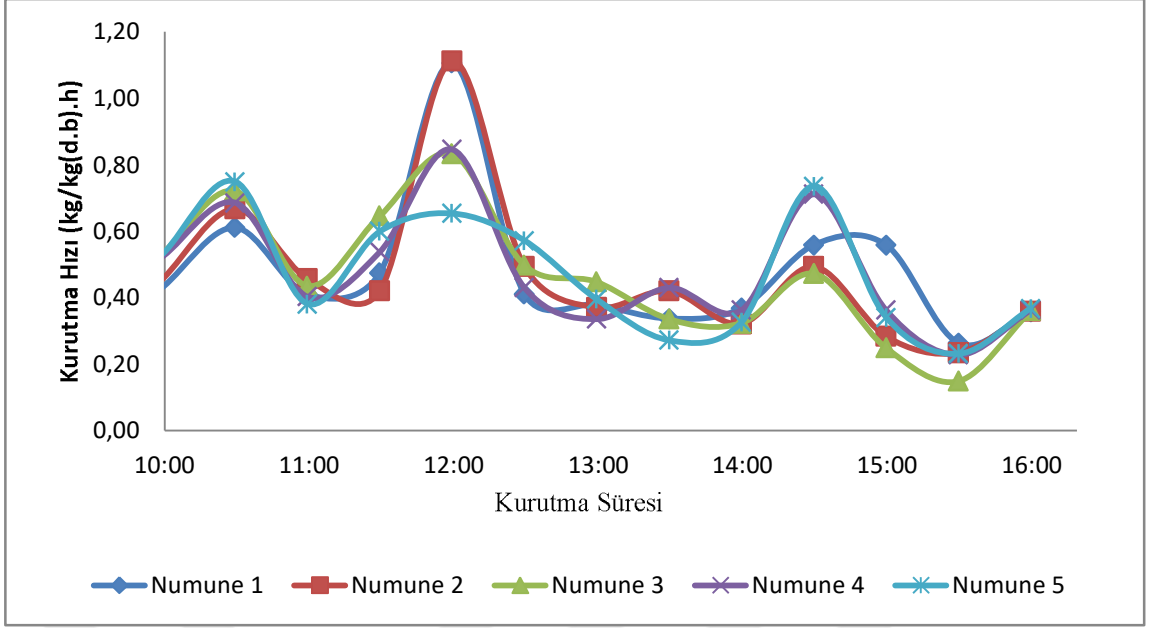
Montaj sonrası yapılan ilk deneyde yaklaşık 5 mm kalınlığında kesilen 1000 gr muz tepsiye dizilerek deney sabah saat 10.00'da başlatılmıştır. Deney süresince en yüksek güneş ışınım değerine sahip yapılan deneyde 5 numune ürün seçilip onlar üzerinden sonuçlar alınmıştır. 5 numune de benzer tepkiler göstermiştir. Yaklaşık 5 mm kesilerek ortalama 7 gr da başlanmış olan her numunenin ağırlık değeri 6 saat sonrasında ortalama 2 gr değerine kadar düşmüştür. Nemlilik oranının %76 ile başlanıldığı bu deneyin sonunda nem değeri %16 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.7 de görüldüğü gibi güneş ışınlarının en dik geldiği 12.00 saatinde kurutma işlemi en hızlı olduğu ana ulaşmıştır. Yapılan deney sonucunda 1000 gr yaş üründen 183.33 gr kuru ürün elde edilmiştir. Bu deney sırasında ölçülen kabin giriş ve çıkış sıcaklıkları ve bağıl nem değişimi Şekil 5.6'da, seçilen 5 numune üzerindeki nem ve ağırlık değişimleri de Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.6.** İlk deneyde ölçülen kabin içerisinde ki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri



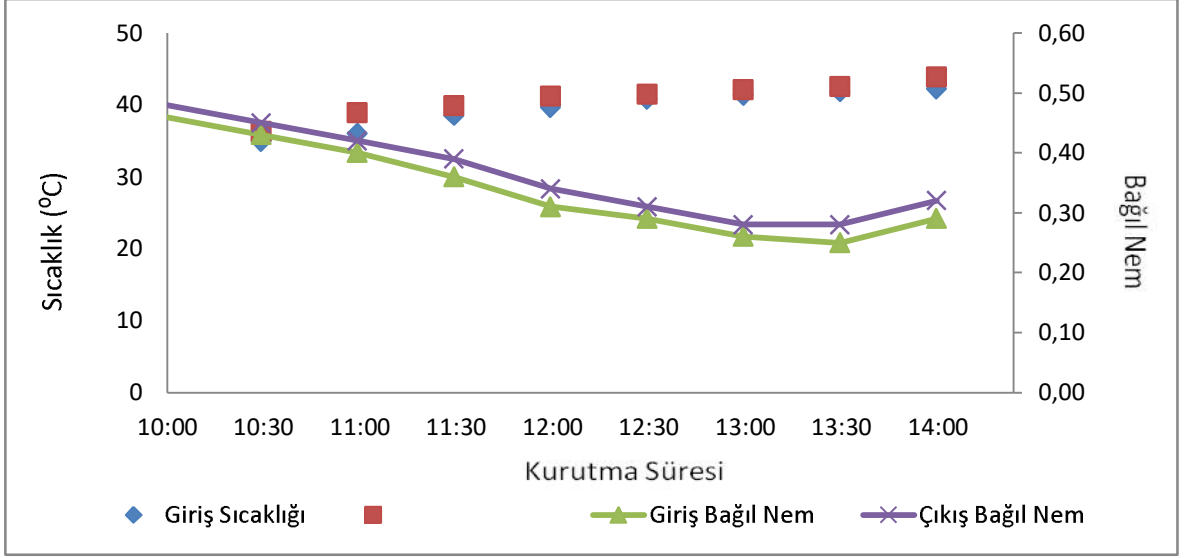




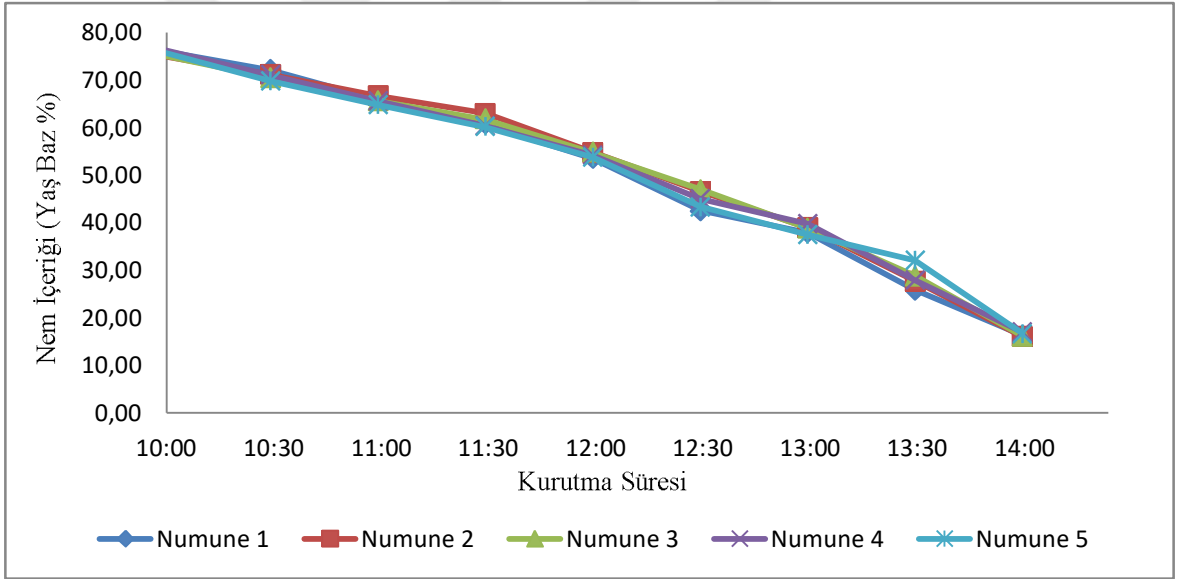
**Şekil 5.7.** Birinci gün muz dilimleri için kuruma karakteristikleri

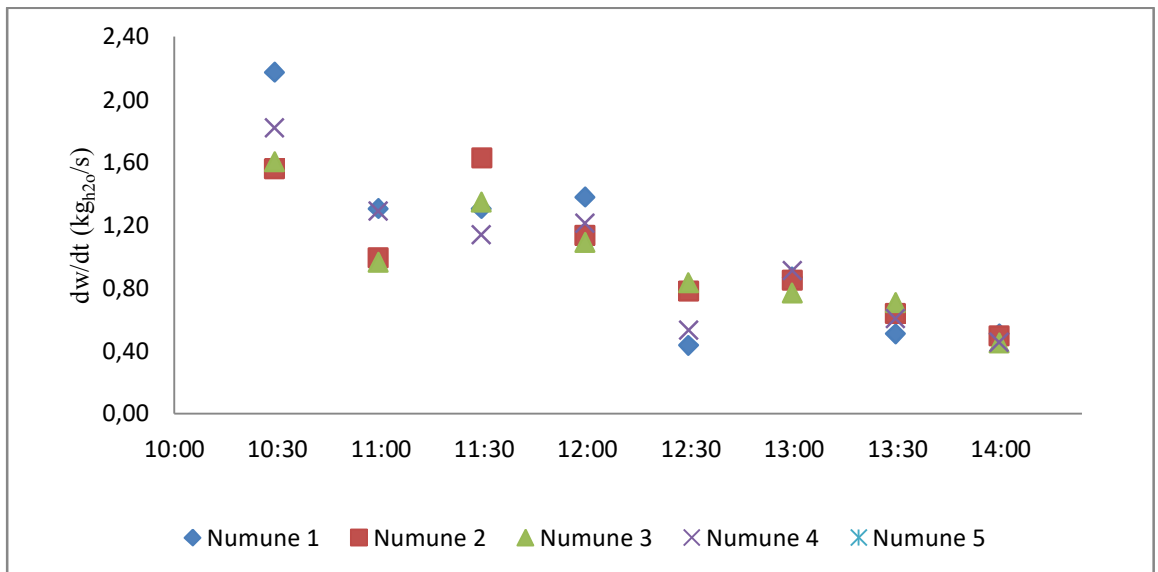
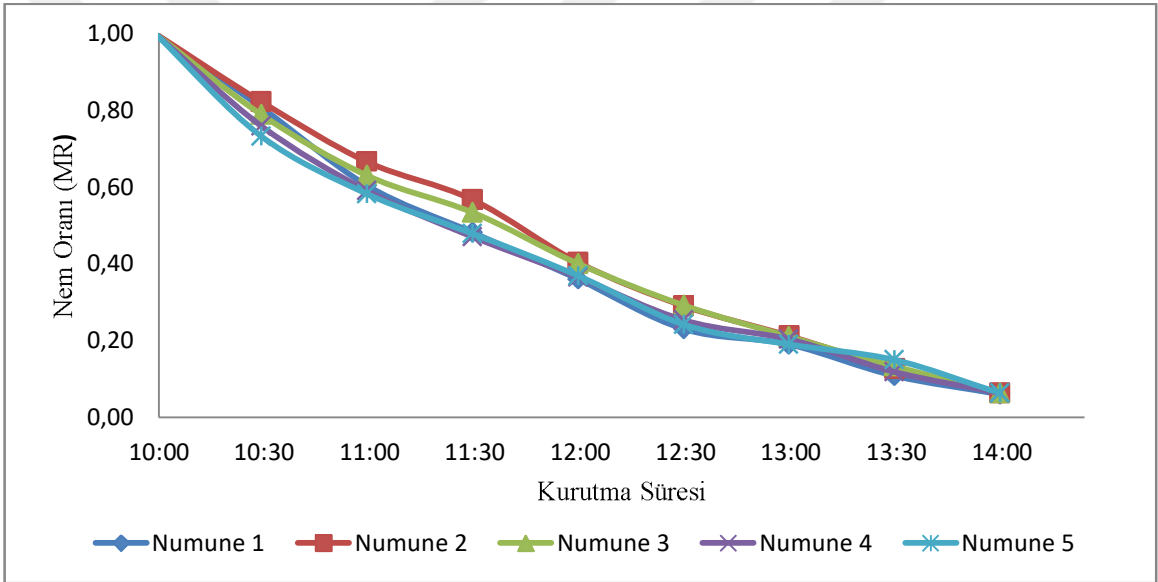
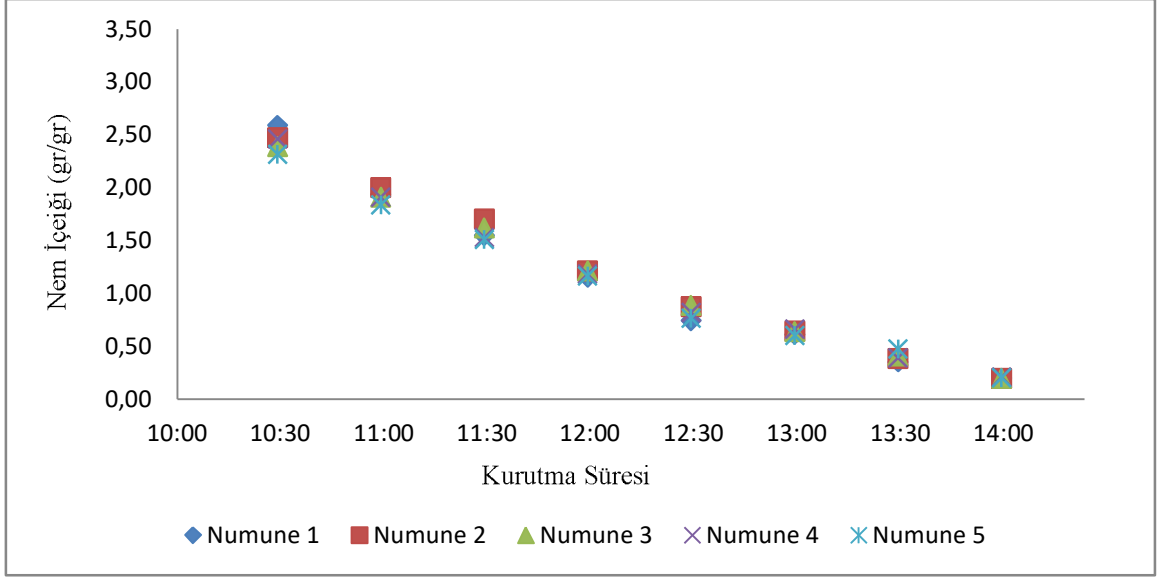
### 5.1.2. İkinci Gün Kurutma Deney Sonuçları

