

167923

T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÜNEŞ ENERJİLİ POLEN KURUTMA İŞLEMİNİN MATEMATİK  
MODELLEMESİ VE TERMODİNAMİK ANALİZİ



Burak ÇANAKÇI

Yüksek Lisans Tezi

Danışman  
Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ

Aralık 2005

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNE MÜH. ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. ARIF HEYBAŞLI (Ege Üniv.)  
(Ünvan, Adı ve Soyadı) (Üniversite)

Üye : Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ (Niğde Üniv.)  
(Ünvan, Adı ve Soyadı) (Üniversite)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN (Ege Üniv.)  
(Ünvan, Adı ve Soyadı) (Üniversite)

Üye : .....  
(Ünvan, Adı ve Soyadı) (Üniversite)

Üye : .....  
(Ünvan, Adı ve Soyadı) (Üniversite)

ONAY:

Bu tez 3/11/2005 tarihinde, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun 21.12.2005 tarih ve 2005/29-12 sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

Meysun İbrahim  
3.6/11/2005

Doç. Dr. Meysun İBRAHİM

Enstitü Müdürü

**ÖZET**  
**GÜNEŞ ENERJİLİ POLEN KURUTMA İŞLEMİNİN MATEMATİK**  
**MODELLEMESİ VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

ÇANAKÇI, Burak  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ

Aralık 2005, 62 sayfa

Bu çalışmanın temel amacı, literatürde bulunan tek tabaka kurutma eğri denklemleri kullanılarak, güneş enerjisi yardımıyla tek tabaka halinde kurutulan polenin matematik modellemesini yapmak ve bu kurutma işleminin termodinamik analizini gerçekleştirmektir. Matematik modelleme için, daha önceden literatürde sunulan polen dataları kullanılmış ve tek tabaka kurutma eğrilerinin denklemlerini temsil eden ampirik yada yarı ampirik modeller test edilmiştir. En iyi kurutma eğrisi denklem modelini belirlemek için, korelasyon katsayısı (R), khi-kare ( $\chi^2$ ), ortalama eğilim hatası (MBE), ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama bağıl sapma modülü (P) gibi istatistiksel parametreler dikkate alınmıştır. Termodinamik analiz için, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları uygulanmıştır. Birinci kanun kapsamında, güneş enerjili kurutma prosesi boyunca meydana gelen enerji kullanım oranlarını belirlemek için enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, ikinci kanun kapsamında, bu proses boyunca meydana gelen ekserji kayıplarının büyüklüğünü, yerini, tipini belirlemek için ekserji analizi yapılmıştır.

Sonuç olarak, polenin güneş enerjili tek tabaka kurutma eğrilerini en iyi tanımlayan model olarak Midilli-Küçük modeli seçilmiştir. Ayrıca, en fazla enerjinin yedinci ve onuncu raflarda kullanıldığı (raf 7 ve raf 10 için ortalama olarak 2.30-15.70 %; kurutma dolabı için 9,22-54 %), ekserji kayıplarının enerji kullanımıyla arttığı ve çoğunlukla ekserji kayıplarının (raf 7 ve raf 10 için 0.0013-0.091 kJ/h; kurutma dolabı için ise 0.002-0.035 kJ/h) kullanılabilir enerjinin daha az olduğu yedinci ve onuncu raflarda meydana geldiği görülmüştür.

**Anahtar sözcükler:** Güneş Enerjisi, Kurutma, Polen, Matematik Modelleme, Termodinamik, Enerji Analizi, Ekserji Analizi

**SUMMARY**  
**MATHEMATICAL MODELING AND THERMODYNAMIC**  
**ANALYSIS OF SOLAR DRYING PROCESS OF POLLEN**

**ÇANAKÇI, Burak**

**Niğde University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ**

**December 2005, 62 pages**

The main objective pursued in study is to perform the mathematical modeling of the single-layer solar drying process of pollen by applying the single layer drying curve equation models in literature and also to accomplish the thermodynamic analysis of drying process. For the mathematical modeling, the experimental data previously presented in the literature are used and thirteen empirical or semi-empirical models representing the single layer drying curve equations are tested. In order to determine the best single layer drying curve equation model, the following statistical parameters such as correlation coefficient (R), chi-square ( $\chi^2$ ), mean bias error (MBE), mean square error (RMSE) and mean relative derivation modulus (P) are taken into consideration. For the thermodynamic analysis, the first and the second laws of thermodynamics are applied. In the scope of the first law, energy analysis is performed to estimate the energy utilization ratios throughout the solar drying process. However, in terms of the second law of thermodynamics, exergy analysis is carried out to determine the location, type, and magnitude of exergy losses. It was deduced that the Midilli-Kucuk model was selected as the most suitable mathematical model describing the single layer solar drying curves of pollen. In addition, it was noticed that the most energy was utilized throughout the shelf 7 and shelf 10 (average 2.30-15.70 % for shelf 7 and shelf 10; 9.22-54 % for drying cupboard), and the exergy losses (0.0013-0.091 kJ/h for shelf 7 and shelf 10; 0.002-0.035 kJ/h for drying cabinet) increased with increasing energy utilization, and the exergy losses took place mostly in the shelf 7 and shelf 10 where the available energy was less utilized.

**Key words:** Solar Energy, Drying, Pollen, Mathematical Modeling, Thermodynamic, Energy Analysis, Exergy Analysis.

## ÖNSÖZ

Tarımsal ürünlerin dış satımında karşılaşılan sorunların aşılması kurutma işleminin kapalı sistemlerde gerçekleştirilmesiyle mümkündür. Yöresel koşullara uygun olarak tasarlanacak kurutucularda enerji kaynağı olarak elektrik, güneş veya jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılabilir. Ürün tipi ve yöre koşullarına uygun kurutucu modellerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Rize' nin Anzer yaylasında üretilen Anzer poleni Anzer balının hammaddesini oluşturmaktadır. Günümüzde Anzer poleni üreticilerinin en önemli problemlerinden biri de, toplanan polenlerin uygun şartlarda kurutulamamasıdır. Genellikle, toplanan Anzer polenleri açık havada veya yoğun güneş radyasyonu altında kurutulmaları nedeniyle, kısmen tatlarını ve vitaminlerini kaybederler. Bu nedenle, polen üreticilerine bilimsel katkı yapabilmek için polenin kurutulması işlemi güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda, herhangi bir tür polenin güneş enerjili kurutulması işleminin matematiksel modellenmesi ve termodinamik analizine rastlanmamıştır. Orijinalliğini ve bilimselliğini buradan alan bu çalışmanın, literatüre ve endüstriye hem akademik hem de teknik katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma, polen üreticilerine daha optimum ve gerçekçi şartlarda polenin kurutulması desteğini sağlayabilecektir. Bunun yanında, diğer tarım ürünlerinin de matematiksel modellenmesinin ve termodinamik analizinin yapılmasında bu çalışmanın bilimsel ve endüstriyel bir referans olacağı beklenmektedir.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında beni bilimsel olarak yönlendiren, bana bilimsel hırs aşıl原因, bilimde evrensel düşünme becerisi kazandıran ve çalışmalarım sırasında her türlü bilimsel katkıyı sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Adnan MİDİLLİ' ye sonsuz teşekkür eder ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, tez çalışmalarım sırasında benden değerli bilimsel katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Ebru Kavak AKPINAR' a, Dr. Haydar KÜÇÜK' e, Mak. Yük. Müh. Murat AY' a çok teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmalarım sırasında yeter derecede imkanlarından yararlandığım Niğde Üniversitesi makine mühendisliği anabilim dalı' nın değerli öğretim elemanlarına ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana maddi ve manevi yardımlarda bulunan ve sabırla beni bekleyen aileme ve saygıdeğer nişanlım Ceren DEMİRÖRS' e minnettarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
SUMMARY.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi.....	2
1.2. Literatür Özeti.....	3
1.2.1. Kuruma kuramı ve evreleri.....	3
1.2.2. İnce tabaka kuruma kuramı.....	6
1.2.2.1. Sabit hızda kuruma evresi.....	6
1.2.2.2. Azalan hızla kuruma evresi.....	7
1.2.3. Kuruma teorileri.....	8
1.2.3.1. Difüzyon teorisi.....	8
1.2.3.2. Büzülme ve kabuklaşma.....	9
1.2.3.3. Kapılar teori.....	10
1.2.4. Kurutucular ve kurutma yöntemleri.....	11
1.2.4.1. Kurutucu seçimi.....	13
1.3. Literatür Araştırması.....	14
1.3.1. Tek tabaka kurutma ile ilgili çalışmalar.....	15
1.3.2. Tek tabaka kurutma işleminin matematik modellemesi üzerine yapılan çalışmalar.....	21
1.3.3. Tek tabaka kurutma işleminin termodinamik analizi üzerine yapılan çalışmalar.....	24

<b>BÖLÜM 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>26</b>
2.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Şartları.....	26
2.2. Matematik Modelleme.....	28
2.2.1. Nemlilik ölçüsü.....	28
2.2.2. Denge nem içeriği.....	30
2.2.3. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilen teorik-yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri.....	30
2.3. Termodinamik Analiz.....	36
2.3.1. Enerji analizi.....	37
2.3.1.1. Fan çıkış koşullarının belirlenmesi.....	38
2.3.1.2. Güneşli hava kollektörünün çıkış şartlarının belirlenmesi.....	38
2.3.1.3. Rafların çıkış şartlarının belirlenmesi.....	39
2.3.1.4. Kurutma dolabının çıkış şartlarının belirlenmesi.....	40
2.3.2. Ekserji analizi.....	41
<b>BÖLÜM 3. BULGULAR.....</b>	<b>44</b>
3.1. Modelleme ile İlgili Bulgular.....	44
3.1.1. Belirsizlik analizi değerleri.....	48
3.2. Termodinamik Analiz ile İlgili Bulgular.....	49
3.2.1. Enerji analizi ile ilgili bulgular.....	49
3.2.2. Ekserji analizi ile ilgili bulgular.....	52
<b>BÖLÜM 4. SONUÇLAR.....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>57</b>



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Tek tabaka kurutma işlemi için geliştirilen ampirik modeller.....	35
Çizelge 3.1. İstatistik analiz sonuçları ve tek tabaka ampirik deneysel kuruma eşitlikleri.....	46
Çizelge 3.2. Polenin güneş enerjili kurutma işlemi deneylerinde ölçülen parametrelerin belirsizlik değerleri.....	48



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Ürün hücresinde ısı ve suyun kuruma sırasındaki hareket yönleri.....	4
Şekil 1.2. Karakteristik kuruma eğrileri.....	5
Şekil 1.3. Gözenekli katılara ait tipik bir nem dağılımı grafiği.....	11
Şekil 1.4. Gözenekli katılara ait tipik bir kuruma eğrisi.....	11
Şekil 2.1. Güneş enerjili kurutma kabini.....	27
Şekil 2.2. Rafların sistematik enerji modeli.....	39
Şekil 3.1. Ağırlık kaybının zamana göre değişimi.....	44
Şekil 3.2. Kuruma hızı-kurutma zamanı değişimi.....	47
Şekil 3.3. Hesaplanan nem oranları-deneysel nem oranları değişimi.....	48
Şekil 3.4. Güneş radyasyonu değerlerine bağlı olarak kurutma sırasındaki sıcaklık değerleri.....	49
Şekil 3.5. Güneş enerjili tek tabaka kurutma işlemi sırasında kullanılan enerji miktarı ile ağırlık kaybının zamana bağlı olarak değişimi.....	50
Şekil 3.6. Kurutma dolabında ve raflarda enerji kullanım oranlarının zamanla değişimi.....	51
Şekil 3.7. Kurutma dolabındaki ve raflardaki ekserji kaybının ve ağırlık kaybının kurutma havası sıcaklığı ile değişimi.....	52

Şekil 3.8. Kurutma dolabındaki ve raflardaki ekserji kaybının ve ağırlık kaybının zamanla değişimi..... 53

Şekil 3.9. Kurutma dolabının ve rafların kurutma işlemi sırasındaki ekserji verimlerinin zamana bağlı değişimi..... 54

Şekil 3.10. Kurutma dolabının ve rafların kurutma işlemi sırasındaki ekserji verimlerinin kurutma sıcaklığına bağlı değişimi..... 54



## SİMGE VE KISALTMALAR

### SİMGE/ KISALTIMA

a	Hava
sc	Güneş kollektörü
da	Kurutma havası
dc	Kurutma kabini
e	Denge şartları
f	Fan
i	Giriş
k	Kuru ürün
k.b	Kuru baz
L	Kayıp
mp	Nem üretimi
o	Çıkış
s	Su
sat	Doymuş buhar
sh	Raf
y.b	Yaş baz
w	Nem
$w_p$	Polenden ayrılan nem
@T	Belirli sıcaklık
a	Katsayı
A	Alan, m <sup>2</sup>
b, c	Katsayı

$c_p$	Özgül ısı, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\bar{c}_p$	Ortalama özgül ısı, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
D	Difüzyon katsayısı, $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$
$dM/dt$	Nem değişimi, $\text{gg}^{-1} \text{min}^{-1}$
$dT/dt$	Sıcaklık değişimi
$dW/dt$	Kuruma hızı
E	Yayma gücü
EUR	Enerji kullanım oranı, %
Ex	Ekserji, $\text{kJ kg}^{-1}$
F	Şekil faktörü
g	Katsayı
g	Kütlesel ivme, $\text{m s}^{-1}$
$g_c$	Yercekim ivmesi
h	Katsayı
h	Entalpi, $\text{kJ kg}^{-1}$
J	Joule sabiti
$k, k_0, k_1$	Denklemlerdeki sabit katsayılar
$\dot{m}$	Kütlesel debi, $\text{kg s}^{-1}$
M	Nem miktarı
MBE	Ortalama eğilim hatası
$M_e$	Denge nemi miktarı
$M_0$	Başlangıç nemi miktarı
MR	Boyutsuz nem oranı
$MR_{\text{exp}}$	Deneysel nem oranı

$MR_{pre}$	Tahmin edilen nem oranı
$n$	Katsayı
$n$	Denklemlerdeki sabit adedi
$N$	Gözlem sayısı
$N_c$	Kimyasal enerji değişim sayısı
$P$	Basınç, kPa
$P$	Ortalama eğilim hatası
$R$	Korelasyon katsayısı
RMSE	Ortalama kare hatası
$\dot{Q}$	Net ısı, $\text{kJ s}^{-1}$
$\dot{Q}_u$	Kollektörden elde edilen kullanılabilir enerji, $\text{kJ s}^{-1}$
$s$	Özgül entropi, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$t$	Zaman, h
$T$	Sıcaklık, K
$u$	İç enerji, $\text{kJ kg}^{-1}$
$\nu$	Özgül hacim, $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
$V$	Hız, $\text{m s}^{-1}$
$w$	Özgül nem, $(\text{kg kuru hava}) (\text{kg su buhari})^{-1}$
$W$	Ağırlık, gr
$\dot{W}$	Kullanılan enerji, $\text{J s}^{-1}$
$z$	Düşey koordinat, m
$\phi$	Bağıl nem, %
$\eta_{Ex}$	Ekserjitik verim, %
$\mu_c$	Kimyasal potansiyel, $\text{kJ kg}^{-1}$

$\chi^2$

Khi-kare

$\infty$

Referans koşulları



# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

İnsanoğlu, yaşamını sürdürebilmek için öncelikle beslenmede, birçok teknikler geliştirmiştir. Bu tekniklerin en önemlisi ve en eskisi yaş gıdaların kurutulularak muhafaza edilmesidir. Kurutma tekniğinin gelişmesinde elde edilen başarılar, insanoğlunun temel ihtiyaç ve isteklerini tatmin etmede gösterdiği gelişmeler üzerinde çok etkili olmuştur. Bunun sonucu olarak da, sebze ve meyve kurutma sanayi ortaya çıkmış ve giderek hızlı bir tempo içinde gelişme kaydedilmiştir. Günümüzde kurutulmuş sebze ve meyveler özellikle gelişmiş ülkelerde geniş bir tüketim alanı bulmuş olup, bu tüketim alanı sürekli ve hızlı bir biçimde gelişmektedir.

Kurutulmuş sebze ve meyvelerin temel tüketim alanı gıda sanayidir. Bunlar hazır çorba ve yemeklerin, bebek mamalarının, hazır sos ve baharat karışımlarının temel girdisini oluştururlar. Bunun yanı sıra, personeline yemek servisi yapan kamu ve özel kuruluşlarda, yardım kurumlarında, lokantacılıkta kurutulmuş sebzeler giderek daha geniş ölçüde kullanılmaktadır. Kadının ekonomik faaliyetlere daha büyük ölçüde katılması ve dolayısıyla yemek yapmaya ayırdığı zamanın azalması, kurutulmuş sebzelerin ve bunları kullanarak hazırlanan hazır yemeklerin tüketimini artıran önemli bir faktör olmuştur [1].