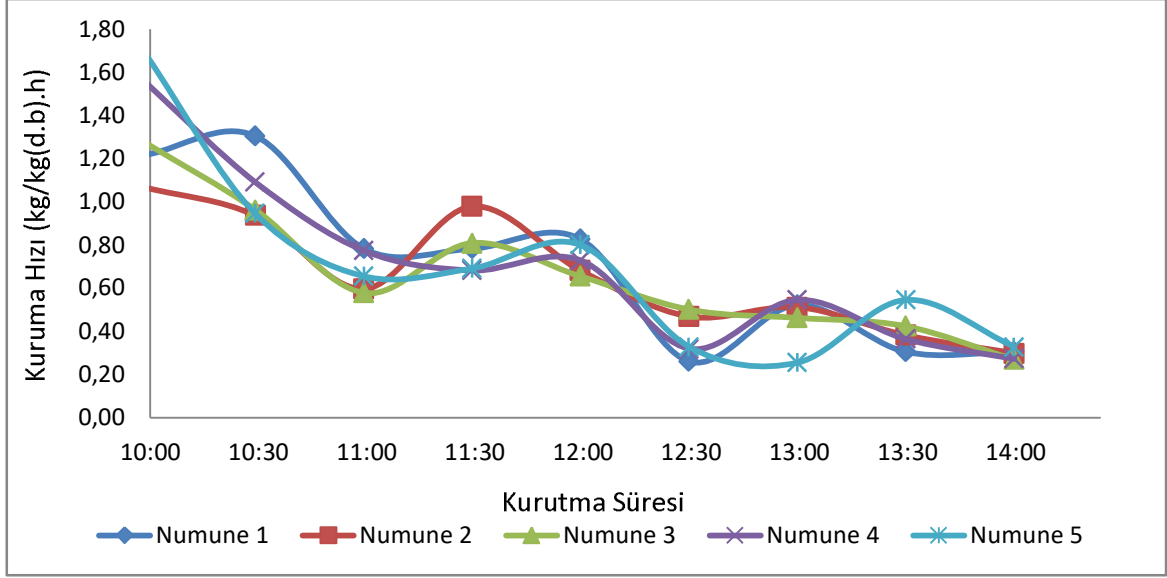
Deneyin ikinci gününde ilk günkü gibi aynı ürün miktarıyla başlanıp seçilen 5 numune üzerinde yapılan değerlendirmeler sonucunda, her numunenin yaklaşık 2 mm kalınlık ve ortalama 3 gr ile başladığı deneye 4 saat sonunda yaklaşık 0,5 grama kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Kurutma kabin içerisinde ki sıcaklık 50 °C'yi geçmemiştir. İlk deneye göre daha muz dilimlerinin daha ince kesilmesi, güneş ışınım miktarının ilk güne göre aynı seviyelerde seyrettiği ikinci günde kurutma süresini azalttığı gözlemlenmiştir. Kabin içerisindeki sıcaklık değeri en yüksek 45 °C olarak ölçülmüştür. Bu deney sonucunda 1000 gr yaş muz diliminden 112,26 gr kuru muz dilimi elde edilmiştir. Bu deney sırasında ölçülen bağıl nem ve sıcaklık değerleri Şekil 5.8'de, kurutma sırasında gerçekleşen muz dilimleri üzerindeki değişim ise Şekil 5.9 üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 5.8.** İkinci deneyde ölçülen kabin içerisindeki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri



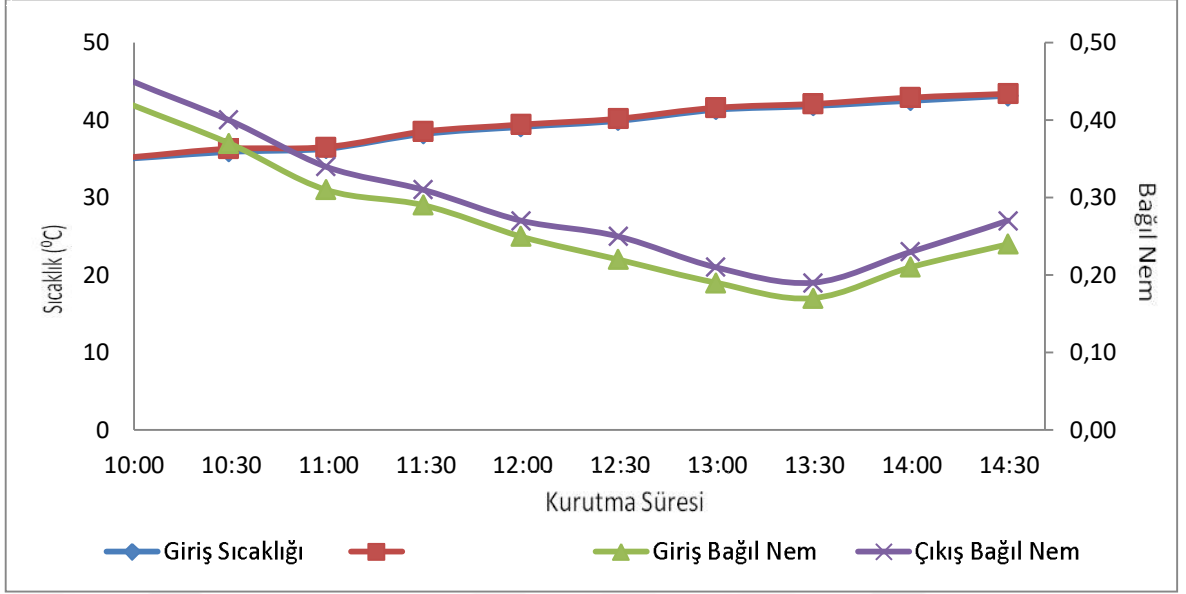




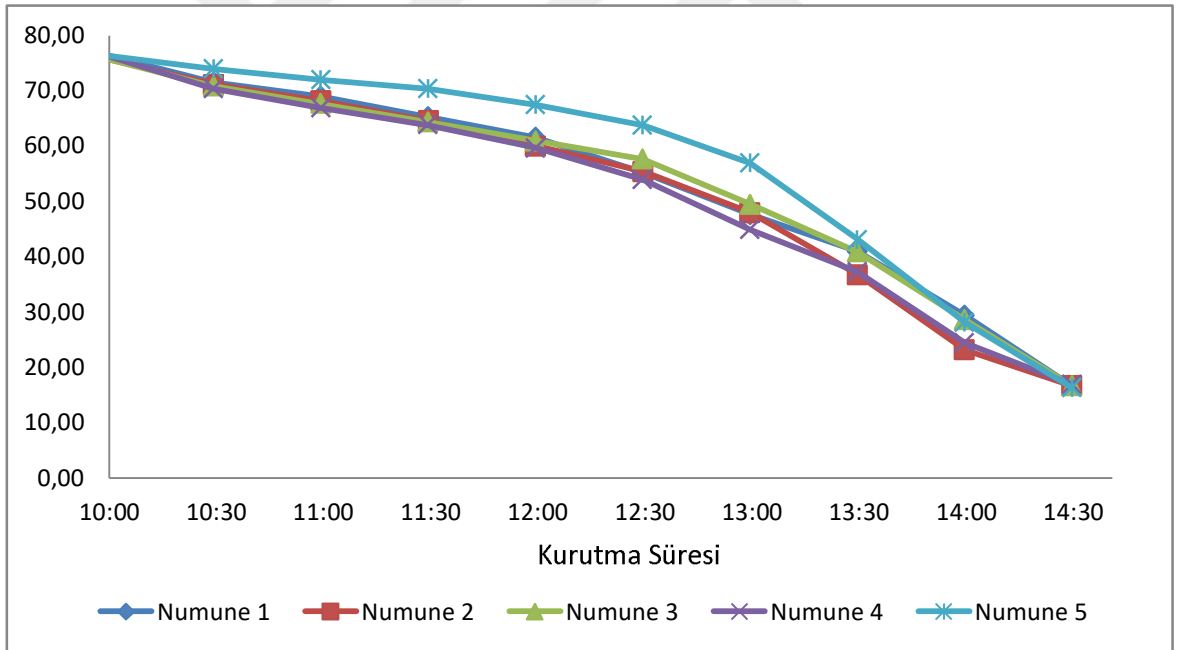
**Şekil 5.9.** İkinci gün muz dilimleri için kuruma karakteristikleri

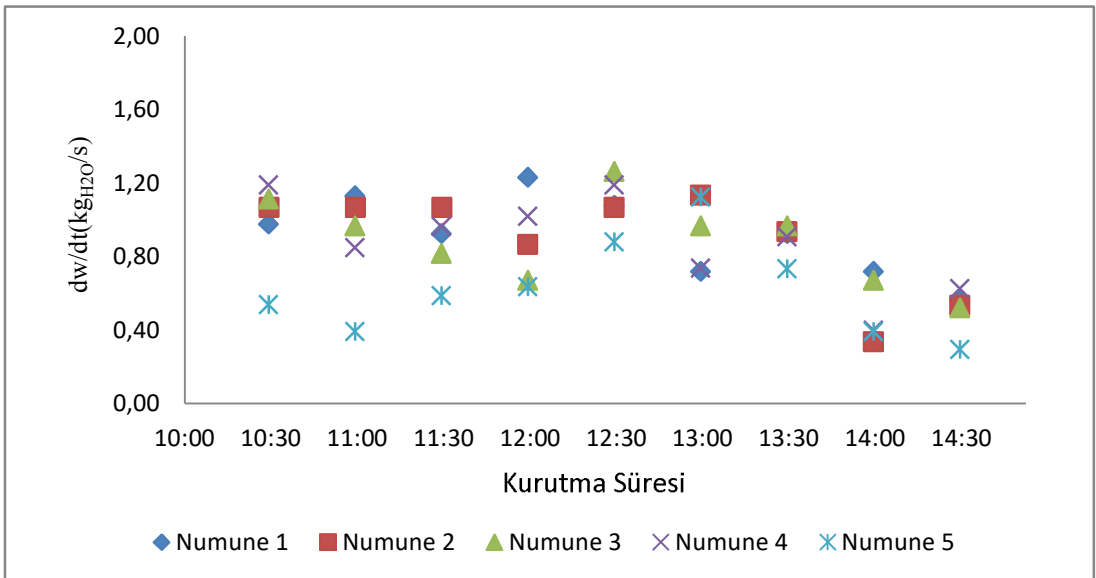
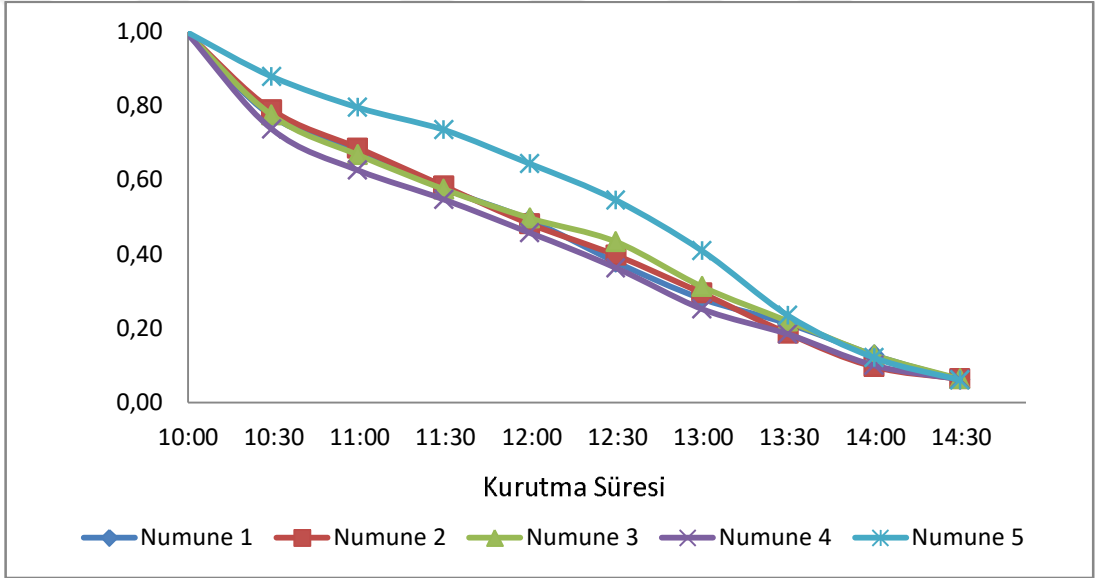
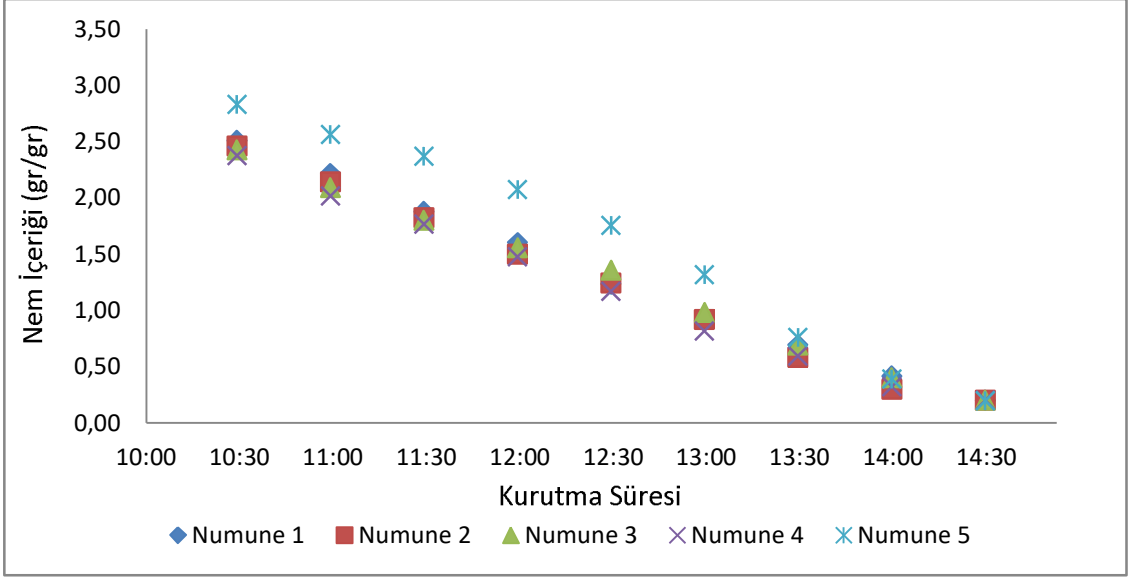
### 5.1.3. Üçüncü Gün Kurutma Deney Sonuçları

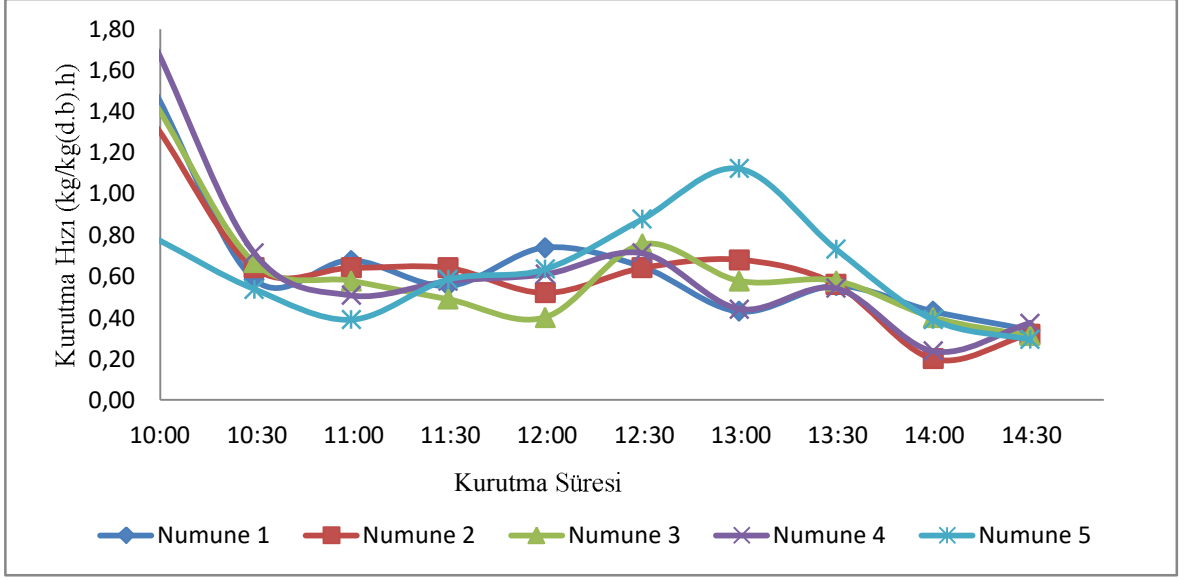
Üçüncü gün gerçekleştirilen deneyde diğer günlerde olduğu gibi toplam 1000 gr muz kullanılmıştır. İkinci gün de daha ince kesilerek ilk güne göre kurutma hızının düştüğü gözlemlendiğinden üçüncü günde de yapılan deneyde yaklaşık 3 mm kalınlık ve ortalama 3 gr ağırlıklarında muz dilimleri elde edilecek şekilde kesilmiş ve 5 numune seçilerek deneye başlanmıştır. Kurutma işlemi 4,5 saatte tamamlanmış ve toplam kuru ürün ağırlığı 139,3gr olarak ölçülmüştür. Kabin içerisindeki sıcaklık değeri 44 °C' yi geçmemiştir. Bu deney başlangıcında %76 olan nemlilik değeri deney sonunda %16 değerini görmüştür. Şekil 5.10'da üçüncü deney zamanında ölçülmüş kabin giriş çıkış ve bağıl nem değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.11'de ise kurutulmuş muz dilimleri üzerindeki ağırlık ve nem değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir.



**Şekil 5.10.** Üçüncü deneyde ölçülen kabin içerisindeki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri



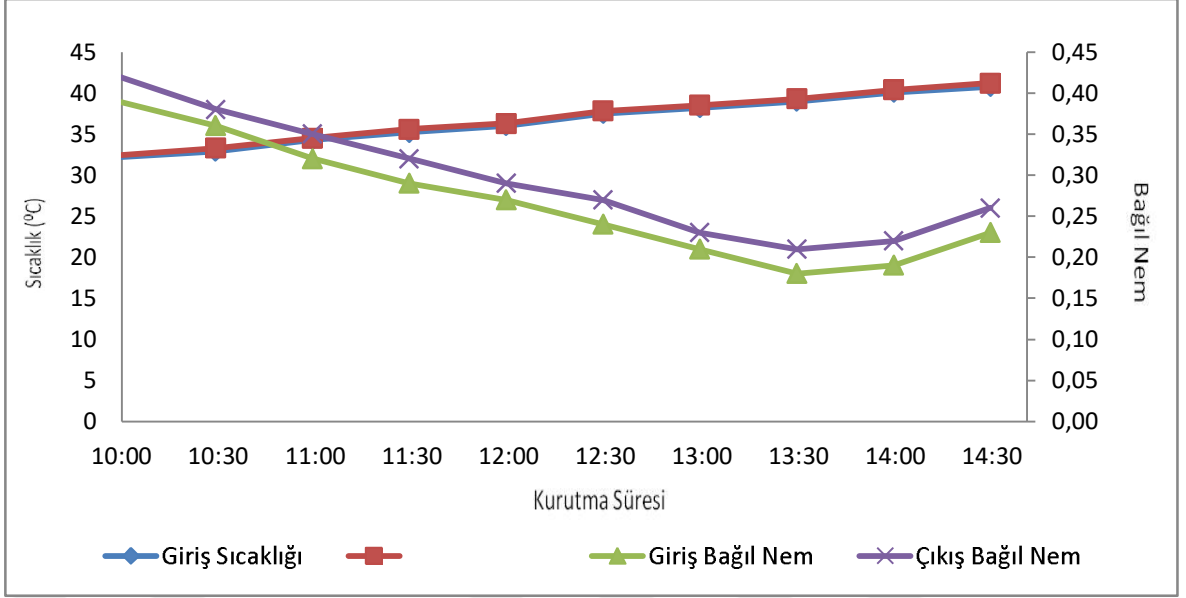




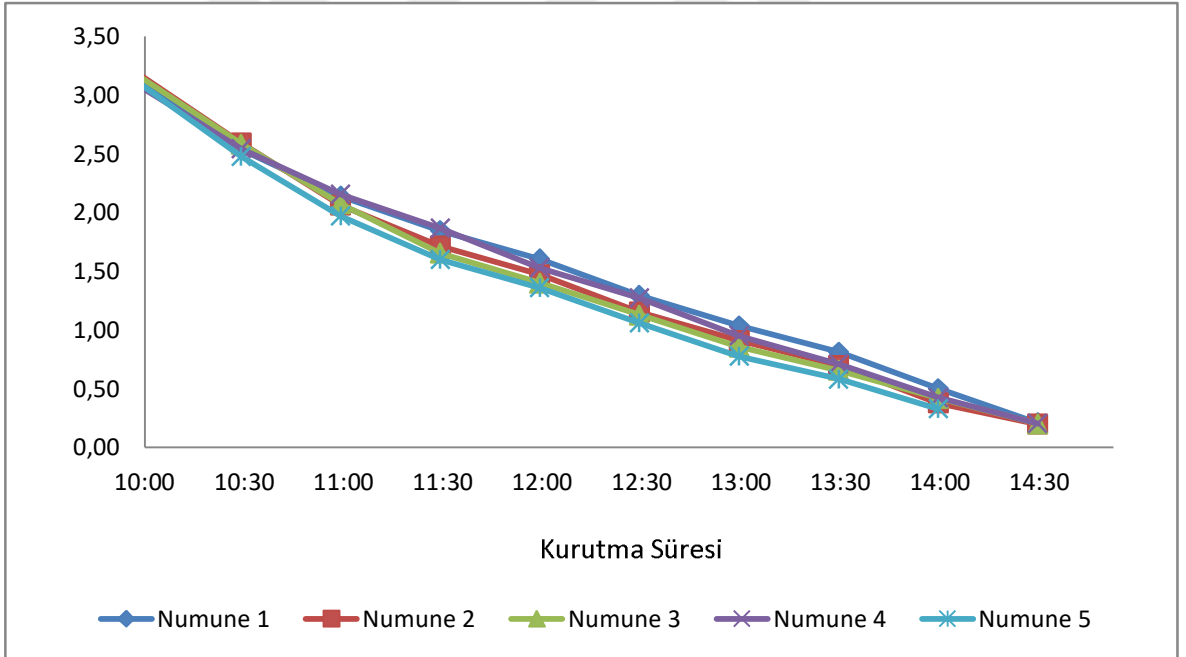
**Şekil 5.11.** Üçüncü gün muz dilimleri için kuruma karakteristikleri