Taze meyve ve sebzelerin çabuk bozulması, bu ürünlerin taze olarak dar bir bölgede ve belirli bir süre içerisinde tüketilmesini zorunlu kılmaktadır. Oysa bunların kurutulmaları ile her mevsim için iç ve dış pazar istekleri rahatlıkla karşılanabilir. Günümüzde taze meyve ve sebzelerin üretiminden hemen sonra tüketilmesi gün geçtikçe azalmakta ve aynı zamanda ekonomik de olmamaktadır. Gelişmiş ülkelerde yaş gıda maddelerinin %60' ı teknolojik işlemlere tabi tutulurken bu oran Türkiye' de %30' u bulmaktadır. Bu oranın yükseltilmesi gelişme düzeyini artıracadığı gibi ekonomik verimliliği de artırıcı ve hatta tarımsal kalkınmayı motive edici olacaktır. Kurutma gıda maddelerinin uzun süre kullanılmasını sağlayan teknolojik işlemlerin başında gelmektedir.

Kurutma, ürünlerdeki sıvının uzaklaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Kurutma ile ürünlerdeki mevcut su, ürünün bozulmasına imkan vermeyecek bir düzeye kadar



azaltıldığı için kesin bir muhafaza imkanı oluşmaktadır. Kurutulmuş gıdalar, diğer yöntemlerle muhafaza edilenlerden farklı olarak, besin öğeleri açısından yoğunlaştırılmış nitelik kazanmaktadır.

Tarımsal ürünlerin dış satımında karşılaşılan sorunların aşılması kurutma işleminin kapalı sistemlerde gerçekleştirilmesiyle mümkündür. Yöresel koşullara uygun olarak tasarlanacak kurutucularda enerji kaynağı olarak elektrik, güneş veya jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılabilir. Ürün tipi ve yöre koşullarına uygun kurutucu modellerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada polenin güneş enerjili kurutma işleminin matematik modellemesi ve enerji-ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Polen örneklerinin güneş kolektöründe ısınan hava ile kurutma kabınınin farklı raflarında kurutulması sonucu elde edilen deneysel verilerle kullanılarak, polen kurutma işlemini tanımlayan en iyi model literatürde verilmiş olan matematik modeller test edilerek belirlenmiş ve kurutma işleminin enerji-ekserji analizleri termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### **1.1. Tezin Amacı ve Önemi:**

Yapılacak olan tez çalışmasının amacı Rize'nin Anzer Yaylasında üretilen Anzer Balının hammaddesi olan Anzer Poleninin güneş enerjili bir sistemde tek tabaka halinde kurutulması neticesinde alınan deneysel veriler kullanılarak, literatürdeki tek tabaka kurutma işlemlerine ait matematik modellerini test etmek ve Anzer polenini temsil edebilecek en uygun matematiksel modeli belirlemektir. Ayrıca, deneylerden elde edilen veriler kullanılarak polenin güneş enerjisi ile kurutma işleminin enerji ve ekserji analizini yapmaktır.

Günümüzde Anzer poleni üreticilerinin en önemli problemlerinden biri de, toplanan polenlerin uygun şartlarda kurutulmamasıdır. Genellikle, toplanan Anzer polenleri açık havada veya yoğun güneş radyasyonu altında kurutulmaları nedeniyle, kısmen tatlarını ve vitaminlerini kaybederler. Bu nedenle, polen üreticilerine bilimsel katkı yapabilmek için polenin kurutulması işlemi güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda, herhangi bir tür

polenin güneş enerjili kurutulması işleminin matematiksel modellenmesi ve termodinamik analizine rastlanmamıştır. Orijinalliğini ve bilimselliğini buradan alan bu çalışmanın, literatüre ve endüstriye hem akademik hem de teknik katkı saylayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma, polen üreticilerine daha optimum ve gerçekçi şartlarda polenin kurutulması desteğini sağlayabilecektir. Bunun yanında, diğer tarım ürünlerinin de matematiksel modellenmesinin ve termodinamik analizinin yapılmasında bu çalışmanın bilimsel ve endüstriyel bir referans olacağı beklenmektedir.

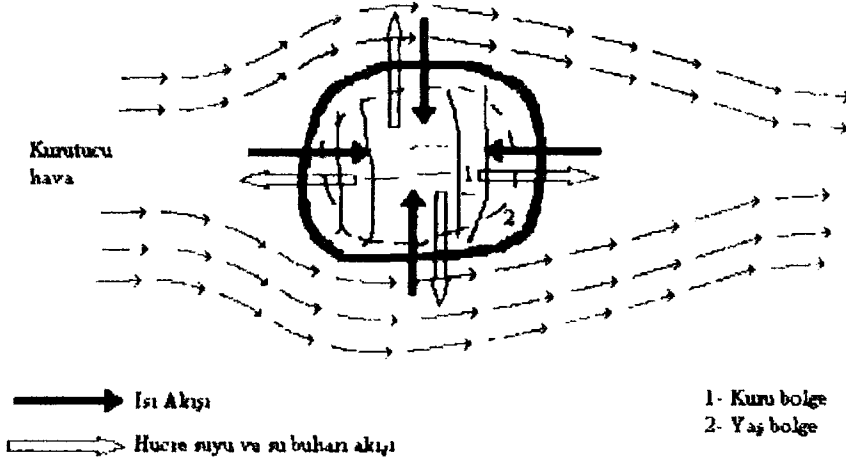
## **1.2. Literatür Özeti**

### **1.2.1. Kuruma kuramı ve evreleri**

Kurutmada esas, kurutulacak malzemenin içindeki suyu önce buhar haline getirip sonrada bu buharı uzaklaştırmaktır. Suyu sıvı halden buhar haline getirmek için, buharlaştırma gizli ısısı kadar bir ısı vermek gerekmektedir. Bu ısı, normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak her gram su için yaklaşık 2.5 kJ' dır. Malzemeye bu ısıyı vermek için klasik ısı transfer yöntemleri ile di-elektrik ısıtma metotları kullanılır. Klasik ısı transfer yöntemleri kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyondur. Bu ısının verilmesi sırasında ısı transfer metotlarından biri veya birkaçı etkili olabilir. Hava akımı yardımıyla yapılan kurutmada konveksiyonla ısı iletimi daha etkindir [2].

Şekil 1.1' de görüldüğü gibi bu ısıtmada, sıcaklık dokunun dışından hücrelere doğru olurken, buharlaşan su hücreden dışa doğrudur. Di-elektrik yolla ısı transferi ise bunun tam tersi olup, ısı içeriden dışa doğrudur. Su buharının ürünü terk edişi difüzyon, kapilar veya bu iki mekanizma ile olur.

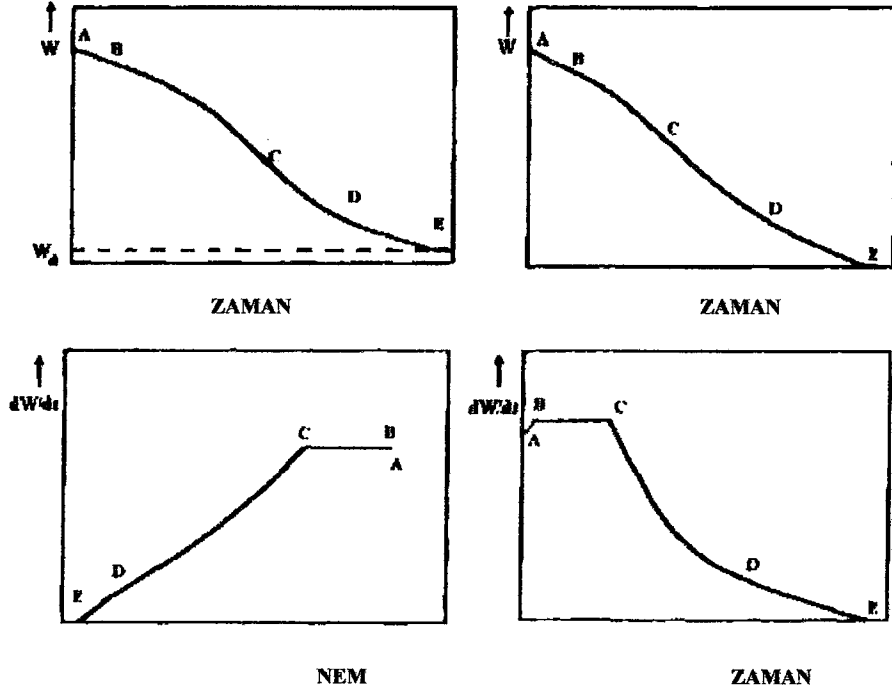
Kuruma amacıyla yeterli ısının bulunduğu bir ortama konan nemli bir maddenin kuruma sürecinde genel olarak üç evre vardır. Bunlar ısınma evresi, sabit kuruma hızı ve azalan kuruma hızı evreleridir [2].



**Şekil 1.1.** Ürün hücresinde ısı ve suyun kuruma sırasındaki hareket yönleri [2]

Kurumakta olan bir maddenin nemliliğinde olan değişim Şekil 1.2'de verilmiştir. Şekillerde AB ile gösterilen ısınma evresi, ürünün sıcaklığı kurutma havasının sıcaklığı ile dengeye ulaşmaya kadar sürer. Ürün kalınlığı azaldıkça, ısınma evresi süresince oluşan nem kaybı dikkate alınmayacak ölçüde azalır [2].

Sabit kuruma hızı evresi, şekillerde BC çizgisiyle belirtilmiştir. Burada ürünün üzeri ince bir su tabakası ile kaplı olduğundan, önce bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Aslında bu durgun bir su yüzeyinden olan serbest buharlaşmaya benzer. Başlangıçta çok hızlı olan bu buharlaşma, bir süre sonra yüzeyin hemen üzerinde oluşan buhar tabakası nedeniyle yavaşlar. Kurumanın devam etmesi için, bu buhar filminin Şekil 1.1 'de görüldüğü gibi hareketli bir hava akımı ile dağıtılıp taşınması gerekir. Şekildeki C noktası (ürünün yüzeyindeki serbestçe buharlaşabilen nem sona erdiği zaman), sabit hızdaki kurumanın sona erdiğini belirtmekte olup, bu noktadaki nem "kritik nem" olarak bilinir. C noktasının görülebilmesi için, ürünün başlangıç nemi, kritik nem değerinden daha yüksek olmalıdır. Meyvelerde ve sebzelerde sabit kuruma hızı evresi, genellikle çok kısa sürer [2].



Şekil 1.2. Karakteristik kuruma eğrileri [2]

Şekildeki CDE eğrisi, sabit kuruma evresinden sonra başlayan azalan hızda kuruma evresini göstermektedir. Bu evrede buharlaşma ürünün içinde başladığından su yüzeye difüzyon ile ulaşır. Yüzeğe yakın bölümler, hem doğrudan doğruya yüzeğe ve hem de kapillarlarla nem verdiklerinden, iç katmanlara göre daha çok su kaybederler. Bunun sonucu olarak ürünün dış yüzeyinde kabuk bağlama, buruşma, çatlama ve yarılmalar görülür. Bu evrede kuruma süresi uzadıkça, birim zamanda buharlaşan nem miktarı azalmaktadır. Bu nedenle bu evreye azalan hızda kuruma evresi denir ve nem uzaklaşması sona erene kadar (E) devam eder. Birinci azalan hız evresinde, hem yüzeyden serbest buharlaşma ve hem de iç kısımlardaki buharlaşan suyun hareketi etkili olmaktadır. Bu bölüm bir geçiş aşamasıdır (CD arası). Hava hızı, sıcaklık ve nem bu bölümde etkili olmaktadır. İkinci bölümde kuruma hızı, bütünüyle içsel nem hareketine bağlı olarak oluşur. DE ile gösterilen bu bölüm denge nemine ulaşmaya kadar devam eder [2].

### **1.2.2. İnce tabaka kuruma kuramı (Tek tabaka kuruma kuramı)**

İnce tabaka kavramı, kurutulacak ürünün yalnızca bir tanesinin kalınlığına sahip olacak şekilde serilmesiyle elde edilen, kuramsal bir ürün tabakasını belirtir. Bu kavram, kurutma havasının bu tabakanın içinden geçerken sıcaklık ve nem değerlerinde bir değişikliğin olmadığı kabulünün yapılabildiğini sağlamaktadır [3].

Tarım ürünlerinin ince tabaka halinde kurutulması sırasında ısı ve kütle iletimi sabit ve azalan kuruma evreleri için ayrı ayrı incelenir [3].

#### **1.2.2.1. Sabit hızda kuruma evresi**

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

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

kabul edilir. Bu ön kabullerden de anlaşılacağı gibi, sabit hızla kuruma evresinde buharlaşan su miktarının aynı koşullardaki serbest su yüzeyinden buharlaşan su miktarına eşit olduğu varsayılmaktadır. Oysa, yapılan gözlemler, bu evrede üründen buharlaşan suyun serbest su yüzeyinden buharlaşandan %30 daha az olduğunu göstermektedir [4].

### 1.2.2.2. Azalan hızla kuruma evresi

Azalan hızla kuruma evresi sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi, sabit hızla kuruma evresine göre daha karmaşıktır. Yalnızca materyalin yüzeyinden konveksiyonla ısı ve kütle iletimi söz konusu değildir. Bu evrede ürün içindeki ısı ve kütle difüzyonunun da dikkate alınması gerekmektedir [3].

Azalan hızla kuruma evresi sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden yararlanmak mümkündür.

Azalan hızla kuruma evresiyle ilgili teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin geliştirilmesi sırasında, işlemleri biraz daha kolaylaştırmak amacıyla, bazı ön kabuller yapılır. Bu kabuller aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir [3];

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

### 1.2.3. Kuruma teorileri

Nem içeren katı maddelerin kuruma hızları genel olarak birbirinden açık şekilde ayrılabilen iki veya bazen üç bölümden oluşur. Sabit kuruma hız periyodunda katı yüzeyindeki suyun hava akımına buharlaşmasını gaz fazı film transfer katsayısı kontrol etmektedir. Buna karşılık azalan hız periyodunda su buharının katı bünyesinden yüzeye transfer mekanizması daha farklıdır. Gözeneksiz katılar genel olarak düzenli bir nem dağılım diyagramına sahiptirler.

#### 1.2.3.1. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisine göre katının iç kısımlarındaki suyun yüzeye hareketi katı içi difüzyonla gerçekleşir. II. Fick kanununa uyan buhar veya sıvıların transferinde bu tip difüzyon kontrollü kütle transferinin olduğu varsayılır. II. Fick kanununun tek yönlü difüzyon için matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir [5].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial L^2} \right) \quad (1.1)$$

Burada C, A ve B' den oluşan karışımdaki bileşenlerden herhangi birinin bileşimidir.

Yassı tabakaların kurutulmasında azalan hız periyodu için (1.1) eşitliğinin çözümünden aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{M - M_e}{M_c - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-a\beta} + \frac{1}{9} e^{-9a\beta} + \frac{1}{25} e^{-25a\beta} + \dots \right) \quad (1.2)$$

Burada;

$$\beta = Dt/L^2$$

$$a = (\pi/2)^2$$

M, t anındaki nem içeriği

$M_c$ , Kritik nem içeriği

### $M_c$ , Denge nem içeriği

şeklinde tanımlanır. (1.2) eşitliği katının başlangıçta homojen bir nemliliğe sahip olduğu ve kurumanın her iki yüzeyden gerçekleştiği durumlar için geçerlidir. Tek bir yüzeyden kuruma gerçekleşmesi durumunda difüzyon yolu iki katı olarak alınmalı, diğer bir deyimle  $\beta'$  nın paydasına 4 ilave edilmelidir. Çok uzun kuruma zamanları için eşitlik (1.2) aşığıdaki şekle indirgenebilir [6];

$$\frac{M - M_e}{M_c - M_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-a\beta} \quad (1.3)$$

#### 1.2.3.2. Büzülme ve kabuklaşma

Koloidal gözeneksiz katılardan bağlı nemin uzaklaştırılmasıyla katı materyal büzülmeye başlar. Çok küçük partiküllerde bu etkinin önemsiz olmasına karşın kuruma olayı büyük partiküllerde büzülmenden dolayı büyük güçlüklerle sebep olur. Böyle katılarda dış yüzeyin iç kısımlardan önce nem kaybetmesinden dolayı dış tabakadaki sıvı konsantrasyonu iç kısımlardakinden daha düşük olur ve dış yüzey büzülür. Dış yüzey büzülmesi difüzyonun düşmesiyle kütle transferine karşı direncin artmasına, ürünün zedelenmesine ve kalitesinin düşmesine sebep olur.

Çok aşırı büzülme durumunda, büzülme ve difüzyondaki azalmanın birleşmesiyle katı dış yüzeyinde gözeneksiz bir tabaka oluşturarak katı içerisindeki sıvının transferi engellenmiş olur. Bu olaya kabuklaşma denir. Büzülme ve kabuklaşma kuruma hızının düşürülmesiyle minimuma indirgenebilir. Böylece katı bünyesinde düzenli bir konsantrasyon gradyenti sağlanmış olur. Ayrıca hava neminin kontrol altında tutulmasıyla da kabuk etkisi azaltılabilir. Katı-sıcak hava ara yüzeyindeki denge nemi havanın nemliliği ile sabit tutulacağından havanın nemliliğinin artması denge nemini de artırır. Böylece serbest nem miktarı denge neminin artmasıyla azalır ve toplam serbest nem gradyentinin düşmesiyle büzülme ve kabuklaşma önlenmiş olur [6].



### 1.2.3.3. Kapılar teori

Gözenekli katıların bünyesindeki sıvının hareket mekanizması (1.2) eşitliğiyle açıklanamaz. Bunun nedeni gözenekli katılarda sıvının katı bünyesinde homojen bir konsantrasyon gradyentine sahip olmasıdır. Şekil 1.3' de yassı bir gözenekli katıya ait nem dağılım eğrisi görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi katının merkezinden dışına doğru iki farklı nem dağılım eğrisi mevcuttur. Gözenekli katılarda katı bünyesindeki sıvı önce kapılar hareketle yüzeye ve buradan da gaz filmi içerisinde difüzyonla gaz fazına transfer olur [6].

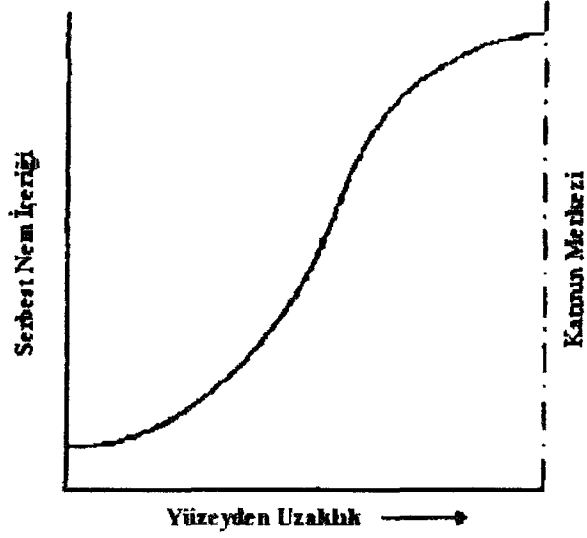
Gözenekli katılarda katı içerisindeki sıvının yüzeye hareketi, difüzyonla kütle transferinden ziyade kapılar hareketle meydana gelir. Kapılar teoriye göre katı madde değişik büyüklük ve şekillerde gözenek ve kanallara sahiptir. Bu durumda katı gözeneklerindeki sıvı kanallardan hareket ederek yüzeye ulaşır. Şekil 1.4' de gözenekli katılara ait tipik bir kurutma eğrisi görülmektedir. Bu tür katılar için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir [6].

$$t_f = \frac{p_s d \lambda (M_c - M_e)}{h_t (t - t_s)} \ln \frac{(M_c - M_e)}{(M - M_e)} \quad (1.4)$$

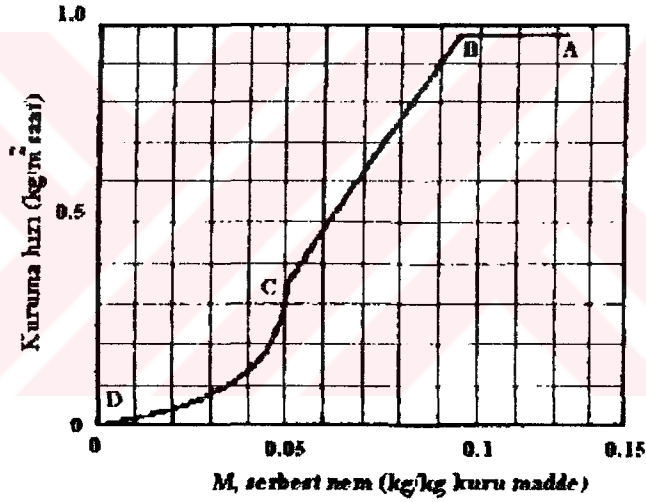
Burada;

$t_f$ , azalan hız periyodundaki kuruma zamanı,

$p_s$ , katının yoğunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 1.3. Gözenekli katılara ait tipik bir nem dağılımı grafiği [6]



Şekil 1.4. Gözenekli katılara ait tipik bir kuruma eğrisi [6]

#### 1.2.4. Kurutucular ve kurutma yöntemleri

Tarım ürünlerinin kurutulması sırasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmanın yanı sıra, kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayacak yetenekte olmak zorundadır. Bu nedenle, birbirinden önemli farklar gösteren çok çeşitli tiplerde kurutucular geliştirilmiştir. Tarım ürünlerinin kurutulması için, bu işleme gerek duyulan ilk günlerden günümüze kadar geçen süre içinde, güneş ışınlarının altına sermekten, dielektrik kurutma tekniklerine kadar geliştirilmiş bir çok

yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin tümünü sıralayabilmek mümkün değildir. Bazı çok uygulanan temel kurutma yöntemleri aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir;

*Kontakt kurutma:* Bu yöntemde, kurutma için gerekli ısı enerjisi, kurutulacak materyale, ısıtılmış yüzeylerden kondüksiyon yoluyla iletilir. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye değen yaş materyalin ısıl kondüktivitesine ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır.

*Konvektif kurutma:* Bu yöntemde ısı, kurutucu ortamdan (genellikle sıcak hava kullanılır) yaş materyale konveksiyon yoluyla iletilir. Sıcak hava, kurutulan ürün tabakasının üzerinden, ya da içinden geçirilir. Bu yöntemin ısıl iletkenliği kontakt kurutmaya göre daha düşüktür. Tünel kurutucular (tepsili kurutucular), akışkan yataklı kurutucular, püskürtmeli kurutucular bu yöntemin değişik uygulamalarıdır.

*Işınım ile kurutma:* Bu yöntemde kurutma için gerekli ısı enerjisi, yaş materyale, elektromanyetik tayfın kırmızı ötesi bölgesinde yer alan ışınlarla iletilir. Bu ışınlar içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz, kendilerini absorbe eden cisimleri ısıtırlar. Kıızılötesi ışınların, yaş materyalin yüzeyinden itibaren etkilediği derinlik oldukça az olduğundan, bu yöntem ince film şeklinde serili tabakaların kurutulmasında kullanılır.

*Di elektrik kurutma :* Kurutulacak madde yüksek frekanslı ( $2-100 \times 10^6$  Hz) bir elektrostatik alandan geçirilerek kurutulur. Bu maddenin her noktasında düzenli bir ısınma meydana getirir. Bu metot sadece kontrplak tabakalar arasındaki reçinenin polimerizasyonu ve bu suretle, tabakaların birbirine yapışmasını sağlar. Bu yönden de tam bir kurutma işlemi sayılmaz. Kurutma düşünülebilirse de çok pahalıdır [7].

*Donmalı kurutma:* Bu yöntemde donmuş suyun süblimasyonundan yararlanılır. Kurutulacak yaş materyal önce hızla  $-25, -30$  °C değerlerine kadar soğutularak dondurulur. Daha sonra, ürünündeki donmuş suyun serbest buhar basıncına göre biraz daha düşük değerlerdeki vakum ortamında, gerekli süblimasyon ısı verilir, donmuş suyun, sıvı fazı atlayarak, doğrudan buhar fazına geçmesi sağlanır. Yüksek kaliteli kurutulmuş ürün elde edebilen modern bir kurutma yöntemidir.

*Ozmotik kurutma:* Bu yöntemde, yarı geçirgen zarla kaplı olan bitki hücresi duvarının iç kısmı ile dış çevre arasında, ozmotik basınç farkı yaratılarak, materyalin nemi azaltılmaya çalışılır. Kurutulacak materyal ozmotik basıncı yüksek bir eriyiğin

içine bandırılarak nemin azalması sağlanır. Ürünün içine bandırılacağı ozmoaktif ortam, çeşitli sıcaklık ve konsantrasyonlarda olmak üzere genellikle, meyveler için şeker, sebzeler için tuz (NaCl) eriyiğinden hazırlanır.

Yukarıda özetlenen yöntemler içinde, günümüzde en yaygın kullanılanı, ürünlerin, hava akımı yardımıyla konvektif kurutulmasıdır. Son yıllarda, ürünlerin dondurularak kurutulması, alım gücü yüksek toplumlarda giderek daha yaygın kullanılmaya başlamıştır. Dielektrik kurutma teknikleri ise (kızılötesi ışınlar, mikrodalga ışınlar, radyo dalgaları vb ) henüz ticari açıdan söz edilebilecek boyutta bir uygulama alanı bulamamışlardır. Şekerli şurup içinde ozmotik basınç farkından yararlanılarak kurutma tekniği ise özellikle meyvelerin kurutulmasına uygun gibi görülmekle birlikte, istenen nem değerine inilememe, pahalılık gibi nedenlerle yaygınlaşmamışlardır.

Kurutucu tipinin seçimi sırasında, kurutulacak materyalin özellikleri, kurutmanın yapılacağı mevsim, kurutma süresi, iş gücü ve enerji gereksinimleri ile işletmede kurutucu için ayrılabilir yer dikkate alınmalıdır [4].

#### **1.2.4.1. Kurutucu seçimi**

Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi ve gerekse işletmenin karlılığı açılarından başarısı, uygun bir kurutucunun seçilip kullanılmasına doğrudan bağlıdır. Her türlü kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeniyle, ilk adım olarak, kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimine en üst düzeyde önem vermek gerekir.

Yapılmak istenen kurutma için uygun kurutucu seçimi, bir çok faktörün dikkate alınmasını gerektiren çok zor ve karmaşık bir işlemdir. Kurutulacak materyalin özellikleri, ısıtıcı tipi, enerji kaynağı, kurutma havası ile materyal arasındaki hidrodinamik ilişkiler özellikle ele alınmalıdır. Seçim sırasında teknolojik gereksinimler, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli kriterler olarak ele alınmalıdır.

Kurutucu seçiminde ilk hareket noktası materyal özelliklerinin belirlenmesiyle başlar. Kurutulacak materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri ve kurumuş

ürünlerden beklenen şekil ve dış görünüm özellikleri öncelikle belirlenmelidir. Materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri, sorpsiyon ve adsorpsiyon izotermi ile kritik nemi, denge nemi, kurutma sıcaklığı, kuruma hızı gibi parametrelerin belirlenmesi için bilinmesi gereken önemli unsurlardır. Kurutma yöntemleri ve kurutucular alternatifli olarak belirlendikten sonra kesin seçim için aşağıda sıralanan unsurlar dikkatle irdelenmelidir;

- a. Yıllık kurutulacak ürün miktarı,
- b. Tesisin kuruluş maliyeti,
- c. Tesisin işletme masrafları,
- d. İşlem sırasında materyalin verdiği fire,
- e. Emniyetli çalışma,
- f. Kurumuş ürünün kalitesinin uygunluğu,
- g. Kurumuş ürünün dış görünüşünün isteğe uygunluğu,
- h. Kurutucunun çeşitli kapasitelerde çalıştırılabilme esnekliği,
- i. Çevre kirliliğine etkisi olup olmadığı,
- j. Çalışma sırasında etkin kontrollerin yapılmasına olanak vermesi,
- k. Tamir ve bakım kolaylığı,
- l. Görünüş güzelliği.

### **1.3. Literatür Araştırması**

Tek tabaka kurutma işlemleri ile ilgili olarak literatürde bir çok çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte bu çalışmanın amacına ve önemine uygun olarak yapılan literatür araştırması üç kısımda ele alınmıştır;

- Tek tabaka kurutma üzerine yapılan çalışmalar,

- Tek tabaka kurutma işleminin matematik modellemesi üzerine yapılan çalışmalar,
- Tek tabaka kurutma işleminin termodinamik analizi üzerine yapılan çalışmalar.

### 1.3.1. Tek tabaka kurutma ile ilgili çalışmalar

Huizhen ve Morey (1984), kurutma havası sıcaklığının, hava akış hızının, başlangıç nem oranının ve relatif nemin etkilerini göz önüne alarak sarı mısır tanelerinin ince tabakada kuruma hızlarını tespit etmişlerdir. Kurutma havası sıcaklığının kuruma hızı üzerinde büyük bir etkiye, hava akışı ve relatif nemin ise daha küçük etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir [8].

Chiang ve Petersen (1985), kızartılmış Fransız Russet Burbank patateslerinin ince tabakada hava ile kurutulmasını araştırmak için bir kurutma sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde numunenin ağırlık kaybı, numune kurutma odasından çıkarılmaksızın sürekli olarak kaydedilmektedir. Yapılan çalışmada 0.79-1.77 m/s hava hızı, %10-%60 relatif nem, 43-93 °C kuru termometre sıcaklığı aralığında kurutma şartlarını araştırmışlardır. Ayrıca kuruma eğrilerini logaritmik bir modelle tanımlayarak, kuruma hızına etki eden faktörleri tartışmışlardır. Yüksek relatif nemde başka faktörlerde kuruma hızını etkilemesine rağmen, düşük relatif nem de kuru termometre sıcaklığının kuruma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve hava hızı kuruma hızı üzerinde küçük bir etkiye sahipken relatif nemin kuruma hızını önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir [9].

Shepherd ve Bhardwaj (1988), bezelyenin tek tabakada kuruma verilerini tespit etmek için laboratuvar tipi bir kurutucu geliştirmişlerdir. Böylelikle, değişken sıcaklık ve nem şartlarında bezelyenin ince tabakada kuruma karakteristiklerini tespit etmişlerdir [10].

Chen ve Pei (1989), higroskopik ve higroskopik olmayan maddelerin kuruma davranışını tahmin etmek için bir kurutma modeli önermişlerdir. Bu modelin geçerliliğini tespit etmek için farklı higroskopik özellikli üç maddeye (yün, tuğla ve mısır tanesi) bu modeli uygulamışlardır. Hesaplanan kuruma eğrileri,

sıcaklık ve nem dağılımlarını literatürde bildirilen deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır [11].

Dinçer (1992), küresel şekilli ürünlerin merkez, merkez ile yüzey arasındaki orta nokta ve yüzey kısımları için deneysel ve teorik boyutsuz sıcaklık dağılımlarını çıkarmıştır. Elde edilen deneysel ve teorik boyutsuz sıcaklık dağılımları arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmiştir [12].

Ayvaz (1992), tarımsal ürünlerin kurutulması amacıyla güneş enerjisinden yararlanan zorlanmış taşınımlı hava ısıtıcı kollektörlü endüstriyel kabinet tipi bir kurutucunun tasarımı ve imalatını yapmıştır. Deneysel tarımsal ürün olarak, halka haline getirilmiş elmalar değişik çalışma koşullarında kurutulmuştur. Ayrıca aynı ışınım şartlarında ve eşzamanlı olarak açık havada kurutulan ürünün kuruma zamanı, kuruma hızı ve ürün kalitesi açısından karşılaştırılmasını yapmıştır [13].

Miketinac ve arkadaşları (1992), bir tabaka arpanın kurutulmasında aynı anda meydana gelen ısı ve kütle transferi işlemini simüle eden beş modeli formüle etmişlerdir. Sınırdaki konvektif ısı ve kütle transfer şartları ile ısı ve kütle transferinin bütün modellerini incelemişlerdir [14].

Şahbaz ve Kayhan (1994), haşlanmış patates örneklerini 20 cm çapında, 2 m uzunluğundaki yarı kesikli tünel tipi bir kurutucuda farklı hava sıcaklık (40, 50, 60 ve 70 °C) ve akış hızlarında (1.5, 2 ve 2.4 m/s) kurutarak, sıcaklık ve akış hızının kuruma hızına etkisini incelemişlerdir. Tüm deneylerde patatesin azalan hız periyodunda kurduğunu belirleyerek, kuruma sırasındaki nem aktarımını Fick difüzyon mekanizmasıyla açıklamışlardır. Kuruma eğrilerinin doğrusal bölümünü lineer regresyon ile değerlendirerek farklı hava sıcaklığı ve hızlarında difüzyon katsayılarını hesaplamışlardır [15].

Tırıs ve arkadaşları (1994), iki ayrı tip güneşli kurutucuda ve açık sergide, çeşitli tarımsal ürünleri (sivri biber, fasulye, bamya, şeftali) aynı anda kurutarak bu ürünlerin kuruma eğrilerini karşılaştırmışlardır [16].

Üretir (1995), bilgisayar kontrollü tünel kurutucuda elmanın kuruma hızını, 1.7-3.0 m/s hava hızı, 78-94 °C hava sıcaklığı ve 0.6-1.8 cm parçacık kalınlığı

aralığında ölçmüştür. Kurutma deneylerinde sabit sıcaklık ve lineer olarak azalan sıcaklık kullanarak, modelleme yapmıştır [17].

Pal ve Chakraverty (1997), mantarın konveksiyonlu kurutma işlemini tek tabakada incelemiştir. Çeşitli kurutma havası sıcaklığı ve kurutma hızlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda mantarın kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır [18].