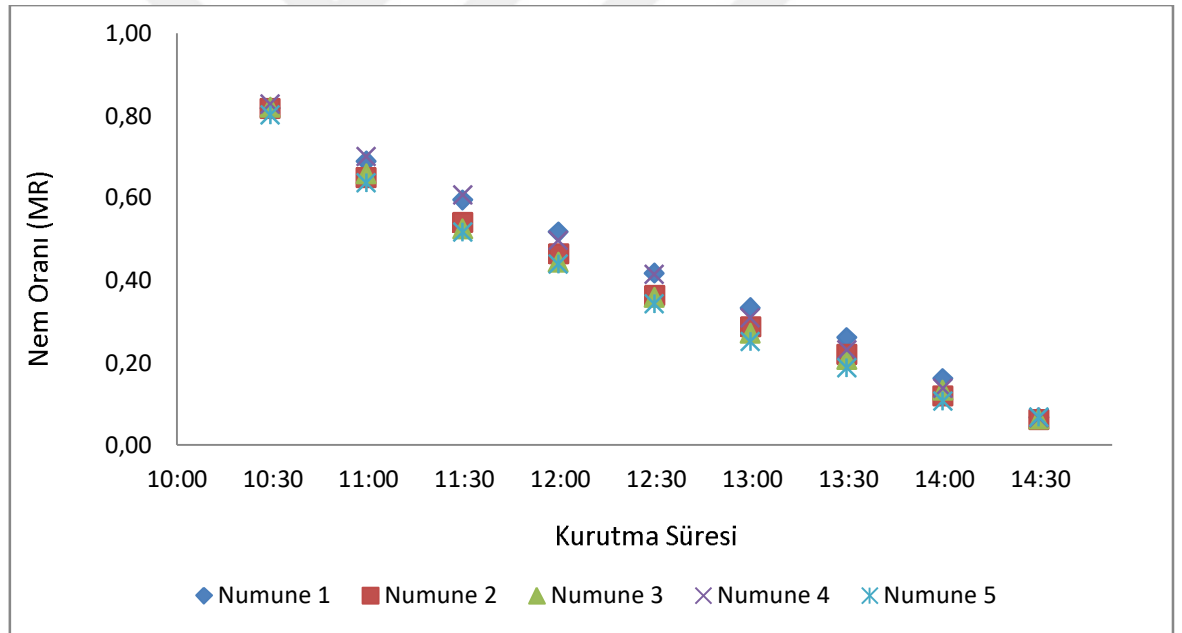
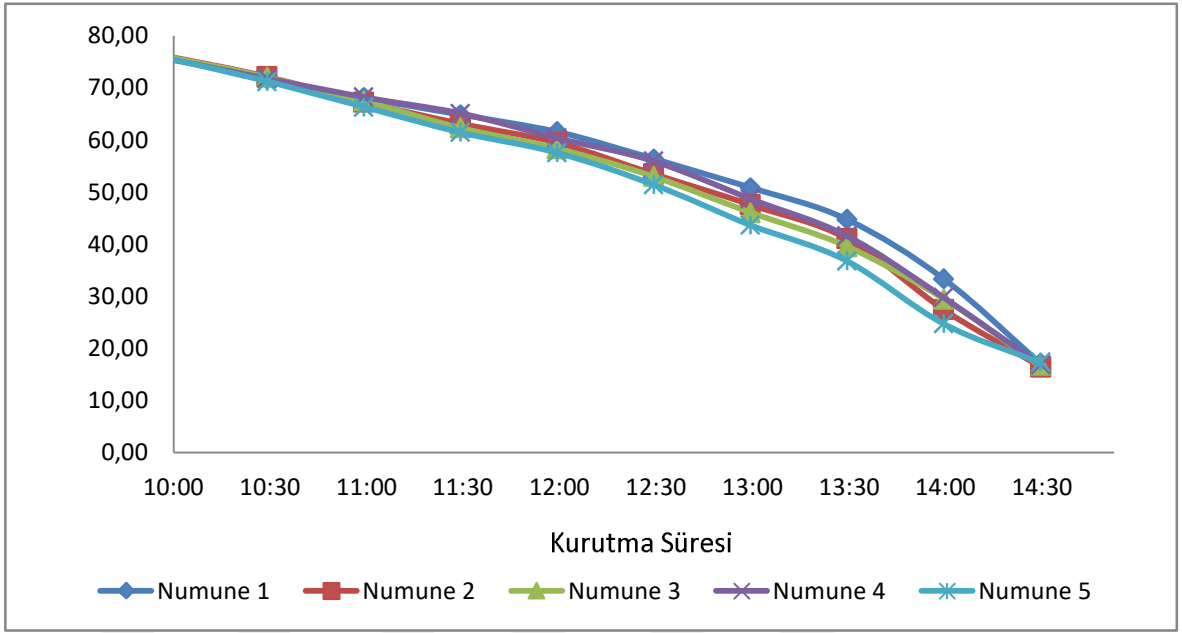
#### 5.1.4. Dördüncü Gün Kurutma Deney Sonuçları

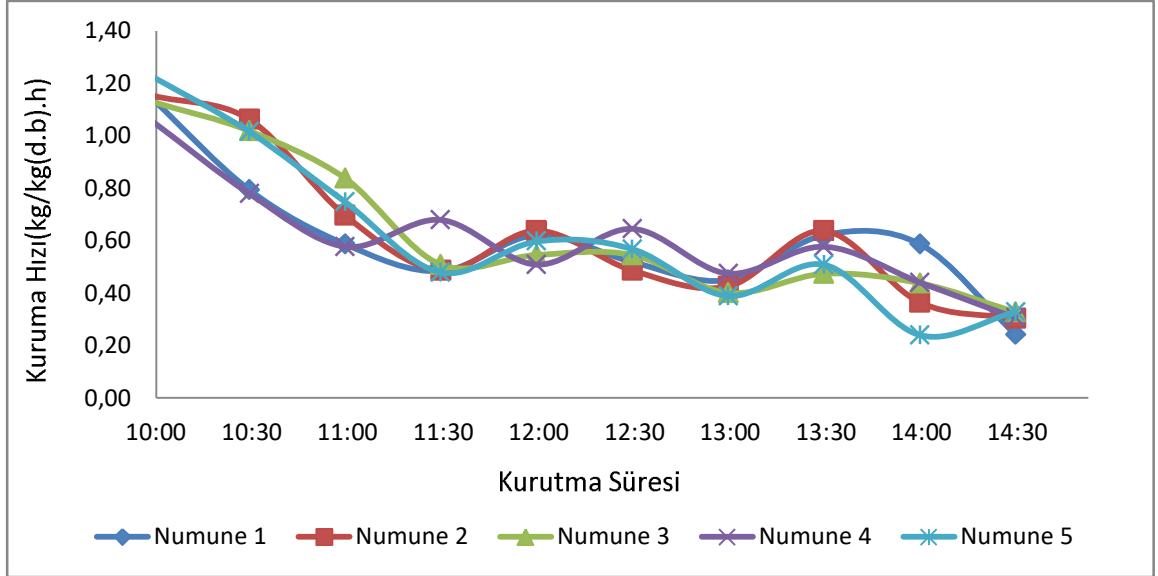
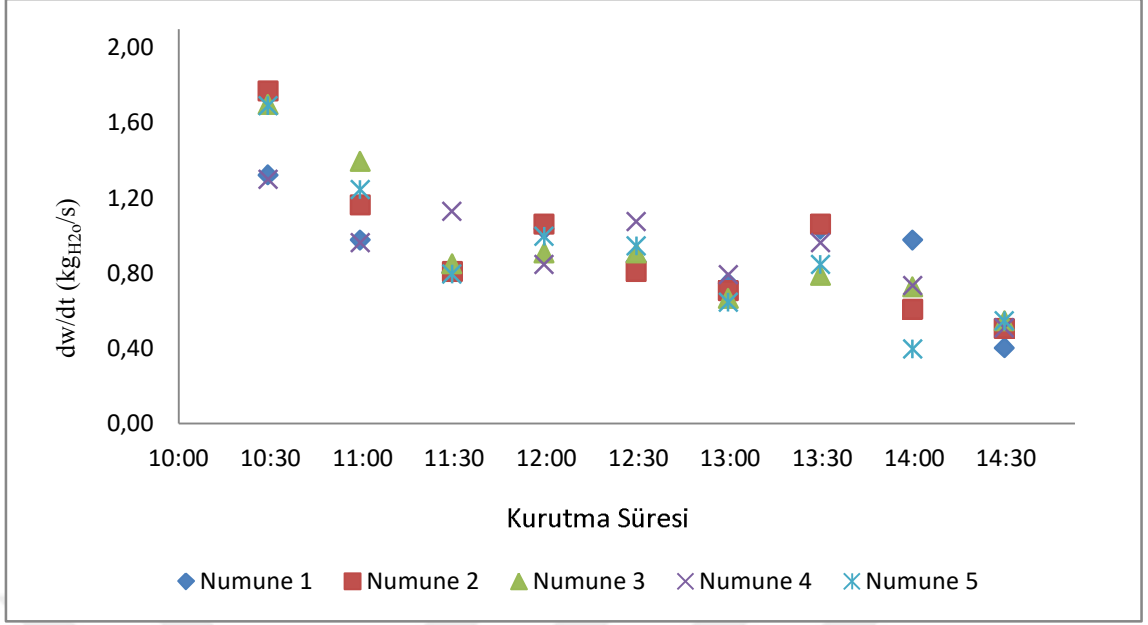
Dördüncü gün gerçekleştirilen deneyde ilk üç güne göre havanın biraz daha bulutlu olmasından kaynaklı güneş ışınım değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ancak rüzgâr hızında ki artış aküye depolanan enerji miktarında artışa sebep olmuştur. Üçüncü deneye benzerlik gösteren bu deneyde 3 mm kalınlık ve ortalama 3 gram değerinde ki 5 numunenin kuruma periyotları grafikler şeklinde Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Kurutma süresi 4,5 saat olan bu deney sonucunda toplam kuru ürün ağırlığı 142,95 gr olarak belirlenmiştir. Kabin içerisindeki sıcaklık farkı diğer günler ile benzerlik göstermiştir. Şekil 5.12’de üçüncü deney zamanında ölçülmüş kabin giriş çıkış ve bağıl nem değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.13’de ise kurutulmuş muz dilimleri üzerindeki ağırlık ve nem değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir.