Göğüş ve Maskan (1998), 70 °C sıcaklıkta ve 1.6 m/s hızında çalışan tepsili bir kurutucuda patates dilimlerindeki kuruma verilerini tespit etmişlerdir. Patates numunelerini 24x24x20 mm dilim şeklinde kesip, anti-esmerleşme solüsyonuna batırılmışlar ve kurutma olayına numunenin nem oranı %10 'a ulaşıncaya kadar devam etmişlerdir [19].

Simal ve arkadaşları (1998), patates küplerinin sıcak hava ile kuruması esnasında ısı ve kütle transferini tanımlayan bir model hazırlamışlardır. Kurutma deneylerinde hava sıcaklık oranını 30-90 °C ve küp boyutlarını 8-15 mm aralığında seçmiş ve modelde istenilen hesaplamaları da bunlara göre yapmışlardır [20].

Akbaba (1998), laboratuvar tipi bir kurutucuda kabağın kuruma karakteristiğini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada kabağın dış kabuklarını soyup, çekirdeklerini çıkarmış 4x25x60 mm boyutlarında kurutmuştur. Deneyleri 38-60 °C arasındaki hava sıcaklığında, 4 m/s hava hızında yaparak hava sıcaklığının kuruma hızı üzerindeki etkisini incelemiştir [21].

Sarsavadia ve arkadaşları (1999), salamura yapılmış soğan dilimlerinin tek tabaka kurutma davranışlarını incelemek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Soğanın ince tabakada kurumasını tespit etmek için dijital tartım mekanizmalı yığın tipi bir deneysel kurutucu geliştirmişlerdir. Tuzlanmış soğan dilimlerinin ince tabakada kuruma hızlarını dört değişik hava hızında (0.25-1 m/s), dört değişik kurutma havası sıcaklığında (50-80 °C) ve üç değişik havanın relatif neminde (% 10-20) tespit etmişlerdir [22].

Balladin ve Headley (1999), taç yapraklı gülün güneş enerjili kurutmasını incelemiştir. Gül yaprakları 16 saat boyunca kurutularak denge nemi



belirlenmiştir. Kurutma deneyleri sonunda yaprakların nem oranları belirlenerek, kuruma karakteristikleri incelenmiştir [23].

Temple ve Boxtel (1999), siyah çayın ince tabakada kurutma kinetiklerini incelemiştir. Kuruma hızının, sıcaklık ve kurutma havası ile lineer bir fonksiyon gösterdiğini belirlemiştir [24].

Midilli ve arkadaşları (1999), mantar ve polenin kuruma periyotlarını araştırmışlardır. Mantar kurutma deneylerini hem laboratuvar tip bir kurutucuda hem de atmosferik şartlarda güneşte ve gölgede yapmışlardır. Polen ise laboratuvar şartlarında ve güneşte kurutmuşlardır. Deneylerde ürünlerin kuruma eğrilerini, bu eğrilerin denklemlerini, kütle değişim oranlarını ve ortalama deneysel belirsizlik oranını tespit etmişlerdir. Mantarların 50 °C sıcak hava kullanılarak laboratuvar tip bir kurutucuda 5-6 saatlik bir kuruma periyodunda kurutulabileceği, kurutulan ürünlerin ise vakum altında korunması gerektiği belirlenmiştir. Polenin ise 40-45 °C lik bir sıcaklıkta 2.5-3 saat gibi bir kuruma periyodunda renk, lezzet, koku ve yapı değişikliği olmaksızın kuruduğu tespit edilmiştir [25].

Mengeş ve Aydın (2000), laboratuvar tipi bir kurutucu kullanarak farklı kurutma havası sıcaklıkları, hızları ve kurutma öncesi uygulanan ön işlemlerin Stanley çeşidi eriklerin kuruması üzerine olan etkileri belirlemeye çalışmışlardır. Deneylerde, hava sıcaklığını 60, 70, ve 80 °C, hava hızını 1, 2 ve 3 m/s seçmişlerdir. Erik örneklerini kurutma öncesinde hiçbir ön işlem uygulanmadan ve %2 sodyum hidroksit (NaOH) içeren çözeltiliye bandırıldıktan sonra kurutmuşlardır. Denemeler sonucunda hava sıcaklığının, hava hızının ve uygulanan ön işlemin kuruma hızı üzerindeki etkilerini tespit etmişlerdir [26].

Sarsılmaz ve arkadaşları (2000), güneş enerjisi destekli döner sütunlu silindirik bir kurutucu geliştirerek farklı büyüklük ve kalitedeki kayısı materyalinin optimum kurutucu hava hızı ve kurutucu devri ile homojen bir şekilde kurumasını sağlamışlardır [27].

Can (2000), kabak çekirdeğinin kurumasını hem çevre şartlarında hem de güneş enerjili bir kurutucuda incelemiştir. Kabak çekirdeklerini ince sergide doğal ve zorlanmış taşınım altında kurutmuştur. Kabak çekirdeğinin kuruma kinetiğini etkileyen ve kuruma hızını artıran en önemli parametrenin kurutma havası sıcaklığı

olduğunu, kurutma havası hızının ise nem transferi üzerinde ikinci bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir [28].

Yaldız ve Ertekin (2000), Antalya koşullarında kabak, sivri biber, patlıcan, dolma biber, taze fasulye ve soğanın güneş enerjili hava ısıtıcıları ve kurutma odalarından oluşan güneş enerjili kurutucular yardımıyla kurutulmaları ve kuruma parametrelerini incelemiştir. Ayrıca kuruma süresine kurutma havası hızının etkisini araştırmışlardır [29].

Midilli ve arkadaşları (2000), polenin kuruma ve saklama koşulları üzerine bir çalışma yapmışlardır [30].

Yaldız ve Ertekin (2001) de yaptıkları çalışmada güneş enerjili kabinet tip bir kurutucuda bal kabağı, yeşil biber, yeşil fasulye ve soğanın ince sergide kurutulmasını incelemiştir. Karşılaştırma yapabilmek için ürünleri güneşli ortamda da kurutmuşlardır. Deneylerde üç farklı hava hızı kullanarak, hızın kuruma süresi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hızın kuruma süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, güneş enerjili kabinet tipli kurutucuda kurutma süresinin 30.29-90.43 saat arasında, güneşte kurutma da ise 48.59-121.81 saat arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca kurutma eğrilerini ince sergideki kurutma modelleriyle açıklamaya çalışmışlar, kurutulan her ürün için en uygun modeli tespit etmişlerdir [31].

Midilli (2001), kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerini hem güneş enerjili bir kurutucuda hem de açıkta güneşte kurularak bu ürünün kuruma şartlarını ve davranışını tespit etmiştir. Fıstığın kuruma eğrisi denklemini en küçük kareler metoduyla belirlemiştir. Kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerinin güneş enerjili kurutucuda  $50 \pm 10$  °C ' de altı saatte kurduğunu tespit etmiştir. Açıkta kurutma da ise kuruma süresinin çok uzadığını, çevre ve iklim şartlarının olumsuz etkileri olduğunu aynı zamanda kurutulan ürünlerin hijyenik açıdan güven verici olmadığını ifade etmiştir [32].

Toğrul (2001), konik toplayıcı bir güneş enerjili sistemden elde ettiği sıcak hava ile kayısı kurutmuş ve ayrıca laboratuvar şartlarında tünel bir kurutucuda yaptığı kurutmada kayısının kuruma kinetiğini incelemiştir [33].

El- Sebair ve arkadaşları (2002), doğal taşınımli güneş enerjili kurutucu ile ilgili deneysel araştırma yapmışlardır [34].

Bala ve arkadaşları (2003), ananasın güneş enerjili kurutma işlemini tünel tip bir kurutucuda gerçekleştirmişlerdir [35].

Cao, Nishiyama ve Koide (2003), mantarın ince tabakada kurutulması ile ilgili araştırma yapmışlardır. Kuruma karakteristiklerini inceleyerek yüzeysel kütle transfer katsayısını, denge nem içeriğini ve kuruma sabitini belirlemişlerdir [36].

Doymaz ve Pala (2003), mısırın tek tabaka kuruma karakteristiklerini incelemişlerdir [37].

Toure ve Nkembo (2004), muz, mango vb. meyvelerin güneş enerjili doğal kurutma işlemlerini karşılaştırmışlardır. Araştırma sonucunda ürünlerin kuruma karakteristiklerini incelemişlerdir [38].

Karim ve Hawlader (2004), kurutma uygulamaları için güneş kollektörlerinin geliştirilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Çeşitli tiplerde güneş enerjisi kollektörlerinin deneysel olarak verimlerini inceleyerek güneş enerjili kurutma işlemi için en uygun kollektör tipini belirlemeye çalışmışlardır [39].

Tinoumi, Mihoubi ve Zagrouba (2004), güneş enerjili kurutma işlemi için simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Kurutma sisteminden çıkan hava hızı ve sıcaklığı ölçülerek güneş enerjili kurutma sisteminin ısı ve kütle transferi eşitliklerini simülasyon tekniği ile elde etmişlerdir [40].

Erentürk ve arkadaşları (2004), gülün kuruma karakteristiğini incelemişlerdir. Kuruma hızı, kuruma sıcaklığı, kurutma havasının nemini belirlemişler ve kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır [41].

Resio ve arkadaşları (2004), tahılların kuruma karakteristiklerini incelemişlerdir [42].

Lahsani ve arkadaşları (2004), armudun kuruma kinetiğini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde armudun güneş enerjili kurutma esnasındaki kurutma havasının, kuruma kinetiğine etkisini belirlemişlerdir [43].

Mohapatra ve arkadaşları (2005), buğdayın tek tabaka kurutma işleminin karakteristiklerini incelemişlerdir [44].

Mohamed ve arkadaşları (2005), tek tabaka halinde güneş enerjili zorlanmış taşınım altında kurutulan turunçgilleri incelemişlerdir. Karakteristik kuruma eğrilerini belirlemişler ve kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır [45].

### **1.3.2. Tek tabaka kurutma işleminin matematik modellemesi üzerine yapılan çalışmalar**

Diamante ve Munro (1991), geliştirdikleri laboratuvar tip bir kurutucuda tatlı patates dilimlerinin ince tabakada kurutulmasında, havanın kuru termometre sıcaklığının, relatif neminin, hava hızı ve numune kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Kuruma hızı eğrilerinin yaklaşık olarak lineer iki azalan hız periyodunda meydana geldiğini ve hiç sabit hız periyodu içermediğini ifade etmişlerdir. Birkaç matematiksel modeli kurutma şartları aralığındaki tatlı patates dilimlerinin kuruma hızlarına uyarlayarak, % 10 nem oranı (kuru esas) ile aşağısındaki tatlı patates dilimlerinin ince tabakada hava ile kurutulmasını en iyi Geliştirilmiş Page denkleminin tanımladığını göstermişlerdir [46].

Rossello ve arkadaşları (1992), patates küplerinin sıcak hava ile kuruma kinetiklerini tanımlamak için basit bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Kurutulan 1 cm' lik patates küpleri üzerinde hava akışının ve hava sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Hesaplanan ve deneysel olarak bulunan ortalama nem oranının uyum içerisinde olduğunu görmüşlerdir [47].

Rattı ve Mujumdar (1997), yiyeceklerin güneş enerjili kurutmasının modellemesi ve nümerik simülasyonu üzerine araştırma yapmışlardır [48].

Zhang ve arkadaşları (1999), gözenekli malzemelerin kurutulması sırasında sabit hız ve azalan hız periyotları esnasındaki ısı ve kütle transferini tanımlamak için bir matematiksel model geliştirmişlerdir [49].

Özdemir ve Devres (1999), fındığın 100-160 °C sıcaklık aralığında ince sergide kuruma karakteristiğini yarı teorik ve ampirik kurutma modelleri ile açıklamaya çalışmışlardır [50].

Yaldız ve Ertekin (2001), sultani çekirdeksiz üzümünü ince tabaka halinde güneş enerjili kurutucular ile kurutulmasını modellemişlerdir. Kurutma havası güneş enerjili hava ısıtıcı yardımıyla ısıtılmış ve kurutma odasında bulunan rafın üzerindeki ürünün içinden geçirilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemine kurutma havası hızının etkisini belirlemek amacıyla üç farklı hava hızı (0.5, 1, 1.5m/s) kullanmışlardır [51].

Basunia ve Abe (2001), doğal taşınım altında güneş enerjili tek tabaka kurutma işlemi ile kurutulan pirinçlerle ilgili deney yapmışlardır. Kurutma işlemini en iyi tanımlayan matematik modeli belirlemişlerdir [52].

Midilli (2001), kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerini hem güneş enerjili bir kurutucuda hem de açıkta güneşte kurutarak bu ürünün kuruma şartlarını ve davranışını tespit etmişlerdir. Fıstığın kuruma eğrisi denklemini en küçük kareler metoduyla elde etmişlerdir. Kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerinin güneş enerjili konvansiyonel kurutucuda  $50 \pm 10$  °C ' de altı saatte kurduğunu tespit etmişlerdir [32].

Yaldız ve Ertekin (2001), yaptıkları diğer çalışmalarda laboratuvar tipi bir kurutucuda havuç, pırasa ve patlıcanın kuruma karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Kuruma süresinin belirli bir anında ürünün nem içeriğinin saptanması için literatürde bulunan mevcut kuruma modellerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu ürünleri 30, 40, 50, 60, 70 °C kurutma havası sıcaklıklarında ve 0.5, 1, 1.5 m/s kurutma havası hızlarında kurutarak kurutma sürelerini belirlemişlerdir. Deney sonuçlarından elde ettikleri kurutma eğrilerini mevcut matematiksel modelleri uygulayıp en uygun modeli seçmişlerdir. Ayrıca patlıcan kurutma için yapılan çalışmada kuruma olayını en iyi açıklayan modelde bulunan katsayılar, kurutma havası sıcaklığı ve hızındaki değişimin etkilerini çoklu regresyon yöntemiyle incelemişlerdir [31], [51].

Panchariya ve arkadaşları (2002), siyah çayın kurutma prosesini tek tabaka kurutma işlemi için literatürde verilen matematik modellerini kullanarak modellemeye çalışmışlardır [53].

Midilli ve arkadaşları (2002), literatürde bulunan tek tabaka kurutma modellerinden farklı olarak tek tabaka kurutma işlemi için yeni bir model literatüre kazandırmışlardır [54].

Akpınar ve arkadaşları (2002), kırmızı biber dilimlerinin ince tabaka kuruma davranışlarını inceleyerek en uygun matematiksel modeli belirlemek için literatürdeki tek tabaka kurutma modellerini test etmişlerdir [55].

Akpınar ve arkadaşları (2003), elma dilimlerinin kurutma işleminin matematiksel modellemesini yapabilmek için siklon tipi bir kurutucuda deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [56].

Akpınar ve arkadaşları (2003), patates dilimlerinin tek tabaka kuruma davranışlarını incelemişlerdir. Siklon tipi kurutucuda gerçekleştirilen deneyler sonucunda patates dilimlerinin kuruma davranışını modellemek için en uygun matematiksel modeli belirlemişlerdir [57].

Midilli ve Küçük (2003), fıstığın tek tabaka halinde kurutma işlemini güneş enerjisi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İnceleme sonucunda fıstığın tek tabaka kurutma işlemini en iyi tanımlayan matematiksel modeli belirlemişlerdir [58].

Bahnasawy ve Shenana (2004), mayalı mandıra ürünlerinin direkt güneş altında ve güneş enerjili kurutma düzeneğinde kurutulmasıyla ilgili bir model geliştirmişlerdir [59].

Toğrul ve Pehlivan (2004), meyvelerin doğal şartlar altında kuruma davranışlarını belirlemek için açık hava kurutma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kurutulan çeşitli ürünler için literatürde verilen matematiksel modelleri test etmişlerdir [60].

Akgün ve Doymaz (2005), zeytinin tek tabaka halinde kurutma işlemini modellemişlerdir. Literatürde verilen matematiksel modelleri deneyerek kurutma işlemini en iyi temsil eden modeli belirlemişlerdir [61].

Sacilik ve arkadaşları (2005), organik domatesler üzerine güneş enerjili kurutma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Literatürdeki matematiksel modelleri deneysel kuruma eğrileriyle karşılaştırmışlardır [62].

Günhan ve arkadaşları (2005), defne yapraklarının kurutma işleminin matematiksel modellemesini yapmışlardır. Literatürde verilen matematik modelleri test etmişlerdir [63].

Akpınar (2005), bazı sebze ve meyveler için uygun kuruma eğrilerini belirlemek için siklon tipi bir kurutucuda deneyler gerçekleştirmiştir. Lineer olmayan regresyon analizini uygulayarak kurutma işlemini en iyi tanımlayan modeli belirlemiştir [64].

Doymaz (2005), taze fasulyenin kuruma davranışını incelemiştir. Kurutma işlemini en iyi tanımlayan matematik modeli belirlemiştir [65].

Doymaz (2005), bamyanın kuruma karakteristiklerini ve kuruma kinetiğini incelemiş ve ayrıca, matematik modellemesini yapmıştır [66].

### **1.3.3. Tek tabaka kurutma işleminin termodinamik analizi üzerine yapılan çalışmalar**

Dinçer (2002), kurutma sistemlerinin enerji, ekserji ve çevresel açıdan incelemesini yapmıştır [67].

Midilli ve Küçük (2003), fıstığın güneş enerjili kurutma prosesinin enerji ve ekserji analizi üzerine termodinamik bir model geliştirmişlerdir [68].

Dinçer ve Şahin (2004), kurutma işleminin termodinamik analizi için yeni bir model geliştirmişlerdir [69].

Akpınar ve arkadaşları (2005), tek tabaka elma kurutma işleminin termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarına göre enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Siklon tip kurutucuda gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre enerji kullanım oranı ve ekserji kaybı üzerine inceleme yapmışlardır [70].

Akpınar ve arkadaşları (2005), siklon tip kurutucuda kurutulan patateslerin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Termodinamiğin birinci kanununu kullanarak enerji analizini, ikinci kanunu kullanarak ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir [71].





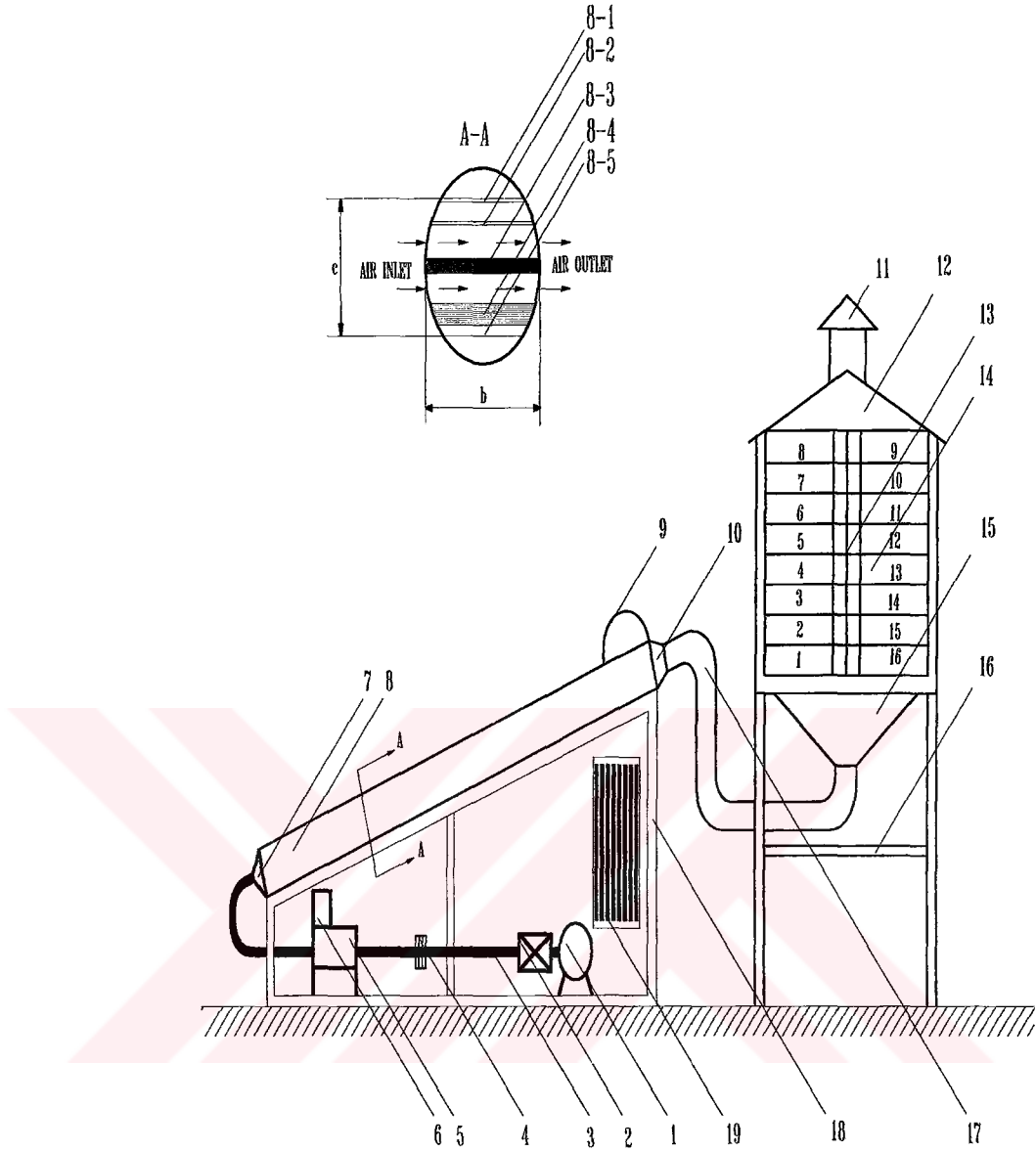
## BÖLÜM 2

### YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 2.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Şartları

Polen kurutma işleminin matematiksel modellemesini ve termodinamik analizini yapabilmek için kullanılan deneysel veriler güneş enerjili destekli bir kurutucu yardımı ile elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan güneş enerjili kurutma sistemi ve şartları aşağıda kısaca ifade edilmiştir.

Güneş enerjili polen kurutma işlemi için tasarlanan deney düzeneği literatürde detaylı olarak sunulmuştur [30], [32], [58], [68]. Genel olarak Şekil 2.1 'de görülen deney düzeneği bir kurutma odası, güneş kolektörü, yardımcı ısıtıcı ve fan dan oluşmaktadır. Kurutma odasının hacmi  $55 \times 92 \times 117 \text{ cm}^3$  olup 16 adet rafa sahiptir. Bu raflar kafes telinden yapılmıştır.  $4.5 \text{ m}^2$  lik alana sahip olan güneş kolektörü kurutma dolabına bir boruyla bağlanmıştır.  $0.37 \text{ kW}$  gücünde bir fan kolektör girişine yerleştirilmiştir. Ayrıca güneş enerjisinin düşük olduğu zamanlarda sistemde dolaşan kurutma havasını ısıtmak için bir elektrik fırını kullanılmıştır.



**Şekil 2.1.** Güneş enerjili kurutma kabini (1. Fan, 2. Valf, 3. Bağlantı borusu, 4. Orifis, 5. Yardımcı ısıtıcı, 6. Isı kontrolörü, 7. Güneşli hava kollektörü girişi, 8. Güneşli hava kollektörü, 8-1. Cam kapak, 8-2. Cam kapak, 8-3. Emici plaka, 8-4. Yalıtım, 8-5. Tahta kapak, 9. Piranometer, 10. Güneşli hava kollektörü çıkışı, 11. Baca, 12. Kurutucu kabin çıkışı, 13. Ara bölme, 14. Raflar, 15. Kurutucu kabin girişi, 16. Kurutucu kabin desteği, 17. Esnek bağlantı borusu, 18. Güneşli hava kollektörü desteği, 19. Manometre) [68]

Bu deney düzeneğinin çalışma prensibi literatürde detaylı olarak sunulmuştur [30], [32], [58], [68].

Deneysel Trabzon'da yapılmış ve atmosfer havası sıcaklığı 21-32 °C aralığında ölçülmüştür. Havanın nem oranı yaklaşık %63 'tür. Güneş radyasyonunun ise 500-600 W/m<sup>2</sup> arasında değiştiği ölçülmüştür. Sistemde dolaşan kurutma havası hızı 1.62 m/s dir. Kurutma işleminden önce polen örneklerinin nem oranı %26 olarak belirlenmiştir.

## 2.2. Matematik Modelleme

Matematiksel modellemenin amacı deneysel yolla elde edilen verilerin literatüre uygunluğunun belirlenmesidir. Yapılacak olan tez çalışmasında azalan hızla kuruma işlemleri gerçekleştiğinden matematiksel modelleme için azalan hızla kuruma evresi için geliştirilmiş yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri kullanılacaktır.

### 2.2.1. Nemlilik ölçüsü

Tarım ürünlerinde bulunan nem miktarları, bünyede tutulmuş bulunan su ağırlığı olarak ele alınır. Su miktarı, % olarak oransal biçimde tanımlanır. Nem miktarının belirlenmesinde "Yaş baz" (y.b.), "Kuru baz" (k.b.) olmak üzere iki tanımdan biri kullanılmaktadır [72].

Yaş baza göre nem, ürünlerdeki su ağırlığının ürünün tüm ağırlığına oranı olarak tanımlanır.

$$\%M_{y.b} = \frac{W_s}{W_s + W_k} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Kuru baza göre nem ise, ürünlerdeki su ağırlığının ürünün kuru ağırlığına oranıdır.

$$\%M_{k.b} = \frac{W_s}{W_k} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Bu eşitliklerde;

$W_s$  : Su ağırlığı (gr)

$W_k$  : Ürünün kuru ağırlığı (gr)

$\%M_{y,b}$  : Yaş baza göre nem oranı (%)

$\%M_{k,b}$  : Kuru baza göre nem oranı (%)

dır. Kuru ve yaş baza göre saptanan nem oranları aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla birbirine çevrilebilir.

$$\%M_{k,b} = \frac{M_{y,b}}{100 - M_{y,b}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Yaş baza göre saptanan nem miktarı genel olarak ürün alım satımlarında, kuru baza göre saptanan değerler ise kurutma çalışmalarında kullanılmaktadır.

Kurutma sırasında ürün nem kaybedeceğinden ağırlığı azalacaktır. Nem kaybı nedeniyle oluşacak ağırlık azalması aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir [4].

Ürünün ilk ağırlığı biliniyorsa,

$$W = W_1 \cdot \frac{M_1 - M_2}{100 - M_2} \quad (2.4)$$

Ürünün son ağırlığı biliniyorsa,

$$W = W_2 \cdot \frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Bu eşitliklerde,

$W$  : Ağırlık kaybı (gr)

$W_1$  : İlk ağırlık (gr)

$W_2$  : Son ağırlık (gr)

$M_1$  : Kurutmadan önceki nem (y.b) (%)

$M_2$  : Kurutmadan sonraki nem (y.b) (%)

olarak verilir.

### **2.2.2. Denge nem içeriği**

Ürün kurutma işlemlerinde, denge nem içeriğinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ürünün denge nemi, o andaki çevre koşullarında ürünün bünyesinde bulundurabileceği sınır nem miktarını belirtmede kullanılmaktadır. Denge nemi, çevre havasının nem ve sıcaklık koşullarıyla olduğu kadar, ürünün tür, cins ve olgunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir [3].

Her bir ürünün, belirli sıcaklık ve nem içeriğinde, kendine özgü bir su buharı basıncı vardır. Ürün nemli hava ile karşılaştığında ya nem kazanmakta, ya da nem kaybetmektedir. Bu durumu saptamak için ürünün farklı nem içeriği ve sıcaklık düzeylerinde buhar basıncının bilinmesi gerekmektedir. Eğer ürün neminin buhar basıncı, içinde bulunduğu havanın buhar basıncından fazla ise ortama nem verecek, az ise ortamdan nem alacaktır. Ortamın koşulları değişmedikçe ürün nem içeriğinde bir değişme olmaz [3]. Ürün, içinde bulunduğu ortam ile arasında nem açısından bir dengenin oluşması durumunda bünyesindeki nemi Denge Nemi, o anda havanın içerdiği bağlı nem değerine de Denge Bağlı Nemi denilmektedir [3]. Denge nemi içeriğindeki değişmeler şunlardan kaynaklanmaktadır; ürün çeşidi, ürün olgunluğu, bağlı nemi ölçme teknikleri ve denge nem içeriği saptama yöntemleridir [3].

### **2.2.3. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilen teorik-yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri**

Luikov ve arkadaşları, herhangi bir materyalde suyun iletimi ve buharlaşarak ayrılmasını kontrol eden unsurları dikkate alarak kılcal borulu yapıya sahip, gözenekli materyaller için azalan hızla kuruma evresi için teorik bir model geliştirmişlerdir.

Bu matematiksel model üç kısmi diferansiyel denklem takımından oluşmaktadır [3].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \quad (2.6a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \quad (2.6b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P \quad (2.6c)$$

Yukarıdaki (2.6,a,b,c) eşitliklerinde yer alan M nemi, T sıcaklığı, P basıncı, t zamanı ve K ürün ve çevre ile ilgili doğal katsayıları belirtmektedir. Günümüzde, bu katsayıların tarım ürünleriyle ilgili olanlarının pek azı belirlenebilmiştir. Bu nedenle, yukarıdaki denklem takımlarını kullanılabilir duruma getirebilmek amacıyla bazı terimlerden vazgeçilip, sadeleştirmeler yapılır. Örneğin, toplam basınç farkı nedeniyle oluşacak nem iletimi, tarım ürünlerinin kurutulması sırasında söz konusu dahi olmayacak derecede yüksek sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek büyüklüğe geleceğinden, denklem takımlarındaki basınç terimi ihmal edilir [3]. İkinci bir sadeleştirme, sıcaklık konsantrasyonu farkından ötürü meydana gelen nem iletiminin ihmal edilmesiyle yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, nem konsantrasyon farkına bağlı olarak meydana gelen nem iletimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık farkına bağlı iletim, dikkate alınmayabilecek ölçülerdedir [3].

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M \quad (2.7)$$

(2.7) numaralı eşitlikte "K" katsayısı yerine, difüzyon katsayısı "D" kullanılabilir. Bu durumda elde edilen denklem D nin sabit değeri için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \cdot \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.8)$$

Kartezyen koordinatlar da c=0, silindir koordinatlar da c=1, küresel koordinatlar da c=2 değerlerini almaktadır. (2.8) eşitliğinin değişik şekilli katı cisimler

için çözümü yapılarak kurutma denklemi olarak kullanılabilir. (2.8) denklemi aşağıdaki başlangıç ve sınır şartları kullanılarak çözülebilir.

$$M(r,0) = M_0 \quad (2.9)$$

$$M(r_0,t) = M_e \quad (2.10)$$

(2.8) numaralı eşitliğin sonsuz yassı levha cisimlerin, herhangi bir "t" anındaki ortalama nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan analitik çözümü aşağıda verilmektedir [73]. Bu çözümde, difüzyon katsayısının sabit olduğu, katıyı çevreleyen ortamda kütle transferine karşı direnç olmadığı katı ve çözünen arasında kimyasal bir reaksiyon olmadığı kabulleri yapılmaktadır.

Sonsuz yassı levha için bir boyutlu durum [73],

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - (2n+1)^2 \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{Dt}{L^2} \right] \quad (2.11)$$

şeklindedir. Burada,

D, tüm azalan kuruma dönemine ait su buharının havaya difüzyon katsayısı (kg/m<sup>2</sup>.h)

L, Kurutulan ürün kalınlığının yarısı (m)

M<sub>e</sub>, Kurutulan ürünün denge bağıl nemi (ERH)

M<sub>0</sub>, Ürünün başlangıçtaki nem oranı (kg<sub>su</sub>/kg<sub>kurumadde</sub>)

olarak verilmektedir. (2.11) eşitliğinde serinin yalnızca ilk teriminin dikkate alınmasıyla yapılan çözümde hata %5' i geçmez. Bu hata tarım ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili işlemler için kabul edilebilir olduğundan seri açılımının ilk terimi

alınıp ayrıca  $\left[ \pi^2 \frac{D}{4L^2} \right]$  yerine k yazılarak yassı düz levhalarda bir boyuttaki durum

için aşağıda belirtilen eşitlikler elde edilir [5], [73].

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (2.12)$$

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

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{8(M_0 - M_e)}{\pi^2(M - M_e)} \quad (2.13)$$

Eğer yassı düz levha için  $\ln \frac{8(M_0 - M_e)}{\pi^2(M - M_e)}$  ifadesine karşı zaman grafiği çizilirse bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden D difüzyon katsayısı hesaplanır [5], [19], [73], [74].

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

Azalan hızla kuruma evresi sırasında materyalin içinde oluşan nem iletimi, Newton' un soğumasıyla ilgili yasasına benzetilerek açıklanmaya çalışılır. Söz konusu yasa, cisim ile çevre arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmaması şartıyla, sıcaklığı değişmez kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişim miktarının, cisim ve çevre sıcaklıkları arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir. Bu yasa matematik olarak aşağıdaki eşitliklerle gösterilebilir [3];

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_e) \quad (2.14)$$

Nem içeriği değişmez kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir materyalin neminde meydana gelen değişim, (2.12) denkleminin analoguyla aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (2.15)$$

veya



$$\frac{dM}{(M - M_e)} = -kdt \quad (2.16)$$

Denklem (2.14)' deki diferansiyel eşitliğin çözümü aşağıdaki şekildedir,

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (2.17)$$

(2.14) numaralı eşitlikte yer alan "k" kuruma sabiti olarak adlandırılır. Birimi  $h^{-1}$  veya  $s^{-1}$  dir. Kuruma sabiti kurutulacak ürün ve kurutma şartlarına göre deneysel verilerden yararlanılarak belirlenir. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulan (2.14) numaralı eşitlik Newton modeli olarak tanımlanır. (2.14) denklemi yardımıyla hesaplanan sonuçlar, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elde edilen değerlerin azalan hız evresinin birinci bölümüyle iyi bir uyum gösterdiği, ancak ikinci bölümde bazı sapmaların ortaya çıktığı görülür [3]. Bu nedenle, kuruma eğrilerini açıklamak için bazı araştırmacılar tarafından yarı teorik ve ampirik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller Çizelge 2.1' de sunulmuştur.