**Şekil 5.12.** Dördüncü deneyde ölçülen kabin içerisindeki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri





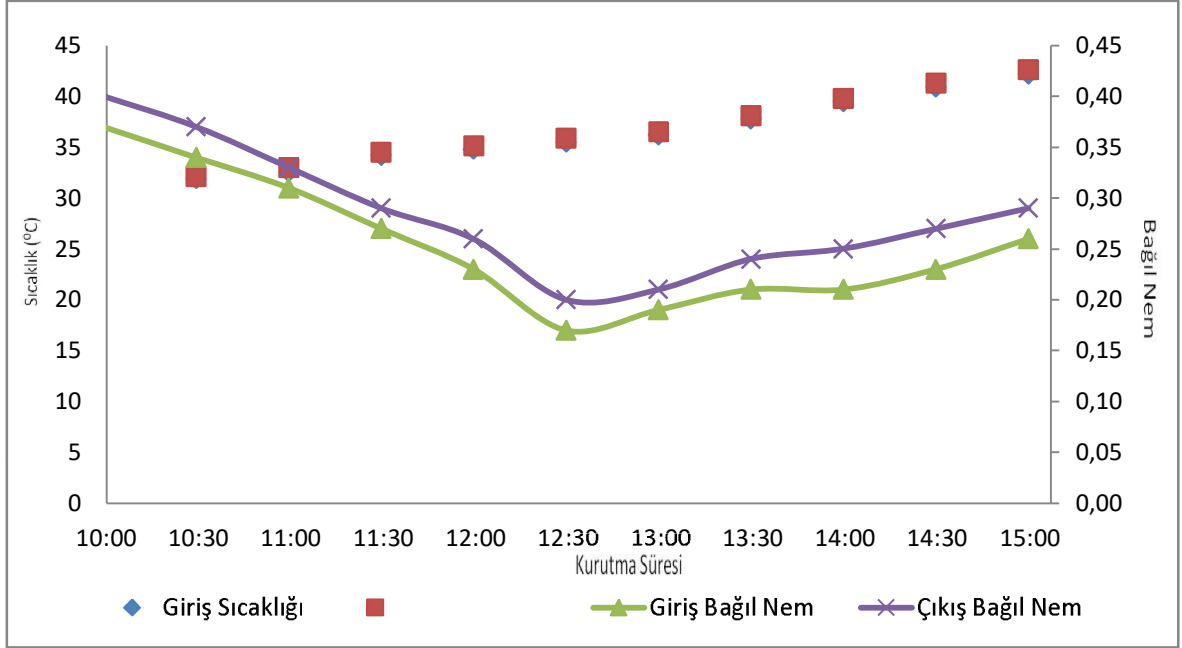


Şekil 5.13. Dördüncü gün muz dilimleri için kuruma karakteristikleri

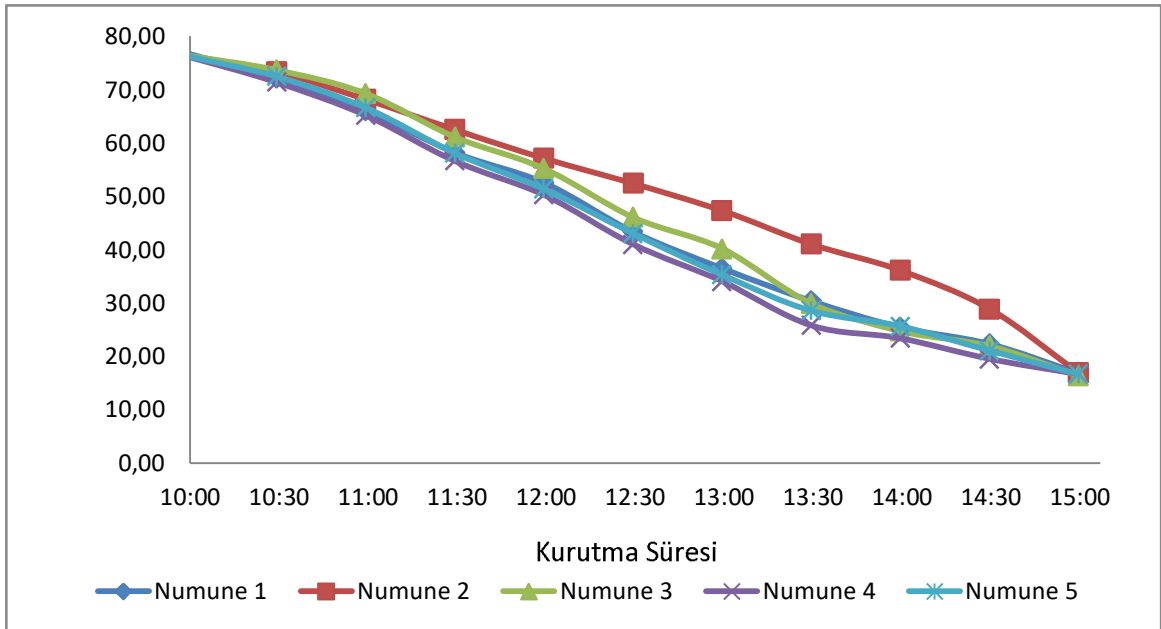
### 5.1.5. Beşinci Gün Kurutma Deney Sonuçları

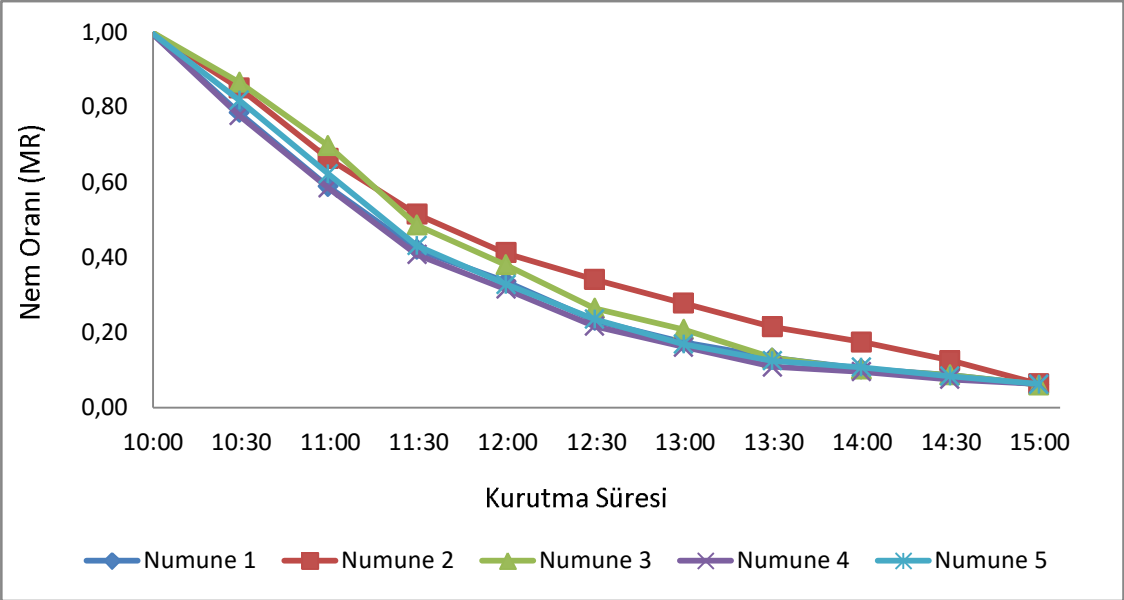
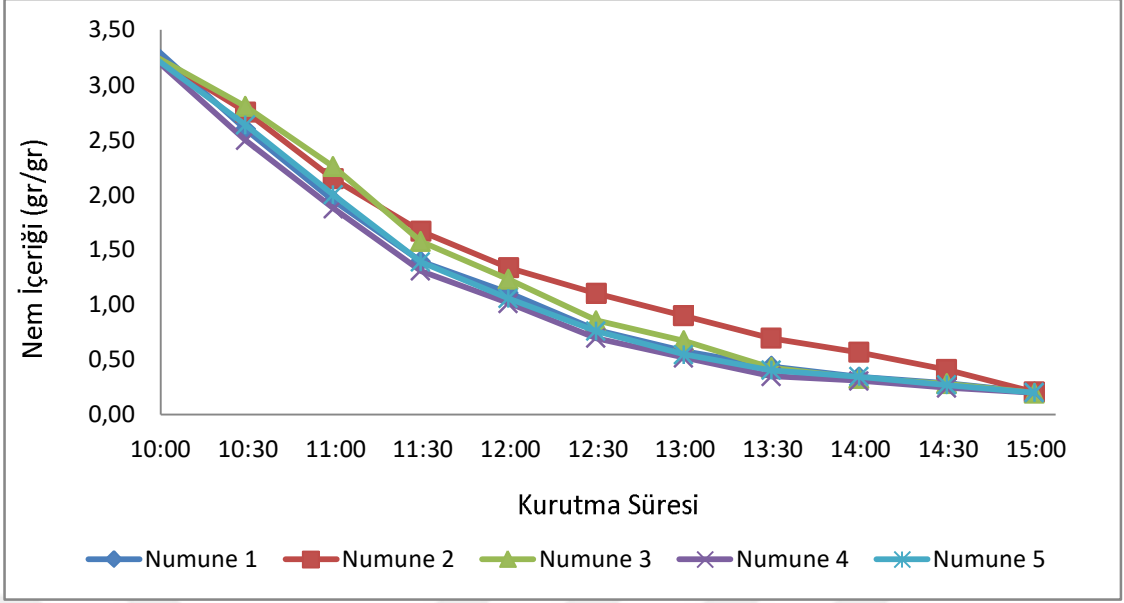
Beşinci deneyde yeniden yaklaşık 1000 gr muz ile yapılmış deneyde 4 mm kalınlık ve ortalama 4 gramlık 5 numunenin değişimleri izlenmiştir. Güneş verimliliğinin dördüncü günle benzerlik gösterdiği bugünde deney 5 saat sürmüştür. Her numunenin yaklaşık %76 nemlik oranı ile başladığı bu deneyde 5 saatin sonunda %16,8 değerine ulaşmıştır. Kabin içi sıcaklık ortalama 35 °C olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonundan 1000 gr yaş üründen 165.52 gr kuru ürün elde edilmiştir. Bu deneydeki zamana bağlı sıcaklık ve

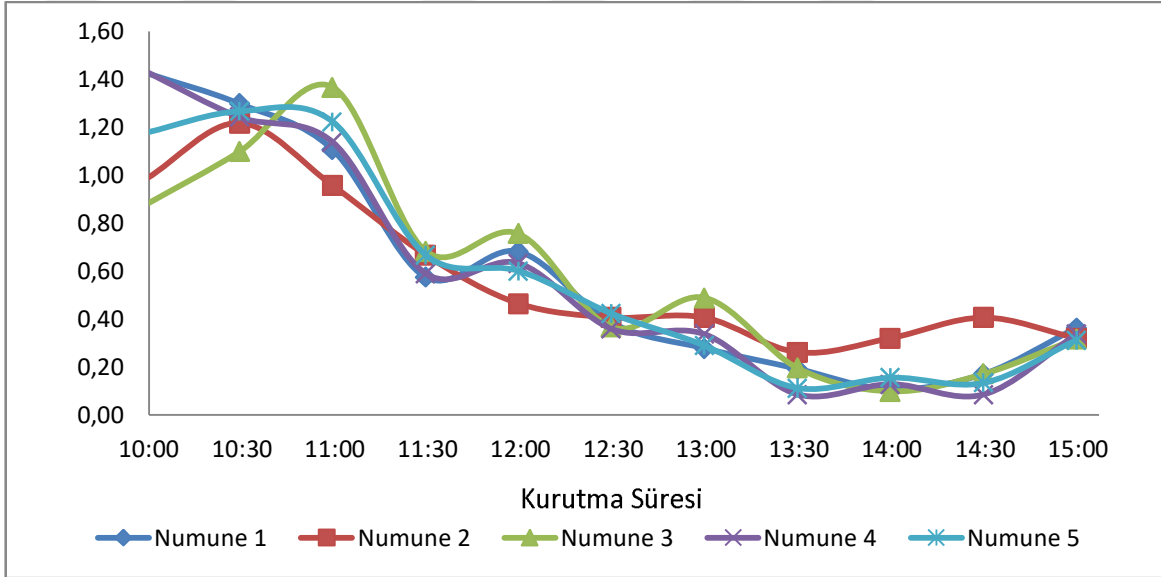
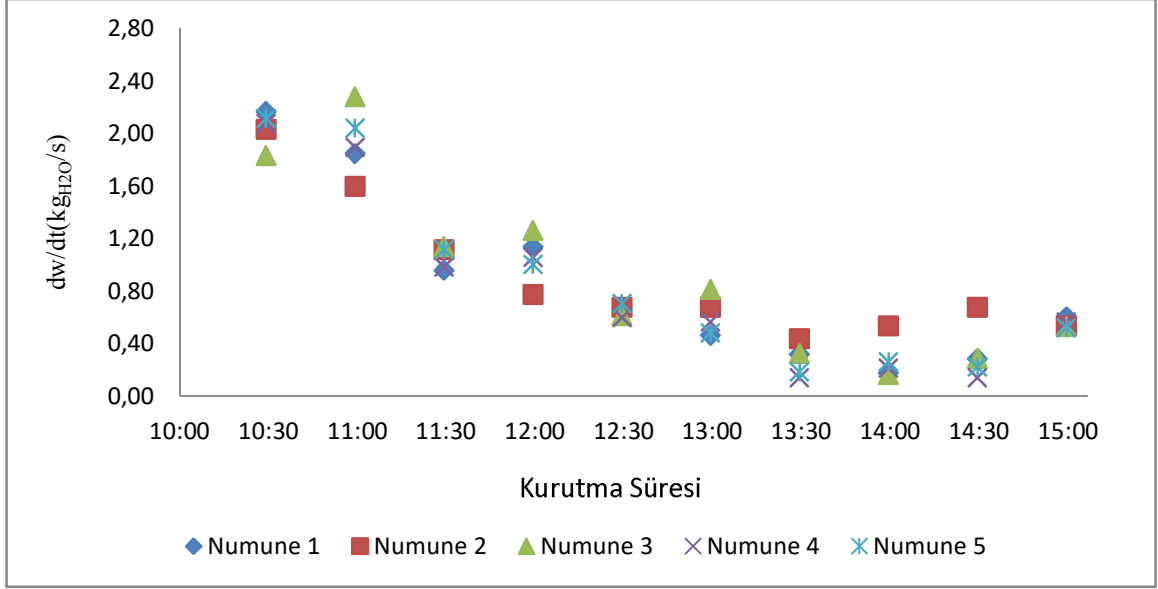
bağıl nem değeri Şekil 5.14’de, numuneler üzerinde ki kurutma parametreleri ise Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Beşinci deneyde ölçülen kabin içerisindeki zamana bağlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri







Şekil 5.15. Beşinci gün muz dilimleri için kuruma karakteristikleri

## 5.2. Kurutma Modelinin Oluşturulması

Pek çok araştırmacı kurutacağı ürünün kurutma süresini önceden belirleyebilmek için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Bu simülasyonlar genellikle deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Ertekin ve Yıldız, 2004; Sacilik ve Elicin, 2006). Bu çalışmada, “Wang and Singh” korelasyonu sabit sıcaklıkta ve tek sıra muz diliminin kurutulması için “Nelder-Mead En Küçük Kareler Metodu” kullanılarak ekte verilen deneysel verilerden yola çıkılarak polinom denklemleri

belirlenmiştir (Çoban, 2008). Boyutsuz nem oranı (MR),  $(M_{d,i} - M_e) / (M_{d,o} - M_e)$  yerine sadeleştirilerek

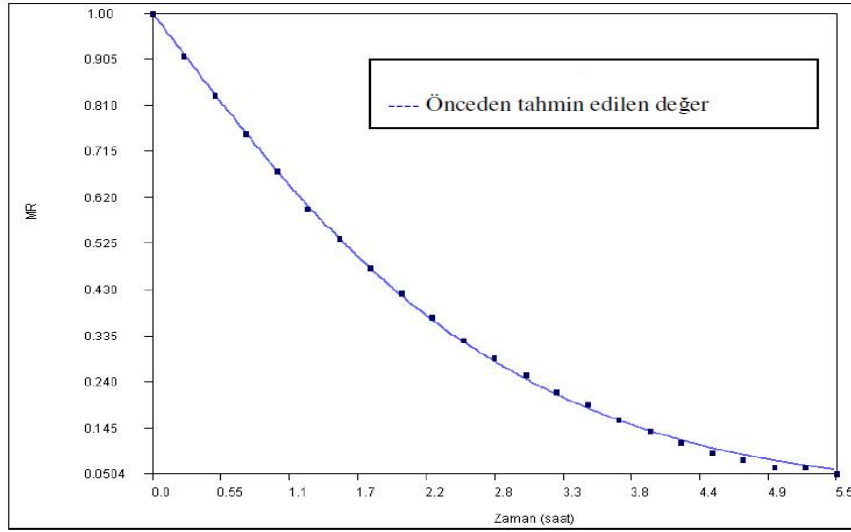
$(M_{d,i} / M_{d,o})$  şeklinde alınmıştır (Qi-Long vd., 2008; Sacilik ve Elicin, 2006)

Wang ve Singh korelasyonu kurutma modeli kullanılarak deney verileri ve nem oranının (MR) önceden tahmin edilen değerleri belirlenebilmektedir. 5mm ve 2mm kalınlığa sahip muz dilimleri için yapılan 2 deneye (1. ve 2. 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  $MR_2$  adlandırılmıştır.

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (5.1)$$

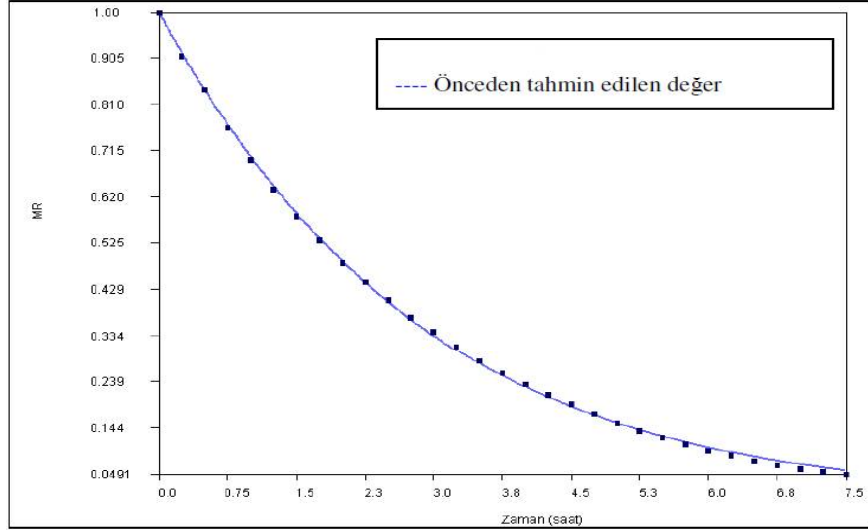
$$MR_1 = 1 - 0.037 * t - 0.00651 * t^2 \quad (5.2)$$

$$MR_2 = 1 - 0.028 * t - 0.00526 * t^2 \quad (5.3)$$

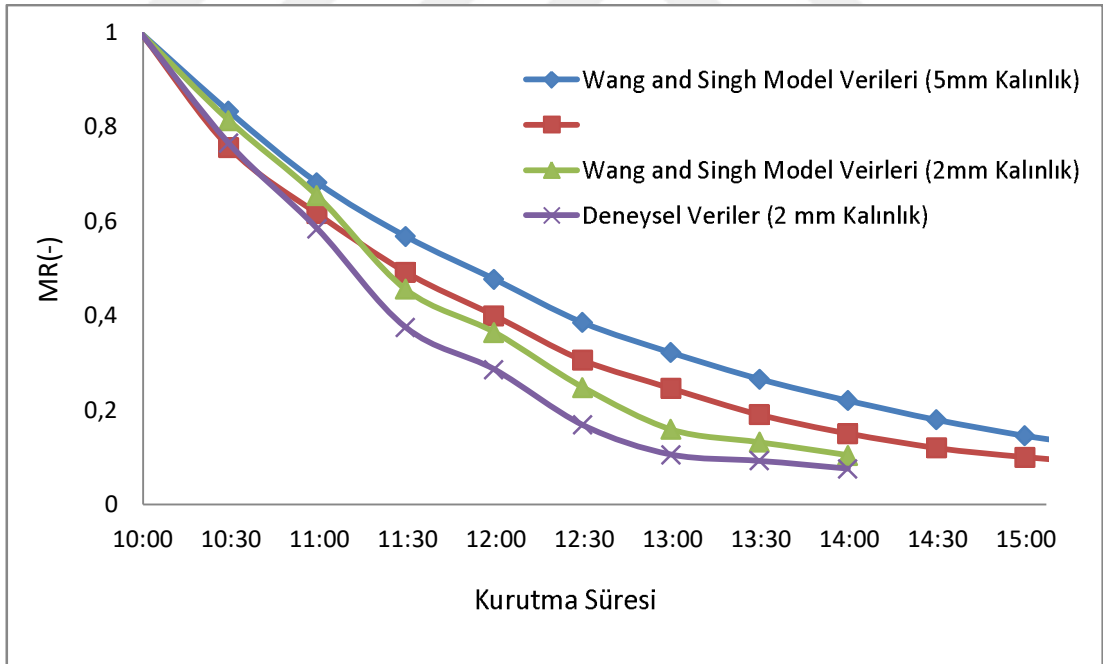


**Şekil 5.16.** 5 mm kalınlıktaki muz dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı değerleri

(1. kurutma deneyi)



**Şekil 5.17.** 2 mm kalınlıktaki muz dilimi kurutma deneyi için tahmin edilen nem oranı değerleri  
(2. kurutma deneyi)



**Şekil 5.18.** 2 ve 5 mm Kalınlıktaki Muz Dilimleri İçin Wang and Singh Model Verileri ile Deneysel Verilerin Karşılaştırılması

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında güneş ve rüzgâr enerjisi destekli kurutma sistemi tasarlanmış olup başka bir enerji gereksinimine duymaksızın yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklı destekli bir kurutma sistemi hayata geçirilmiştir. Bu sistemde yapılan deneylerin her birinde ortalama 1 kg ürün kurutulmuştur. Kurutulacak ürün olarak seçilen muz ile yapılan deneylerde kalınlıklar 2 ila 5 mm arasında değişmiştir. Ortalama 7 ile 5 gram ağırlığında olan her bir muz dilimi deney süresinde 0,01 hassasiyetli terazi yardımıyla her yarım saatte bir ölçülmüş ve ortalama 0,5 ile 1 gram ağırlığına düşüp nem değerleri azalincaya kadar deneyler sürdürülmüştür. Maksimum kurutma süresi 6 saat olarak belirlenmiştir.

Piranometre yardımıyla her 15 dakikada bir yapılan ölçümlerde güneş ışınım değerleri tespit edilmiş ve genellikle en yüksek değerlere 11.30-13.00 saatleri arasında ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Rüzgâr hızı ölçümü ise anemometre yardımıyla yapılmıştır. Her 15 dakikada bir yapılan bu ölçümlerde ise güneş ışınımının daha az olduğu bulutlu havalarda rüzgâr hızının daha yüksek olduğu ve türbin kanatlarını daha hızlı döndürerek jeneratöre biriken enerji miktarını artırdığı gözlemlenmiştir.

Kurutma sisteminde sıcaklık, nem, hava hızı, rüzgâr hızı, güneş ışınımı, ağırlık ve elektrik ölçüm değerleri belirli periyotlar ile datalogger üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ölçüm cihazlarına ilişkin hassasiyet verileri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Kurutma ünitesinin giriş ve çıkışına yerleştirilen sıcaklık, nem sensörleri ve anemometre sayesinde deneysel çalışmalar boyunca sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı değerleri takip edilmiştir. Kullanılan benzer bir anemometre ile de rüzgâr hızının değeri ölçülmüştür. Ayrıca piranometre, hassas terazi, dijital multimetre ile sırasıyla güneş ışınımı, ürün ağırlık değişimleri ve jel aküye depolanan elektrik enerjisinin miktarı belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar süresince kurutma ünitesi içindeki sıcaklık ve bağıl nem değişimleri her deney için ayrı ayrı grafikler yardımıyla gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar kurutma ünitesinin küçük ölçekli olmasından dolayı giriş ve çıkış sıcaklık ve bağıl nem değerleri arasında büyük bir fark olmadığını ortaya koymuştur. Fakat dış ortam sıcaklığına bağlı olarak kabin içinde ölçülebilen maksimum sıcaklık değerinin her bir deneyde farklı sonuçlar gösterdiği ve genellikle 45-55°C arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde dış ortam bağıl

nem değeri göz önüne alınarak kurutma ünitesi içindeki bağıl nem değerlerinin de değişim gösterdiği, fakat bu değişimin aşırı seviyelerde olmadığı tespit edilmiştir.

Gerçekleşen kurutma işlemlerinde kurutmanın başladığı süre içerisinde genellikle giriş ve çıkış sıcaklık farkı 1 °C' yi geçmediği gözlemlenmiştir. Yaş esasa göre ortalama %76'lık nem oranıyla başlanan deneyler %16'lık nem değerine ulaşınca kadar devam etmiştir. Tüm deneyler sonucunda nem periyotlarının genellikle sabit olduğu gözlemlenmiştir. Ürünler üzerinde renk değişimi yaş hale göre farklılıklar gözlenmiş ancak kokuda bir değişikliğe rastlanmamıştır.

Kurutma deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin bazıları Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne iletilmiş ve burada kurutulmuş elmaların nem ve su aktivitesi açısından gerekli testleri yapılmıştır. Muz dilimlerine ilişkin yapılan bu testleri kısaca şu şekilde açıklamak mümkündür:

### **Nem tayini**

Kurutulmuş muz 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).

### **Su aktivitesi tayini**

Kurutulmuş elma dilimlerinin su aktivitesi,  $\pm 0.001$  hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazı (Testo AG 400, Germany) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, yaklaşık 3–4 gr dilimlenmiş muz 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. Yapılan analizler sonucunda nem ve su aktivitesinin değerleri sırasıyla 16.135 gr ve 0.526 olarak tespit edilmiştir.

Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü tarafından yapılan testler sonucunda kurutulmuş ürünlerin, özellikle nem değerlerinin %16 civarında ve su aktivitesi değerlerinin 0.7'nin altında olmasından dolayı, kuru ürün olarak kabul edilebileceği ve uzun süre bozulmadan kalabileceği ortaya çıkmıştır.