**Çizelge 2.1.** Tek tabaka kurutma işlemi için geliştirilen ampirik modeller [69]

Model adı	Model Parametreleri	Matematiksel Model
Newton	$MR = f(k, t)$	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = f(k, n, t)$	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = f(k, n, t)$	$MR = \exp(-(kt)^n)$
Henderson and Pabis	$MR = f(a, k, t)$	$MR = a \exp(-kt)$
Logaritmik	$MR = f(a, c, k, t)$	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two Term	$MR = f(a, b, k_0, k_1, t)$	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Two Term Exponential	$MR = f(a, k, t)$	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
Wang and Singh	$MR = f(a, b, t)$	$MR = 1 + at + bt^2$
Diffusion Approximation	$MR = f(a, b, k, t)$	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Verma et al.	$MR = f(a, g, k, t)$	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
Modified Henderson and Pabis	$MR = f(a, b, c, g, h, t)$	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
Midilli et al.	$MR = f(a, b, k, n, t)$	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

Literatürde verilen modellerden en uygununu seçmek için, modellerin hepsi sırasıyla denenerek regresyon analizi gerçekleştirilir. R (korelasyon katsayısı),  $\chi^2$  (khi-kare), MBE (ortalama eğilim hatası), RMSE (ortalama kare hatası) ve P (ortalama bağıl sapma modülü) dikkate alınarak en uygun model seçilir ve seçilen bu model polenin güneş enerjili kurutma işlemi temsil eder [68].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i}) (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})^2 \right]}} \quad (2.18)$$

R (korelasyon katsayısı) değeri, ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki lineer ilişkiyi belirlemek için kullanılır.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (2.19)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i}) \quad (2.20)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|MR_i - MR_{pre,i}|}{MR_i} \quad (2.22)$$

Burada “ $MR_{exp,i}$ ” i ’nci deneysel nem oranı, “ $MR_{pre,i}$ ” tahmin edilen nem oranı (modellerden hesaplanan), “N” gözlem sayısı, “n” ise denklemlerdeki sabit sayısıdır.

### 2.3. Termodinamik Analiz

Güneş enerjili tek tabaka kurutma işleminin termodinamik açıdan incelemesi, termodinamiğin 1. ve 2. kanunları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjili tek tabaka kurutma işleminin, Termodinamiğin 1. kanunu kapsamında enerji analizi, 2. kanunu kapsamında da ekserji analizi yapılmıştır.

### 2.3.1. Enerji analizi (1. Kanun analizi)

Güneş enerjili kurutma sırasında havalandırma süreci; ısıtma, soğutma ve nemlendirme evrelerinden oluşur. Havalandırma işlemi; sabit akışta kütle korunumu ve enerjinin korunumu prensipleri ile analiz edilen sabit akış işlemi olarak modellenenir [68].

Kuru havanın kütle korunumu genel kanunu;

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} \quad (2.23)$$

Nemin kütle korunumu genel kanunu;

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad \text{veya} \quad \sum (\dot{m}_{ai} w_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{ai} w_o \quad (2.24)$$

Enerjinin korunumu genel eşitliği;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_o \left( h_o + \frac{V_o^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} \right) \quad (2.25)$$

Kurutma işleminde yalnızca fandanın kinetik enerji değişimi değerlendirmeye alınmıştır. Analiz boyunca bağıl nem oranı ve kuru havanın entalpisi aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır [68].

Bağıl nem oranı;

$$\phi = \frac{wP}{(0.622 + w)P_{sat@T}} \quad (2.26)$$

Bu denklemde “w” özgül nem oranı, “P” atmosfer basıncı, “ $P_{sat@T}$ ” ise kurutma havasının doymuş buhar basıncıdır [68].

Kuru havanın entalpisi;

$$h = c_{p_{aa}} T + w h_{sat@T} \quad (2.27)$$

Bu denklemde “ $c_{p_{da}}$ ” kurutma havasının özgül ısısı, “ $T$ ” kurutma havasının ısısını, “ $h_{sat@T}$ ” doymuş buhar entalpisini gösterir [68].

### 2.3.1.1. Fan çıkış koşullarının belirlenmesi

Fan çıkışında entalpi denklemi aşağıdaki gibi hesaplanır [68].

$$h_{fo} = \left[ \left( \dot{W}_f - \frac{V_{fo}^2}{2 \times 1000} \right) \left( \frac{1}{\dot{m}_{da}} \right) \right] + h_{fi} \quad (2.28)$$

Bu denklemde “ $h_{fi}$ ” fan girişindeki kurutma havasının entalpisini, “ $h_{fo}$ ” fan çıkışındaki kurutma havasının entalpisini, “ $V_{fo}$ ” fan çıkışındaki kurutma havası hızını, “ $\dot{m}_{da}$ ” ise kurutma havasının kütleli debisini göstermektedir [68].

Denklem (2.28) den elde edilen entalpi değeri ve mevcut kuru termometre sıcaklık değeri kullanılarak fan çıkışındaki kurutma havasının özellikleri psikometrik diyagram kullanılarak bulunur [68].

### 2.3.1.2. Güneşli hava kollektörünün çıkış şartlarının belirlenmesi

Güneş enerjili hava kollektörünün giriş şartları fan çıkış şartlarına eşit kabul edilmiştir. Ayrıca nemli havanın ısıtılması işlemi geçerli olduğundan özgül nem “ $w$ ” sabit kabul edilmiştir.

$$w_{ci} = w_{fo} ; \quad T_{ci} = T_{fo} ; \quad \phi_{ci} = \phi_{fo} ; \quad h_{ci} = h_{fo} \quad (2.29)$$

Bu eşitlikte alt simge “ $ci$ ” güneşli hava kollektörünün girişini, “ $fo$ ” ise fan çıkışını göstermektedir.

Kollektörden elde edilen kullanılabilir enerji kollektör giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır [68].

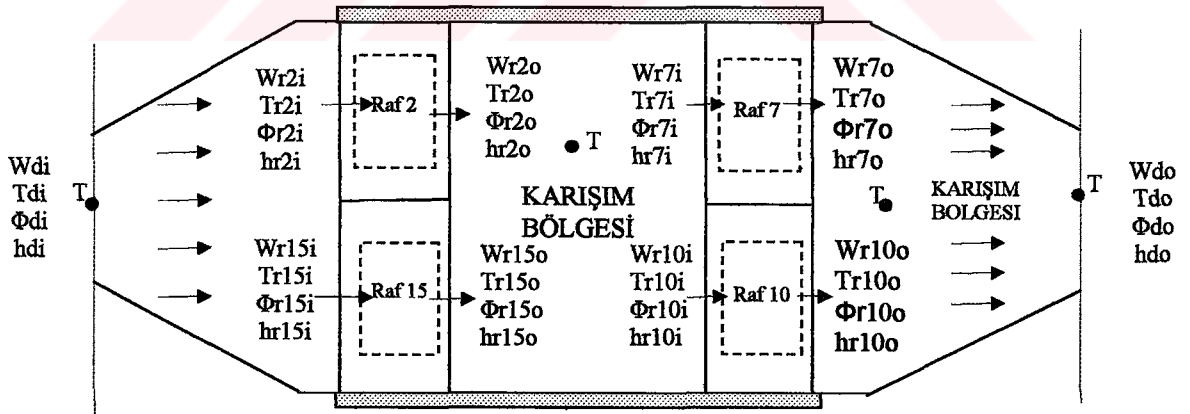
$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{da} c_{p_{da}} (T_{sco} - T_{sci}) \quad (2.30)$$

Bu eşitlikte “ $\dot{m}_{da}$ ” kurutma havasının kütleli debisini, “ $c_{p,da}$ ” kurutma havasının özgül ısısını, “ $T_{sco}$ ” kollektör çıkışındaki hava sıcaklığını, “ $T_{sci}$ ” ise kollektör girişindeki hava sıcaklığını göstermektedir.

Solar hava kollektörü çıkışındaki bağıl nem oranı “ $\phi_{sco}$ ” ve entalpi “ $h_{sco}$ ” (2.26) ve (2.27) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanır [68].

### 2.3.1.3. Rafların çıkış şartlarının belirlenmesi

Kurutma dolabının giriş şartları kurutma havasının dolaba giriş sıcaklığına ve özgül nemine bağlı olarak belirlenmiştir. Burada, kurutma dolabının giriş şartlarının rafların giriş şartlarına eşit olduğu, ayrıca kurutma havasının da raflarda eşit olarak kullanıldığı kabul edilmiştir [68]. Örneğin, birinci gruptaki rafların (raf 2 ve raf 15) giriş şartları, dolabın giriş şartları olarak alınmış, ikinci grup rafların (raf 7 ve raf 10) giriş şartları ise raf 2 ve raf 15’ in çıkış şartları olarak alınmıştır. Aşağıdaki şekilde kurutma prosesindeki kurutma havasının izlediği yol dolabın girişinden itibaren gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Rafların sistematik enerji modeli

Rafların çıkışındaki özgül nem oranları genel olarak aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır.

Genel form;

$$w_o = w_i + \frac{2\dot{m}_{wpo}}{\dot{m}_{da}} \quad (2.31)$$

Bu eşitliklerde “ $w_i$ ” raf girişindeki özgül nem, “ $w_o$ ” raf çıkışındaki özgül nem, “ $\dot{m}_{wpo}$ ” raftaki üründen ayrılan nemin kütleli debisini, “ $\dot{m}_{da}$ ” ise kurutma havasının kütleli debisini göstermektedir [68].

Raflardaki kurutma havasının nemlendirilmesi sırasında, raflarda kullanılan enerji değerleri genel olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır [68].

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{da}}{2} (h_{i@T} - h_{o@T}) \quad (2.32)$$

Burada, “ $h_{i@T}$ ” ve “ $h_{o@T}$ ” raf giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak belirlenen entalpi değerleridir [68].

#### 2.3.1.4. Kurutma dolabının çıkış şartlarının belirlenmesi

Güneş enerjili kurutma kabınınin karışım bölgelerindeki özgül nem oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$w_{dco} = \frac{w_{r7o} \cdot \dot{m}_{r7o} + w_{r10o} \cdot \dot{m}_{r10o}}{\dot{m}_{r7o} + \dot{m}_{r10o}} \quad (2.33)$$

Burada; “ $w_{r7o}, w_{r10o}$ ” yedinci ve onuncu rafların çıkışındaki özgül nem oranı, “ $\dot{m}_{r7o}, \dot{m}_{r10o}$ ” ise yedinci ve onuncu rafların çıkışındaki kütleli debiyi göstermektedir [68].

Güneş enerjili kurutma işlemi sırasında rafların ve dolabın enerji kullanım oranları genel olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

Raflar için;

$$EUR_r = \frac{\dot{m}_{ri}(h_{i@T} - h_{o@T})}{\dot{m}_{da} c_{p_{da}} (T_{dci} - T_{sci})} \quad (2.34)$$

Kurutma dolabı için;

$$EUR_{dc} = \frac{\dot{m}_{da}(h_{dci@T} - h_{dco@T})}{\dot{m}_{da} c_{p_{da}} (T_{dci} - T_{sci})} \quad (2.35)$$

### 2.3.2. Ekserji analizi (2. Kanun analizi)

Ekserji, en genel anlamda kullanılabilir enerji olarak tanımlanır. Rafların ve kurutma kabininin ekserji kayıplarının hesaplanması termodinamiğin ikinci kanununun alanına girer. Ekserji analizinin amacı mevcut şartlarda ekserji değerlerini ve prosesteki ekserji değişiminin nedenlerini belirlemektir.

En genel anlamda ekserji ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir [68].

$$Exergy = (u - u_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{P_{\infty}}{J}(v - v_{\infty}) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_{\infty})\frac{g}{g_c J} + \sum (\mu_c - \mu_{\infty})N_c + E_i A_i F_i (3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty}T^3) + \dots \quad (2.36)$$

Burada; “ $(u - u_{\infty})$ ” iç enerji terimini,

“ $T_{\infty}(s - s_{\infty})$ ” entropi terimini,

“ $\frac{P_{\infty}}{J}(v - v_{\infty})$ ” iş terimini,

“ $\frac{V^2}{2gJ}$ ” momentum terimini,

“ $(z - z_{\infty})\frac{g}{g_c J}$ ” kütle terimini,

“ $\sum (\mu_c - \mu_{\infty})N_c$ ” kimyasal enerji terimini,

“ $E_i A_i F_i (3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty}T^3)$ ” radyasyon emisyonu terimini,



“∞” alt simgesi ise referans koşullarını gösterir.

Ekserji, herhangi bir kaynaktan kullanılabilir enerji olduğundan ilgili terimler elektrik akımı, manyetik alan ve malzemelerin difüzyonu kullanılarak da geliştirilebilir.

Yukarıdaki eşitlikte  $Pv$  ve iç enerji terimleri yerine entalpi konulursa eşitlik sabit akış sistemleri için uygun hale gelir. Genellikle yukarıdaki eşitlik yerçekimi ve momentum terimleri ihmal edilerek kullanılır. Ayrıca  $v \cong v_\infty$  olduğundan sistemdeki basınç değişimleri de ihmal edilebilir [68]. O halde, yukarıdaki denklem basitleştirilecek olursa, aşağıdaki ifade elde edilir [68].

Buradan eşitlik şu şekilde yazılabilir;

$$Exergy = \bar{c}_p \left[ (T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (2.37)$$

Rafların ve kurutma kabininin giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak ekserji giriş ve çıkış değerleri bulunur [68].

Ekserji kaybı=Ekserji girişi- Ekserji çıkışı

$$\sum Ex_L = \sum Ex_i - \sum Ex_o \quad (2.38)$$

Kabin ve rafların ekserji girişi;

$$Ex_{dci} = Ex_{ri} = \bar{c}_{p_{da}} \left[ (T_{ri} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{ri}}{T_\infty} \right] \quad (2.39)$$

Burada “ $\bar{c}_{p_{da}}$ ” kurutma havasının ortalama özgül ısıdır.

Kurutulacak ürünün yerleştirildiği raf için ekserji çıkışı;

$$Ex_{ro} = \bar{c}_{p_{da}} \left[ (T_{ro} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{ro}}{T_\infty} \right] \quad (2.40)$$

Kurutma kabini için ekserji çıkışı;

$$Ex_{dco} = \bar{c}_{p_{da}} \left[ (T_{dco} - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T_{dco}}{T_{\infty}} \right] \quad (2.41)$$

Ekserjitik verim ise aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmaktadır [68].

$$\eta_{Ex} = 1 - \frac{Ex_L}{Ex_i} \quad (2.42)$$



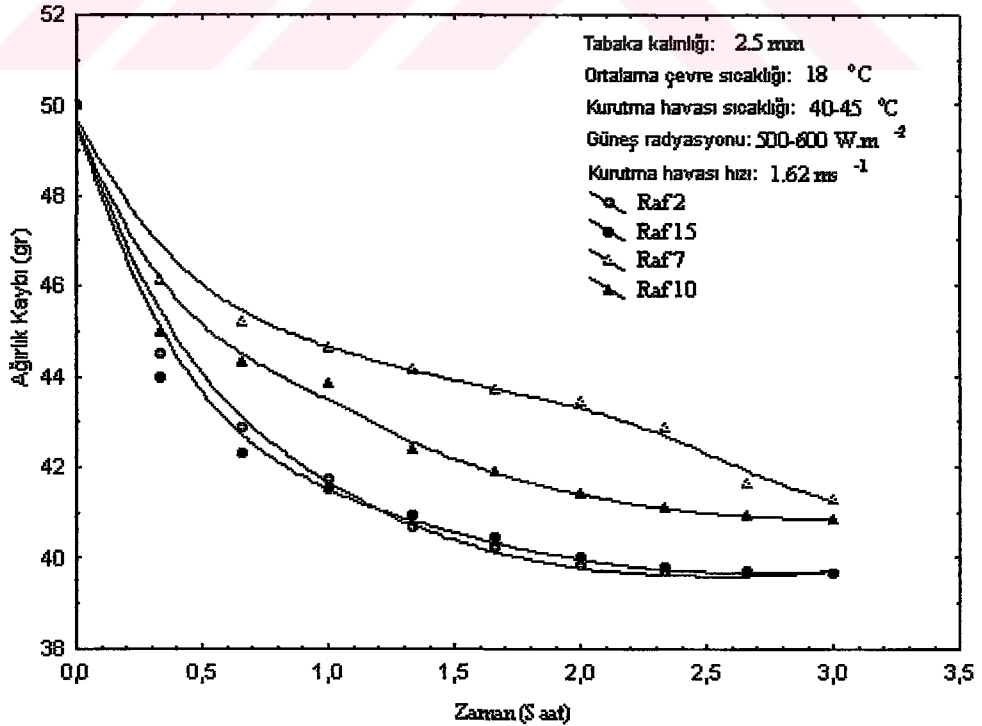
## BÖLÜM 3

### BULGULAR

#### 3.1. Modelleme ile İlgili Bulgular

Bu çalışmada, polenin güneş enerjili kurutma işleminin matematiksel modellemesi literatürde verilmiş olan deneysel kuruma eşitlikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek tabaka kurutma işlemleri için literatürde verilmiş olan 12 deneysel kuruma eşitliği, deneysel veriler kullanılarak test edilmiştir. Kurutma deneylerinde; kurutulacak polen numunelerinin tabaka kalınlığı 2.5 mm alınmış, ortamdaki hava hareketlerinden kaynaklanan rüzgar hızı 0.7 m/s, ortam havasının sıcaklığı ortalama olarak 18 °C, ortam havasının bağıl nemi yaklaşık olarak %63, kurutma havası sıcaklığı 40-45 °C, güneş radyasyonu 500-600 W/m<sup>2</sup>, kuruma zamanı yaklaşık 3 saat olarak ölçülmüştür.

Şekil 3.1 güneş enerjili tek tabaka kurutma işlemi sırasında polen numunelerinin ağırlık kaybının zamana göre değişimini sunar.



Şekil 3.1. Ağırlık kaybının zamana göre değişimi

Şekilden görüldüğü üzere, ikinci rafta bulunan polen örnekleri 3 saat sonunda 50 gramdan 39.67 grama, onbeşinci raftaki ürünler 39.68 grama, yedinci raftaki ürünler 41.3 grama ve onuncu raftaki ürünler ise 40.87 grama düşmüştür.

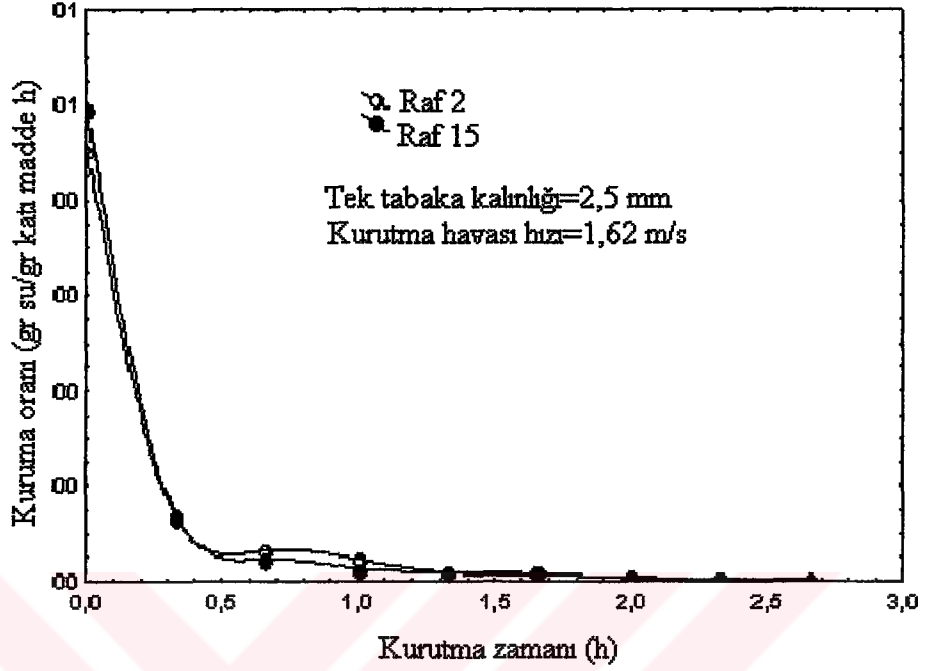
Güneş enerjili kurutma kabınınin 2. ve 15. raflarında elde edilen deneysel veriler kullanılarak, literatürde verilmiş olan deneysel kuruma eşitliklerinin istatistik analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1' de sunulmuştur. Deneysel kuruma eşitliklerindeki tüm sabitler Statistica bilgisayar programı kullanılarak tespit edilmiştir. Polenin tek tabaka güneş enerjili kurutma işlemini temsil eden en iyi model, istatistik analiz sonucu  $\chi^2$  (khi-kare), MBE (ortalama eğilim hatası), RMSE (ortalama kare hatası) ve P (ortalama bağıl sapma modülü) değerlerinin en küçük, aynı zamanda R (korelasyon katsayısı) nin ise en büyük değer aldığı Midilli-Küçük Modeli olarak belirlenmiştir.



**Çizelge 3.1. İstatistik analiz sonuçları ve tek tabaka amprik deneysel kuruma eşitlikleri**

Model Adı	Raf	Model sabitleri	MBE	RMSE	$\chi^2$	R	P (%)
Newton	2	k=0.106596	0.0189910	0.0508030	0.0028670	0.57552	2.21770
	15	k=0.106189	0.0205790	0.0539930	0.0032390	0.44170	2.29460
Page	2	k=0.177602; n=0.299274	-998×10 <sup>-7</sup>	0.0071760	64.38×10 <sup>-8</sup>	0.99330	0.00314
	15	k=0.182226; n=0.254904	-476×10 <sup>-7</sup>	0.0043760	23.94×10 <sup>-8</sup>	0.99736	0.00237
Modified page	2	k=0.003108; n=0.299333	-975×10 <sup>-7</sup>	0.0071760	64.38×10 <sup>-8</sup>	0.99330	0.00287
	15	k=0.001297; n=0.256552	2841×10 <sup>-7</sup>	0.0043920	24.11×10 <sup>-8</sup>	0.99730	0.03780
Henderson and Pabis	2	a=0.923866; k=0.066593	526×10 <sup>-7</sup>	0.0331252	0.0013716	0.84597	0.11500
	15	a=0.917733; k=0.062868	-453×10 <sup>-7</sup>	0.0343184	0.0014721	0.82223	0.12550
Logarithmic	2	a=0.201441; k=1.854209 c=0.794190	-10×10 <sup>-10</sup>	0.0056504	0.0000456	0.99585	0.00369
	15	a=0.196284; k=2.246982 c=0.799494	-84×10 <sup>-10</sup>	0.0071204	0.0000724	0.99300	0.00646
Two term	2	a=0.824203; k <sub>0</sub> =0.014588 b=0.173868 k <sub>1</sub> =2.425011	-7×10 <sup>-8</sup>	0.0047245	0.0000372	0.99710	0.00290
	15	a=0.839935; k <sub>0</sub> =0.021120 b=0.159586 k <sub>1</sub> =3.610130	-18×10 <sup>-8</sup>	0.0031823	0.0000169	0.99861	0.00136
Two term exponential	2	a=1.000006; k=0.106596	0.0372000	0.0550700	0.0037911	0.57552	2.15711
	15	a=1.000009; k=0.106189	0.0205700	0.0539900	0.0036441	0.44517	2.35512
Wang and Singh	2	a=-0.205931; b=0.047931	0.0050440	0.0203280	0.0005163	0.94494	0.54592
	15	a=-0.208196; b=0.049035	0.0062910	0.0253450	0.0008030	0.90737	0.69819
Diffusion approximation	2	a=0.174844; k=2.473196 b=0.006074	0.0001910	0.0047632	0.0000324	0.99706	0.02200
	15	a=0.159999; k=3.621545 b=0.005841	0.0000470	0.0031859	0.0000145	0.99860	0.00613
Verma et al.	2	a=0.174844; k=2.473195 g=0.015022	0.0001900	0.0047632	0.0000324	0.99706	0.02200
	15	a=0.159999; k=3.621545 g=0.021152	0.0000470	0.0031858	0.0001450	0.99860	0.00613
Modified Henderson and Pabis	2	a=0.969914; k=0.014589 b=-0.145711 g=0.014592 c=0.173868 h=2.425012	-0.0002135	0.0115450	0.0003332	0.98258	0.01618
	15	a=0.030806; k=-0.459268 b=-0.841785 g=0.075336 c=0.127417 h=5.237936	-0.0002627	0.0166470	0.0006929	0.96101	0.00734
*Midilli-Kucuk	2	a=0.999782; k=0.262389 n=0.588696	0.00000013	0.0018100	0.0000055	0.99958	0.00055
	15	b=0.062377 a=1.000005; k=0.226248 n=0.426301 b=0.031922	0.000000025	0.0011677	0.0000023	0.99998	0.00020

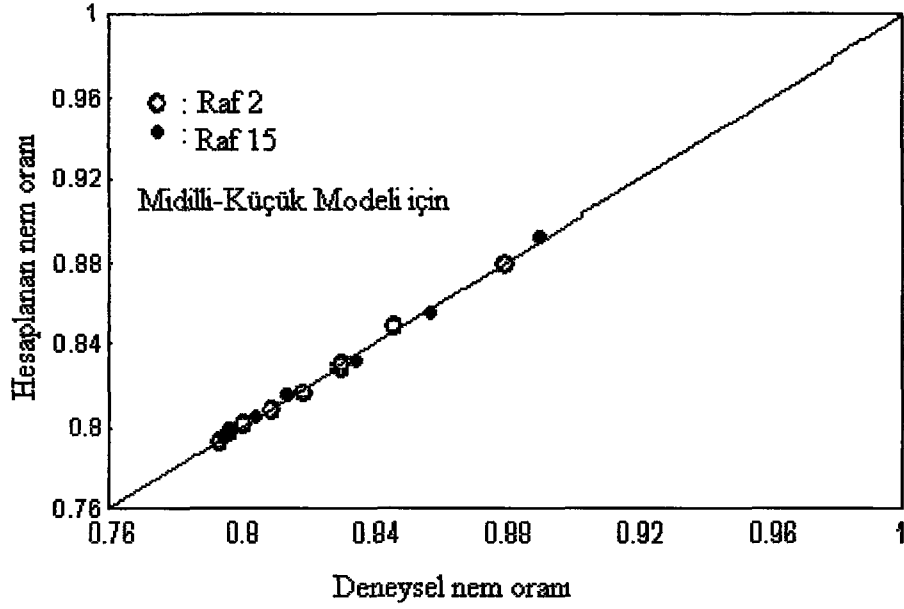
Şekil 3.2’de kuruma hızının kuruma zamanı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 3.2. Kuruma hızı-kuruma zamanı değişimi

Azalan hızla kuruma evresinde polenin kuruma hızını etkileyen temel faktörün kurutma havası hızı olduğu Şekil 3.2’de görülmektedir. Deneylerde kullanılan polen örneklerinin yüksek nem içermesi nedeniyle kuruma zamanının 0.3 saat değerinde, kuruma hızı hızlı bir düşüş göstermektedir. 0.3 saat kuruma zamanı değerinden sonra kuruma hızı, azalan nem oranı nedeniyle sıfır değerine doğru yavaş bir düşüş göstermektedir.

Şekil 3.3’de tek tabaka kuruma işleminin deneysel nem oranları ve seçilen modelden hesaplanan nem oranlarının doğrusal bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu durum, seçilen modelin polenin tek tabaka kuruma işlemini en iyi şekilde temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.3. Hesaplanan nem oranları-deneysel nem oranları değişimi

### 3.1.1. Belirsizlik analizi değerleri

Deneylerde hatalar ve belirsizlikler; ölçü aletlerinin seçimine, koşullara, kalibrasyona, çevre şartlarına, gözleme, okumaya ve deney düzeneğine bağlı bulunmaktadır. Polen örneklerinin kurutma deneylerinde; sıcaklık, kurutma havası hızı ve ağırlık kaybı gibi parametrelerin ölçümleri uygun ölçü aletleri ile gerçekleştirilmiştir. Parametrelerin ölçümleri sırasında ortaya çıkan belirsizlikler Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Polenin güneş enerjili kurutma işlemi deneylerinde ölçülen parametrelerin belirsizlik değerleri

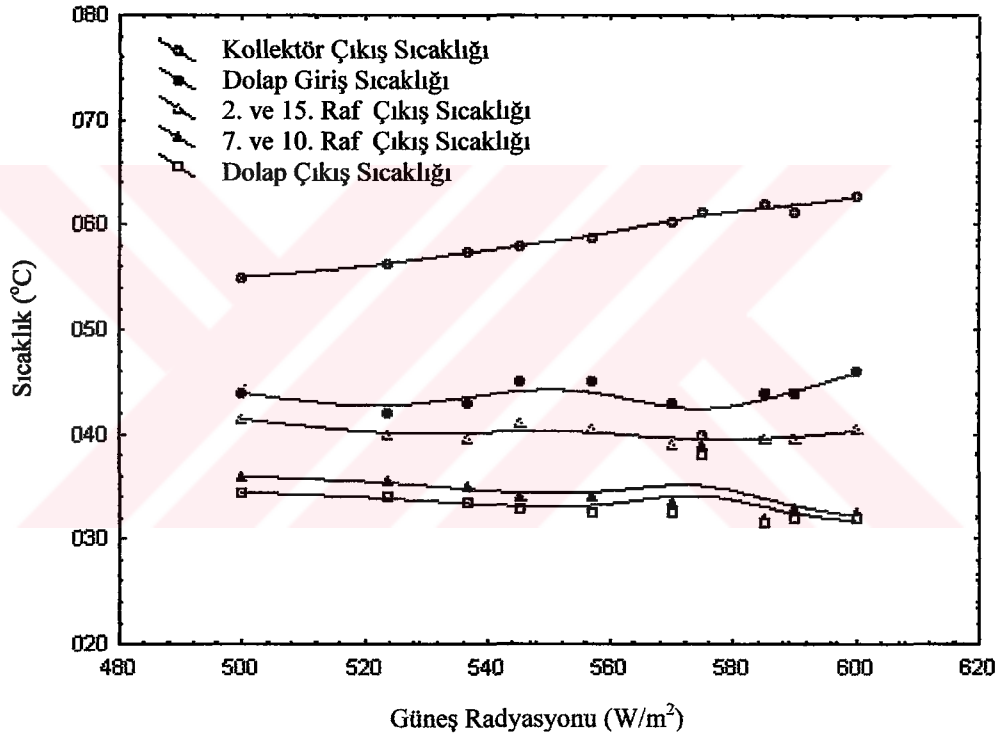
Parametre	Birim	Açıklama
Ağırlık kaybı	gr	$\pm 0.01$
Bağıl nem	%	$\pm 1.0$
Kurutma havası hızı	m/s	$\pm 0.15$
Raf sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1$
Giriş hava sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5$
Çıkış hava sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8$
Güneş radyasyonu	$\text{W/m}^2$	$\pm 0.5-1.0$

## 3.2. Termodinamik Analiz ile İlgili Bulgular

### 3.2.1. Enerji analizi ile ilgili bulgular

Güneş enerjisi destekli tek tabaka polen kurutma deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak termodinamiğin birinci kanunu kapsamında enerji analizi ve termodinamiğin ikinci kanunu kapsamında ise ekserji analizi gerçekleştirildi [25], [30]. Kurutma prosesinde tüm hesaplamalar kurutma havası referans alınarak gerçekleştirildi.

Şekil 3.4 kurutma prosesi sırasında ölçülen sıcaklık değerlerinin güneş enerji radyasyonuna bağlı olarak değişimini göstermektedir.

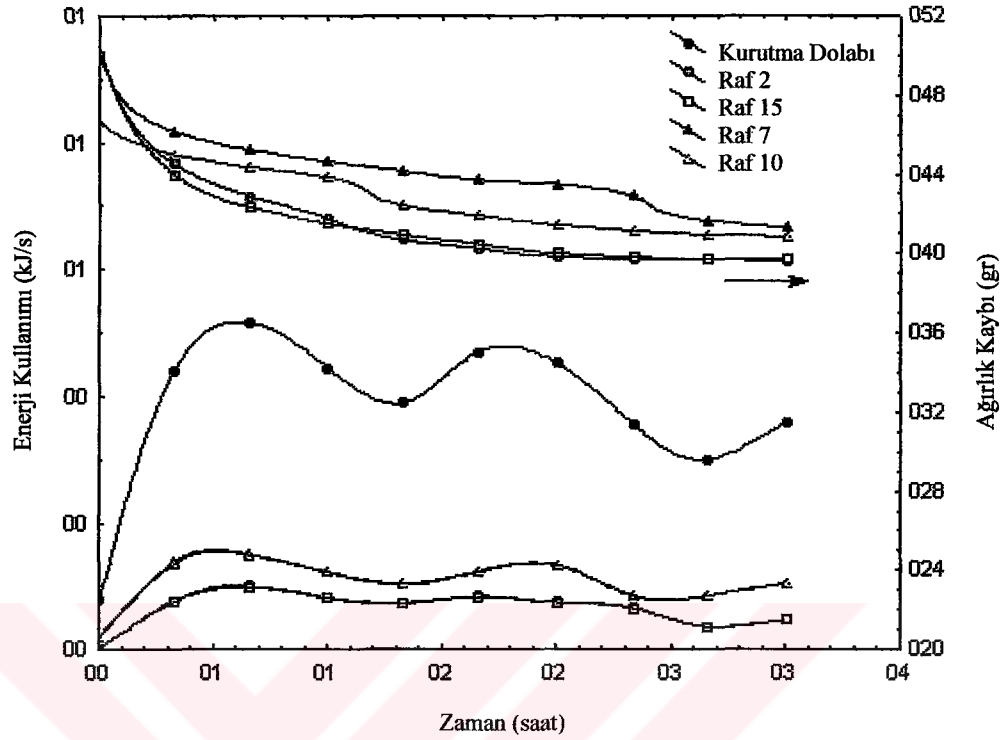


Şekil 3.4. Güneş radyasyonu değerlerine bağlı olarak kurutma sırasındaki sıcaklık değerleri

Şekilden görüldüğü üzere, kurutma havasının sıcaklığı 40-45 °C arasında değişmektedir. Polen kurutma işlemleri genellikle 40-45 °C sıcaklıklarda yapıldığından kollektör çıkışındaki havanın sıcaklığının ısı kaybetmesine müsaade edilmiştir. Ayrıca kurutma dolabı çıkışında ise kurutma havası sıcaklığının 31-34.5 °C arasında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 3.5 'te raflardaki enerji kullanımı ile ağırlık kaybının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.