Bu deneysel çalışmada güneş ve rüzgâr enerjisi destekli kurutma kabini tasarlanmış, imalatı gerçekleştirilerek tasarlanan sistemde deneyler yapılmıştır. İçerisinde ki hava akımını sağlayacak olan fanın elektrik enerjisini rüzgâr türbini sayesinde depolanan jel aküden karşılanmıştır. Ayrıca sistemin alt kısmına yerleştirilen rezistans sayesinde güneş ışınımının yeterli olmadığı zaman dilimlerinde kurutma işleminin yapılabilmesi söz konusu olacaktır. Bu durumda rezistansın çalıştırıldığı termostat 45°C sabit sıcaklığa ayarlanarak kurutma işleminin gerçekleştirilebilir. Rezistansın çalıştırılması için gerekli elektrik enerjisinin jel aküde depolanan rüzgâr enerjisinden karşılanması öngörülmektedir. Böylece kurutma işlemi herhangi bir ek enerji kaynağına ihtiyaç duyulmadan sadece rüzgâr ve güneş enerjisi desteği ile gerçekleştirilmiştir.



## KAYNAKÇA

- Abano, E. E. ve Sam-Amoah, L. K. (2011). “Effects of different pretreatments on drying characteristics of banana slices” *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No: 3, ISSN 1819-6608.
- Abuşka, M. (2015). “Güneş Enerjisi ve Uygulamaları Dersi Notları – II”, 41-55
- Acar, B., Dağdeviren, A. ve Özkaynak, M., (2020). “Design of Hazelnut Drying System Supported By Solar Energy, Investigation of Drying Performance and Determination of Proper Drying Model”, *International Journal Of Renewable Energy Research*, Vol 10 No 2
- Akınsal A. (2009). “Rüzgar Enerjisi ve Türkiye Rüzgar Potansiyeli, Rüzgar Enerjisinde Değişken ve Sabit Fiyat Tarifeleri ve Enerji Depolama Teknikleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1 – 2
- Akpınar, K. E., (2005). Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizinde bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi”, *Makine ve Mühendis*, Cilt: 46, Sayı: 540, 41-51
- Al-Bayati, M. (2017). “Viyol Kurutmada Kurutma Havası Özelliklerinin Kurutma Karakteristiklerine Etkisinin Deneysel Araştırılması”, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
- Amer, B. M. A., Hossain, M. A. ve Gottschalk, K. (2010). “Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana” *Energy conversion and management*, 51(4), 813-820.
- Atalay, H. (2015). “Güneş Enerji Destekli Depolama Sistemli Kurutma Sisteminde Elma Kurutulmasının İncelenmesi” Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul
- Atalay, H., Coban, M. T., ve Kıncay, O. (2017). “Modeling of the drying process of apple slices: Application with a solar dryer and the thermal energy storage system” *Energy*, 134, 382-391.
- Atalay, H. (2019). “Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system” *Energy*, 172, 1037-1052.

- Atalay, H. (2020). "Assessment of energy and cost analysis of packed bed and phase change material thermal energy storage systems for the solar energy-assisted drying process" *Solar Energy*, 198, 124-138.
- Atalay, H. ve Cankurtaran, E. (2021). "Energy, exergy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses of a large scale solar dryer with PCM energy storage medium" *Energy*, 216, 119221.
- Ayaz, M. (2015). "Isı Pompalı Vakumlu Kurutma Fırınında Tıbbi Bitkilerin Kurutulması ve Kurutma Parametrelerinin Araştırılması", Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
- Baybek, G. (2015). "Türkiye’de Fotovoltaik Güneş Enerjisi Piyasası", Ekonomi ve Dış Politika Araştırma Merkezi, [edam.org.tr/turkiyede-fotovoltaik-gunes-enerjisi-piyasasi/](http://edam.org.tr/turkiyede-fotovoltaik-gunes-enerjisi-piyasasi/)
- Benhamza, A., Boubekri, A., Atia, A., El Ferouali, H., Hadibi, T., Arıcı, M. ve Abdenouri, N. (2021). "Multi-objective design optimization of solar air heater for food drying based on energy, exergy and improvement potential" *Renewable Energy*, 169, 1190-1209.
- Bharadwaz, K., Barman, D., Bhowmik, D. ve Ahmed, Z. (2017). "Desing, Fabrication, and Performance Evaluation of An Indirect" Solar Dryer for Drying Agricultural Products, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7, 1684-1692
- Bhardwaj, A. K., Kumar, R., Kumar, S., Goel, B. ve Chauhan, R. (2021). "Energy and exergy analyses of drying medicinal herb in a novel forced convection solar dryer integrated with SHSM and PCM" *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101119.
- Chen, C. Q., Diao, Y. H., Zhao, Y. H., Wang, Z. Y., Liang, L., Wang, T. Y. ve Ma, C. (2020). "Thermal performance of a closed collector-storage solar air heating system with latent thermal storage: An experimental study" *Energy*, 202, 117764.

- Çoban, M.T. (2008). "Sayısal Çözümleme Ders Notları". E.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.
- Danish Wind Industry Association. Proof of Betz Law. Xn-drmstrre-64ad.dk/wp.conter. Downloaded 24<sup>th</sup> October 2021.
- Darıcı, S. ve Şen,S. (2012). "Kivi Meyvesinin Kurutulmasıyla Kurutma Havası Hızının Kurutmaya Etkisinin İncelenmesi", Tesisat Mühendisliği, Sayı 130, Temmuz/Ağustos 2012
- Das, M. ve Akpınar, E. K. (2020). "Determination of thermal and drying performances of the solar air dryer with solar tracking system: Apple drying test" *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100731
- Demirpolat, A. B. (2019). "Investigation of mass transfer with different models in a solar energy food-drying system" *Energies*, 12(18), 3447.
- Doğan, H. (1999). "Isı Borulu Güneş Kolektörü ile Kurutma", Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1 , 921-925
- Dutta, P., Dutta, P. P. ve Kalita, P. (2021). "Thermal performance studies for drying of *Garcinia pedunculata* in a free convection corrugated type of solar dryer" *Renewable Energy*, 163, 599-612.
- Elhager, M.M.E. (2015). "A Comparative Study for Drying Apple and Carrot In An Indirect Solar Crop Dryer", Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Energy & Environment, Budapest
- Ertekin, C. ve Yıldız, O. (2004). "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model", *Journal of Food Engineering* 63.349-359p.
- Fadhel, M. I., Abdo, R. A., Yousif, B. F., Zaharim, A. ve Sopian, K. (2011, February). "Thin-layer drying characteristics of banana slices in a force convection indirect solar drying" In *Proceedings of the 6th IASME/WSEAS International Conference on Energy and Environment (EE 2011)* (pp. 310-315). World Scientific and Engineering Academy and Society Press.

- Fudholi, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H. ve Sopian, K. (2013). "Drying of Malaysian Capsicum Annuum L. (Red Chili) Dried by Open and Solar Drying", *International Journal of Photoenergy, Solar Energy and Clean Energy: Trends and Developments*, 167895, 89-97
- Gülçimen, F., Durmuş, A. ve Durmuş, A. (2010). "Kurutmada Kullanmak için Havalı Kolektörler Tasarlanması, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 118, 38-43
- Hadibi, T., Boubekri, A., Mennouche, D., Benhamza, A. ve Abdenouri, N. (2021). "3E analysis and mathematical modeling of garlic drying process in a hybrid solar-electric dryer" *Renewable Energy*, 170, 1052-1069.
- Hao, W., Zhang, H., Liu, S., Mi, B. ve Lai, Y. (2021). "Mathematical Modeling and Performance Analysis of Direct Expansion Heat Pump Assisted Solar Drying System", *Renewable Energy*, Vol 165, 77-87
- Hawladar, M. N. A., Rahman, S. M. A. ve Jahangeer, K. A. (2008). "Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer" *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1612-1619.
- Hedge, V.N., Hosur, V.S, Rathod, S.K., Harsoor, P.A ve Narayana, K.B. (2015). "Design, Fabrication and Performance Evaluation of Solar Dryer for Banana" *Sustainability and Society*, 5 , 1-12
- Jiang, H., Zhang, M., ve Mujumdar, A. S. (2010). "Microwave freeze-drying characteristics of banana crisps" *Drying Technology*, 28(12), 1377-1384.
- Kabeel, A. E. ve Abdelgaied, M. (2018). "Experimental evaluation of a two-stage indirect solar dryer with reheating coupled with HDH desalination system for remote areas" *Desalination*, 425, 22-29.
- Karakaya, H. (2017). "Güneş Enerjisi Destekli Doğal Taşınımlı Kurutma Sisteminde Kurutma Parametrelerinin İncelenmesi", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- Karamanav, M. (2017). "Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi

- Karim, M. A. ve Hawlader, M. N. A. (2005). "Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation" *Journal of food engineering*, 70(1), 35-45.
- Khan, F. ve Min, K. (2013). "Integrated Use of Flat Plate Solar Collector for the Dehydration Process of Fruit", *Annals of Biological*, 5
- Khuresi, N.A. ve Walke, S. (2016). "Drying Characteristics of Fruits using Solar Drying", *International Journal of Emerging Technologies and Engineering*, 7, 48-52
- Kılıç, F.Ç. (2015). "Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri" *Mühendis ve Makina*, Cilt:56, Sayı:671, 28-38
- Kong, D., Wang, Y., Li, M., Vanhkeo, K., Huang, M. ve Yu, Q. (2020). "Experimental Study of Solar Photovoltaic/Thermal (PV/T) Air Collector Drying Performance" *Solar Energy* 208, 978-989
- Küçükkaya, E. (2016). "Güneş Kolektörü Nedir?", *Enerji Portal*, [enerjiportali.com/gunes-kollektoru-nedir/](http://enerjiportali.com/gunes-kollektoru-nedir/)
- Lamrani, B. ve Draoui, A. (2020). "Thermal performance and economic analysis of an indirect solar dryer of wood integrated with packed-bed thermal energy storage system: A case study of solar thermal applications" *Drying Technology*, 1-18.
- Leon, M. A. ve Kumar, S. (2008). "Design and performance evaluation of a solar-assisted biomass drying system with thermal storage" *Drying technology*, 26(7), 936-947.
- Madhankumar, S., Viswanathan, K. ve Wu, W. (2021). "Energy, exergy and environmental impact analysis on the novel indirect solar dryer with fins inserted phase change material" *Renewable Energy*, 176, 280-294.
- Mortezapour, H., Ghobadian, B., Minaei, S. ve Khoshtaghaza, M. H. (2012). "Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer" *Drying Technology*, 30(6), 560-566.
- Mugi, V. R. ve Chandramohan, V. P. (2021). "Energy and exergy analysis of forced and natural convection indirect solar dryers: Estimation of exergy inflow, outflow, losses, exergy efficiencies and sustainability indicators from drying experiments" *Journal of Cleaner Production*, 282, 124421.

- Nabnean, S. ve Nimnuan, P. (2020). "Experimental Performance of Direct Forced Convection Household Solar Dryer for Drying Banana", *Case Studies in Thermal Engineering* 22, 100787
- Ndukwu, M. C., Onyenwigwe, D., Abam, F. I., Eke, A. B. ve Dirioha, C. (2020). "Development of a low-cost wind-powered active solar dryer integrated with glycerol as thermal storage" *Renewable Energy*, 154, 553-568.
- Oi-Long, S., Chang-Hu X., Ya Z., Zhao-Jie, L. ve Xiang-You, W. (2008). "Drying Characteristics of Horse Mackerel (*Trachurus japonicus*) Dried in A Heat Pump Dehumidifier", *Jurnal of Food Engineering* (84) 12-20p.
- Ozgener, O. ve Hepbasli, A. (2007). "A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems" *Renewable and Sustainable energy reviews*, 11(3), 482-496.
- Özçelik, Ç. (2020). "Faz Değiştirmeli Güneş Enerjisi Depolama Sistemiyle Entegre Güneş Enerjili Meyve Kurutma Sistemi Modellenmesi, Dizaynı, Testleri ve Değerlendirilmesi", Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
- Özdamar, A. (2020). Rüzgâr Enerjisi ve Rüzgâr Türbinlerine Genel Bakış, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı, İzmir, 242-254
- Öztürk, S., Şakıyan, Ö. ve Alifakı, Ö.Y. (2017). "Dielectric properties and microwave and infrared-microwave combination drying characteristics of banana and kiwifruit" *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), e12502.
- Pathak, S., Shah, S., Charan, M., Yadav, S. ve Madane, V. (2020). "Solar Food And Seed Dryer", EasyChair Preprint, No 3428
- Polatçı, H. (2013). "Tokat İlinde Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalı Bir Kurutucu Sistem Geliştirilmesi ve Domates Kurutma Performansının Farklı Kurutma Sistemleri ile Karşılaştırılması", Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makineleri Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi

- Prawiranto, K., Carmeliet, J. ve Defraeye, T. (2021). "Physics-Based Digital Twin Identifies Trade-Offs Between Drying Time, Fruit Quality, and Energy Use for Solar Drying" *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 286.
- Raj, A. K. ve Jayaraj, S. (2021). "Development and assessment of generalized drying kinetics in multi-tray solar cabinet dryer" *Solar Energy*, 226, 112-121.
- Ramirez, C., Palacio, M. ve Carmona, M. (2020). "Reduced Model and Comparative Analysis of the Thermal Performance of Indirect Solar Dryer with and without PCM" *Energies*, 13(20), 5508.
- Rani, P. ve Tripathi, P.P. (2021). "Drying Characteristics, Energetic And Exergetic Investigation During Mixed-Mode Solar Drying of Pineapple Slices at Varied Air Mass Flow Rates", *Renewable Energy*, Vol 167, 508-519, In India
- Rashidi, M., Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H. ve Kermani, A. M. (2021). "Acceleration the drying process of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) using reflectors and desiccant system in a solar drying system" *Renewable Energy*, 171, 526-541.
- Roratto, T.B., Monteiro, R.L., Carciofi, B.A.M. ve Lavrindo, J.B. (2021). "An Innovative Hybrid-Solar-Vacuum Dryer to Produce High-Quality Dried Fruits And Vegetables", *LWT*, Vol 140, 110777, In Brazil
- Royal Academy, Royal Academy of Engineering (2018). Wind Turbine Power Calculations RWE Npower renewable. Npower, 2018, 1-5.
- Sabareesh, V., Milan, J.K., Muraleedharan, C. ve Rohinikumar, B. (2021). "Improved Solar Drying Performance by Ultrasonic Desiccant Dehumidification in Indirect Forced Convection Solar Drying of Ginger with Phase Change Material", *Renewable Energy*, Vol 169, 1280-1293
- Sacilik, K. ve Elicin, A.K. (2006). "The thin layer drying characteristics of organic apple slices." *Journal of Food Engineering* Volume 73, 281-289p.

- Salve, S. ve Fulambarkar, A. M. (2021). "A Solar Dryer for Drying Green Chili in a Forced Convection for Increasing the Moisture Removing Rate", *Materialstoday: Proceedings*, In India
- Singh, A., Sarkar, J., ve Sahoo, R. R. (2020). "Experimentation on solar-assisted heat pump dryer: Thermodynamic, economic and exergoeconomic assessments" *Solar Energy*, 208, 150-159.
- Singh, A., Sarkar, J. ve Sahoo, R. R. (2020). "Experimental energy, exergy, economic and exergoeconomic analyses of batch-type solar-assisted heat pump dryer" *Renewable Energy*, 156, 1107-1116.
- Singh, P. ve Gaur, M. K. (2021). "Sustainability assessment of hybrid active greenhouse solar dryer integrated with evacuated solar collector" *Current Research in Food Science*, 4, 684-691.
- Singh, P. ve Gaur, M. K. (2021). "Environmental and economic analysis of novel hybrid active greenhouse solar dryer with evacuated tube solar collector" *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101428.
- Slama, R.B., Mechlouch, F. ve Daoud, H.B. (2009). "Experimental Investigation of Solar Drying for Orange Peels by Forced Convection", *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy*, Tunisia, 311-315
- Sontakke, M. ve Salve, S. (2015). "Solart Drying Technologies: A riew, *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 4(4), 29-35
- Sözen, A., Kazancıoğlu, F. Ş., Tuncer, A. D., Khanlari, A., Bilge, Y. C., ve Gungor, A. (2021). "Thermal performance improvement of an indirect solar dryer with tube-type absorber packed with aluminum wool" *Solar Energy*, 217, 328-341.
- Ssemwanga, M., Makule, E. ve Kayondo, S.I. (2020). "Performance Analysis of an Improved Solar Dryer Integrated With Multiple Metallic Solar Concentrators for Drying Fruits" , *Solar Energy* 204, 419-428
- Şen, Z. (2000). Rüzgâr Türbini Tarihi Gelişme Süreci, III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 377

- Şevik, S., Aktaş, M., Doğan, H. ve Yılmaz, A. (2014). “Küçük Ölçekli Sera Tipi Bir Kurutucuda Kırmızı Biber Kurutulmasının Termodinamik Analizi, *Politeknik Dergisi*, 4, 143-152
- Şipar, E. (2011). Rüzgar Enerjisi Türbin Sistemleri için Gerçek Zamanlı Dinamik Analiz Simülatorü Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 3 – 7
- Tuncer, A. D., Sözen, A., Khanlari, A., Amini, A. ve Şirin, C. (2020). “Thermal performance analysis of a quadruple-pass solar air collector assisted pilot-scale greenhouse dryer” *Solar Energy*, 203, 304-316.
- Uyar, F. (2016). Rüzgar Enerjisi Avantaj ve Dezavantajları <https://www.enerjibes.com/ruzgar-enerjisinin-avantajlari-ve-dezavantajlari/>
- Vijayan, S., Arjunan, T. V. ve Kumar, A. (2020). “Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer for drying bitter gourd slices” *Renewable Energy*, 146, 2210-2223.
- Yağcıoğlu, A. (1999). Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 536
- Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S. ve Abdenouri, N. (2019). “Simulation, design and experimental performance evaluation of an innovative hybrid solar-gas dryer” *Energy*, 189, 116279.

## EKLER

### KURUTMA DENEY SONUÇLARI

#### Kurutma Deneş No:1

Saat	I (W/m <sup>2</sup> ) 1. Deneş	1. Deneş	1. Deneş
		Kabin İçi Hava Hızı	Rüzgar Hızı
10:00	608	2,45	3,05
10:15	614	2,36	3,08
10:30	625	2,32	3,12
10:45	629	2,21	3,25
11:00	632	2,24	3,23
11:15	635	2,19	3,37
11:30	638	2,16	3,52
11:45	637	2,02	3,51
12:00	644	1,79	3,68
12:15	648	1,65	3,75
12:30	652	1,59	3,72
12:45	657	1,52	3,89
13:00	659	1,47	3,97
13:15	662	1,43	3,93
13:30	667	1,34	4,09
13:45	665	1,27	4,06
14:00	667	1,19	4,25
14:15	663	1,13	4,22
14:30	660	1,08	4,44
14:45	653	1,02	4,51
15:00	651	0,98	4,58
15:15	650	0,91	4,65
15:30	648	0,84	4,72
16:00	642	0,82	4,65

Zaman(Dak.)	Zaman(Saat)	T Giriş(°C)	Bağıl Nem Giriş	T Çıkış(°C)	Bağıl Nem Çıkış
0	10:00	38,2	0,44	38,4	0,46
30	10:30	40,9	0,39	41	0,42
60	11:00	42,3	0,34	42,5	0,37
90	11:30	43,2	0,28	43,3	0,31
120	12:00	43,9	0,21	44,1	0,25
150	12:30	44,5	0,18	44,8	0,22
180	13:00	46,1	0,14	46,4	0,17
210	13:30	46,8	0,15	47,2	0,19
240	14:00	47,1	0,19	47,4	0,22
270	14:30	48,3	0,22	48,6	0,25
300	15:00	49,2	0,25	49,5	0,27
330	15:30	50,1	0,28	50,3	0,31
360	16:00	50,4	0,3	50,7	0,33





Saat	Zaman (Dakika)	Nem Değişimleri					Nem Oranları					Kuruma Hızları															
		1 Ağrık Değişim (g)	2 Ağrık Değişim (g)	3 Ağrık Değişim (g)	4 Ağrık Değişim (g)	5 Ağrık Değişim (g)	1 Nem Oranı (MR)	2 Nem Oranı (MR)	3 Nem Oranı (MR)	4 Nem Oranı (MR)	5 Nem Oranı (MR)	dw/dt (N1)	Kuruma Hızı (g/d.s.) (N1)	dw/dt (N2)	Kuruma Hızı (g/d.s.) (N2)	dw/dt (N3)	Kuruma Hızı (g/d.s.) (N3)	dw/dt (N4)	Kuruma Hızı (g/d.s.) (N4)	dw/dt (N5)	Kuruma Hızı (g/d.s.) (N5)						
10:00	0	2,76	2,06	1,86	2,49	1,73	3,25	3,12	3,13	3,22	3,22	10,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,46	1,48	2,20	1,32	2,37	1,42	2,82	1,69	1,30	0,78	
10:30	30	2,28	1,73	1,54	1,99	1,57	2,51	2,46	2,42	2,37	2,83	10,30	0,77	0,79	0,77	0,74	0,88	0,97	0,58	1,07	0,64	1,11	0,67	1,19	0,71	0,89	0,54
11:00	60	2,09	1,57	1,39	1,78	1,46	2,22	2,14	2,09	2,02	2,56	11,00	0,68	0,69	0,67	0,63	0,80	1,13	0,68	1,07	0,64	0,96	0,58	0,85	0,51	0,65	0,39
11:30	90	1,87	1,41	1,26	1,63	1,38	1,88	1,82	1,80	1,76	2,37	11,30	0,58	0,58	0,58	0,55	0,73	0,92	0,55	1,07	0,64	0,81	0,49	0,96	0,58	0,98	0,59
12:00	120	1,69	1,25	1,15	1,46	1,26	1,60	1,50	1,56	1,47	2,07	12,00	0,49	0,48	0,50	0,46	0,64	1,23	0,74	0,87	0,52	0,67	0,40	1,02	0,61	1,06	0,63
12:30	150	1,45	1,12	1,06	1,28	1,13	1,23	1,24	1,36	1,17	1,76	12,30	0,38	0,40	0,43	0,36	0,55	1,08	0,65	1,07	0,64	1,26	0,76	1,19	0,71	1,46	0,88
13:00	180	1,24	0,96	0,89	1,07	0,95	0,91	0,92	0,98	0,81	1,32	13,00	0,28	0,29	0,31	0,25	0,41	0,72	0,43	1,13	0,68	0,96	0,58	0,73	0,44	1,87	1,12
13:30	210	1,1	0,79	0,76	0,94	0,72	0,69	0,58	0,69	0,59	0,76	13,30	0,21	0,19	0,22	0,18	0,23	0,92	0,55	0,93	0,56	0,96	0,58	0,90	0,54	1,22	0,73
14:00	240	0,92	0,65	0,65	0,78	0,57	0,42	0,30	0,40	0,32	0,39	14,00	0,15	0,10	0,13	0,10	0,12	0,72	0,43	0,33	0,20	0,67	0,40	0,40	0,24	0,65	0,39
14:30	270	0,78	0,6	0,54	0,71	0,49	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	14,30	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,67	0,40	0,67	0,40	0,67	0,40	0,68	0,41	0,65	0,39

Kalınlık:3 mm Toplam Ağırlık:139,3 gram

## Kurutma Deney No:4

Saat	I (W/m <sup>2</sup> )	4. Deney	
		4. Deney Kabin İçi Hava Hızı	4. Deney Rüzgar Hızı
10:00	555	2,77	3,89
10:15	559	2,57	4,05
10:30	561	2,48	4,16
10:45	562	2,46	4,08
11:00	565	2,43	3,95
11:15	567	2,37	4,06
11:30	569	2,32	4,16
11:45	568	2,25	4,27
12:00	572	2,11	4,22
12:15	575	2,02	4,31
12:30	568	1,96	4,45
12:45	551	1,91	4,38
13:00	540	1,85	4,51
13:15	520	1,81	4,72
13:30	505	1,76	4,85
13:45	498	1,68	5,12
14:00	490	1,59	5,35
14:15	486	1,54	5,42
14:30	482	1,46	5,55
14:45			5,51
15:00			5,35
15:15			5,41
15:30			5,57
16:00			5,72

Zaman(Dak.)	Zaman(Saat)	T Giriş(°C)	Bağıl Nem Giriş	T Çıkış(°C)	Bağıl Nem Çıkış
0	10:00	32,2	0,39	32,4	0,42
30	10:30	32,9	0,36	33,3	0,38
60	11:00	34,3	0,32	34,5	0,35
90	11:30	35,2	0,29	35,6	0,32
120	12:00	36	0,27	36,3	0,29
150	12:30	37,5	0,24	37,8	0,27
180	13:00	38,2	0,21	38,5	0,23
210	13:30	39	0,18	39,3	0,21
240	14:00	40,1	0,19	40,4	0,22
270	14:30	40,8	0,23	41,2	0,26