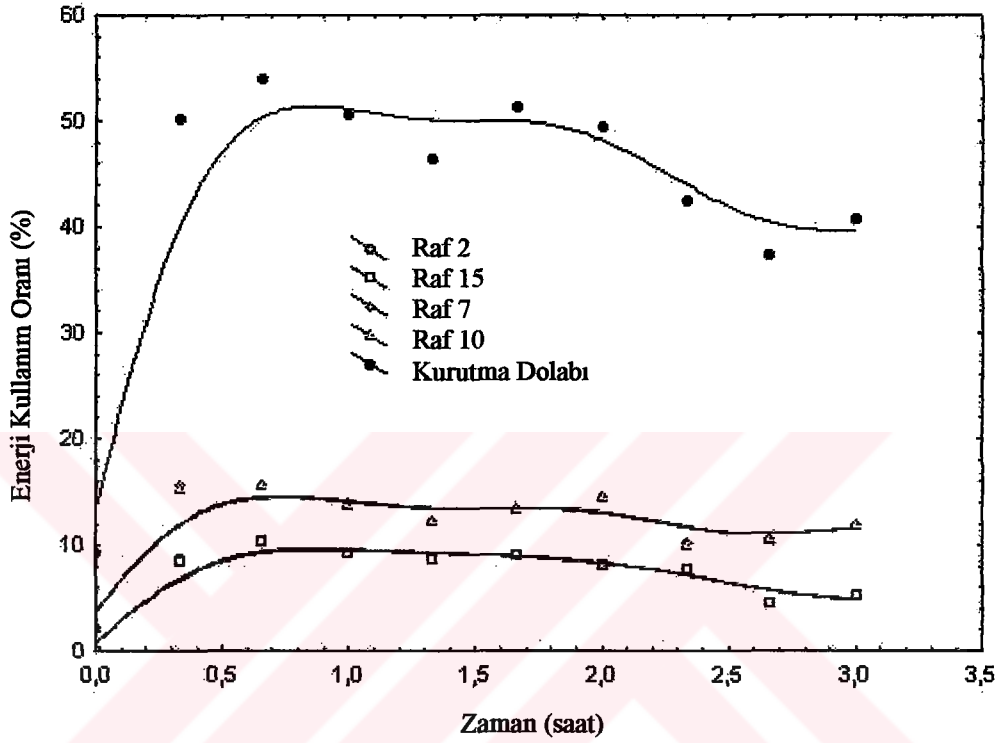


Şekil 3.5. Güneş enerjili tek tabaka kurutma işlemi sırasında kullanılan enerji miktarı ile ağırlık kaybının zamana bağlı olarak değişimi

Kurutma işlemi sırasında raflarda kullanılan enerji miktarları 2.32 denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Burada raflara giren ve raflardan çıkan kurutma havasının sıcaklığı dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kurutma dolabında kullanılan ısı miktarlarının belirlenmesinde ise kurutma havasının dolaba giriş ve dolaptan çıkış sıcaklıkları dikkate alınmıştır. Bu durumda kurutma dolabında kullanılan ısı miktarı 0.077-0.515 kJ/s aralığında değişmektedir. İkinci rafta 0.099-0.0363 kJ/s aralığında ısı kullanıldığında yaklaşık 3 saatlik bir periyotta ürünlerin 50 gramdan 39.67 grama düştüğü belirlenmiştir. 15. rafta bulunan ürünlerin aynı kurutma periyodunda 39.68 grama düşmesi için 0.098-0.0360 kJ/s aralığında ısı kullanılmıştır. İkinci ve onbeşinci raflardan ayrılan kurutma havası yedinci ve onuncu raflardaki ürünlerden nem kaldırmak için kullanılmıştır. Bu raflarda kullanılan enerji miktarlarının daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun bir nedeni havanın bağıl neminin yükselmesi olabilir. Yedinci rafta 0.019-0.149 kJ/s aralığında ısı kullanılmışken onuncu rafta 0.019-0.148 kJ/s aralığında ısı kullanılmıştır. Yedinci ve onuncu raflarda kullanılan ısı miktarlarının

yüksek olmasının bir diğer nedeni de raflara giren ve raflardan çıkan kurutma havasının sıcaklık değerlerinin farkının yüksek olması olabilir. Ayrıca yedinci ve onuncu raflarda meydana gelen ısı kayıpları ve kurutma havasının yoğunluğunun artmasında kullanılan ısı miktarının yüksek olmasına neden olduğu söylenebilir.

Şekil 3.6 da kurutma dolabının ve raflarının ısı kullanım oranları sunulmuştur.

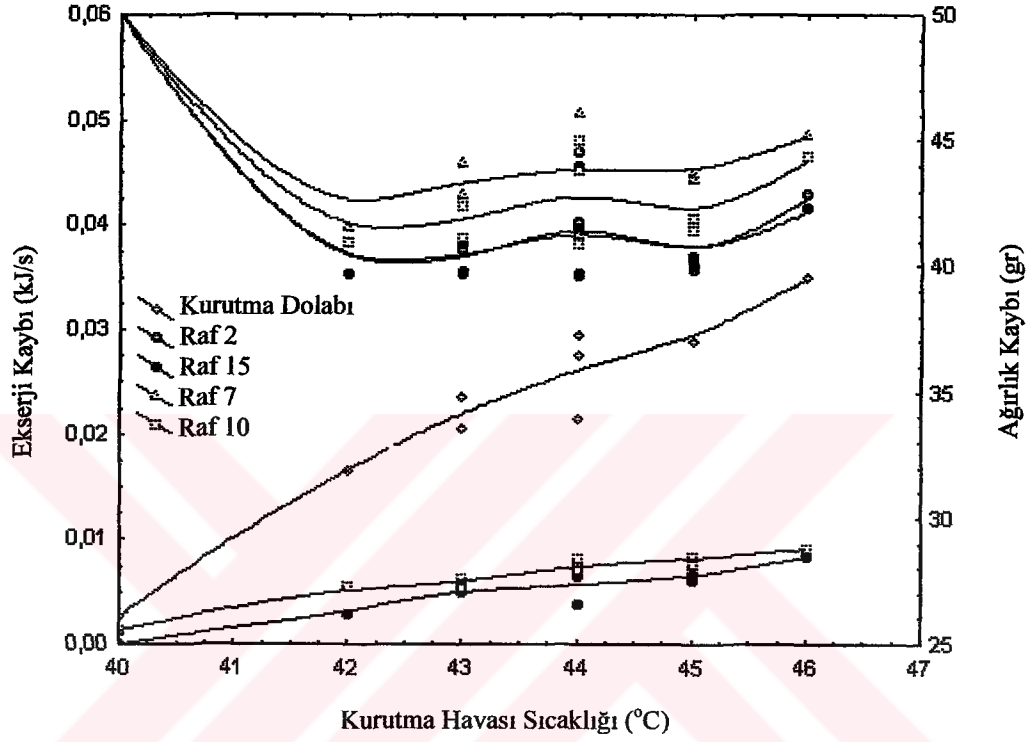


Şekil 3.6. Kurutma dolabında ve raflarda enerji kullanım oranlarının zamanla değişimi

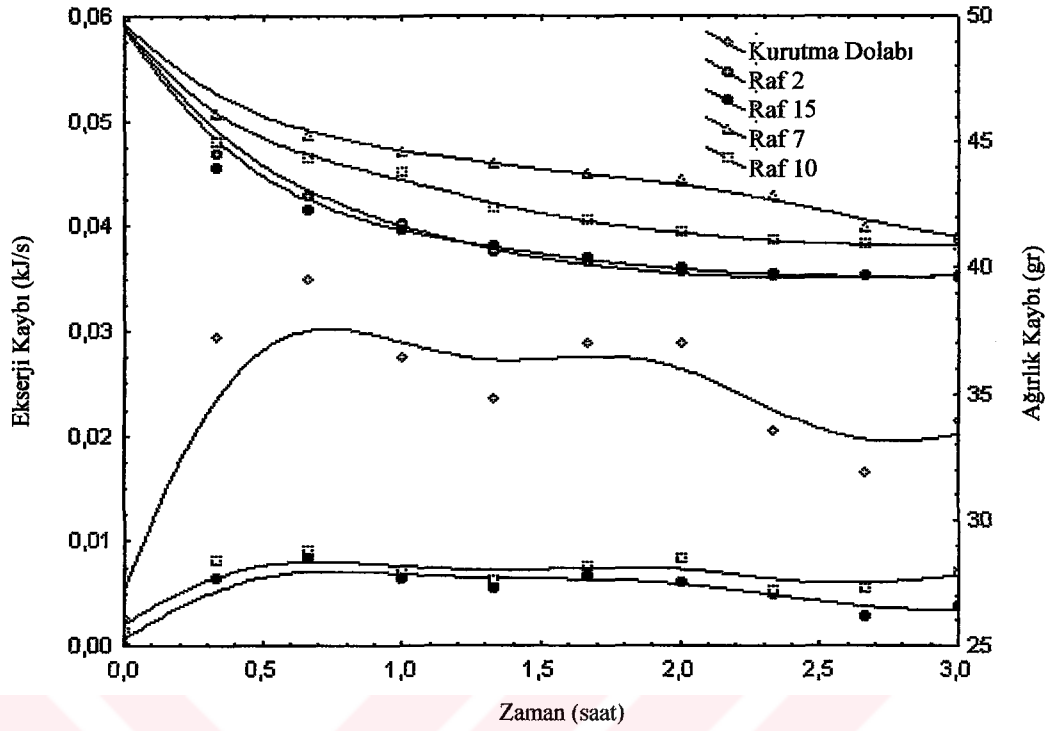
Enerji kullanım oranları, raflarda kullanılan ısının dolaba sağlanan ısıya oranı şeklinde tanımlanmış ve 2.34 denklemini kullanılarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü üzere, maksimum enerji kullanım oranları; ikinci rafta % 10.44, onbeşinci rafta % 10.29, yedinci rafta % 15.70 ve onuncu rafta ise % 15.60, kurutma dolabında ise % 54 değerinde olup bu değerler kurutma periyodunun kırkinci dakikasında elde edilmiştir. Kurutma sırasında raflarda veya dolapta kullanılan enerji miktarları üründen kaldırılan neme yani ürünün çekmiş olduğu ısıya, ürünün yapısına ve raflara dizilişine veya dolaptan çevreye olabilecek ısı kayıplarına bağlı olduğu söylenebilir.

### 3.2.2. Ekserji analizi ile ilgili bulgular

Şekil 3.7 de, kurutma dolabından ve raflardan meydana gelen ekserji kaybının ve ürünlerin ağırlık kaybının kurutma havası sıcaklığı ile değişimi sunulmuştur. Ayrıca Şekil 3.8 de, kurutma dolabından ve raflardan gerçekleşen ekserji kaybının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.



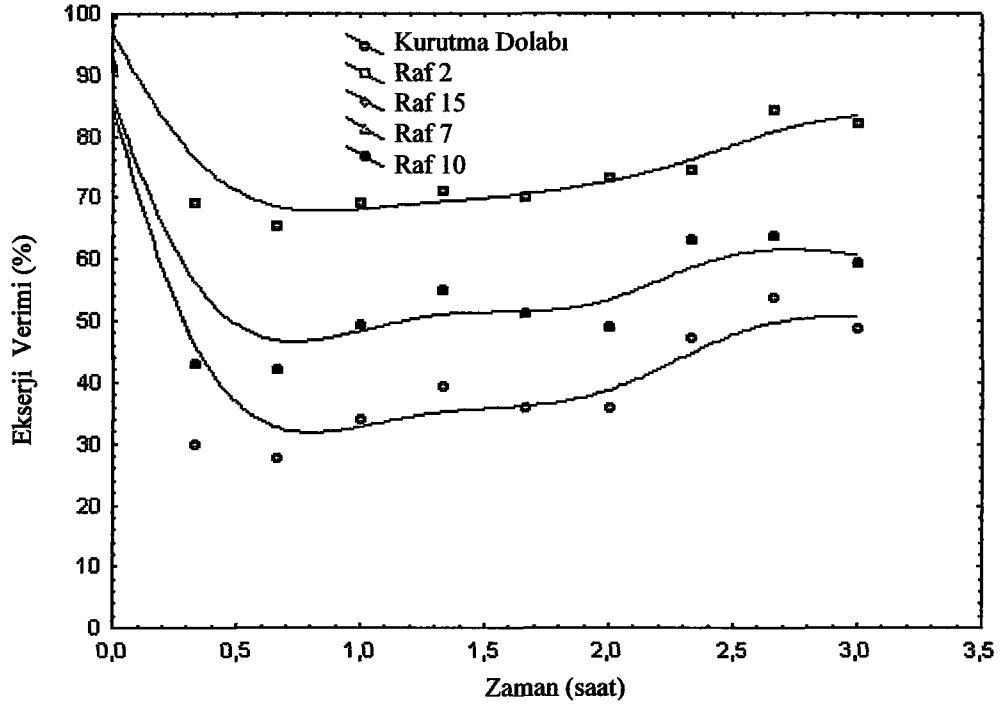
Şekil 3.7. Kurutma dolabındaki ve raflardaki ekserji kaybının ve ağırlık kaybının kurutma havası sıcaklığı ile değişimi



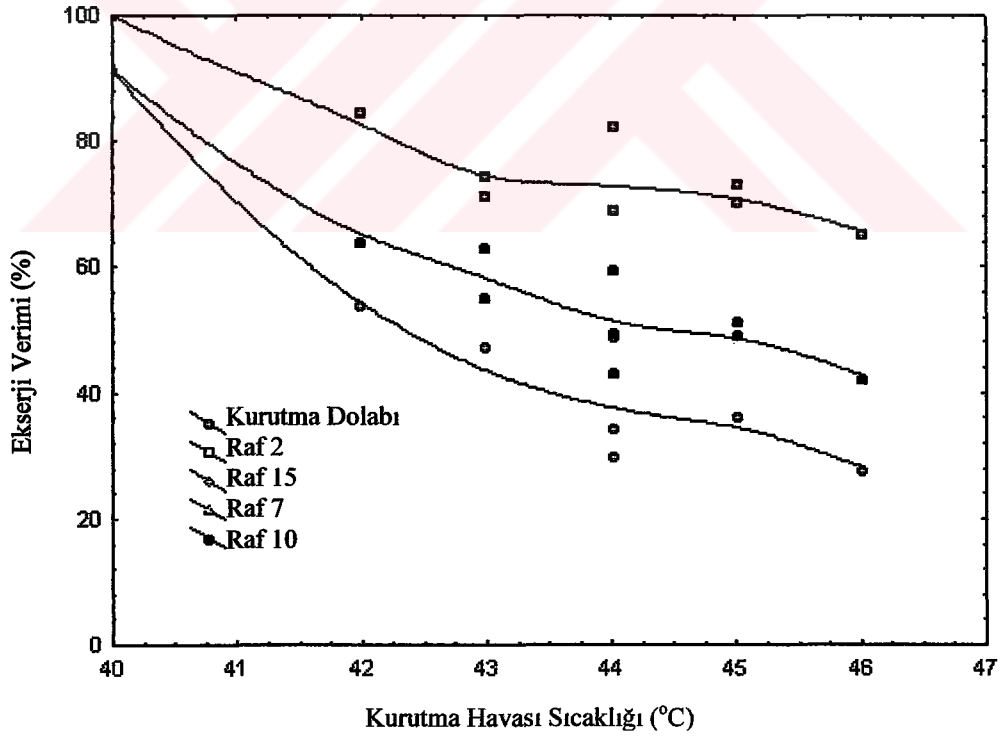
**Şekil 3.8.** Kurutma dolabındaki ve raflardaki ekserji kaybının ve ağırlık kaybının zamanla değişimi

Şekillerden de görüldüğü üzere, ikinci raf ile onbeşinci raftaki ekserji kayıplarının değeri birbirine oldukça yakındır. Bunun nedeni, kurutma havasının bu raflara giriş ve çıkış sıcaklığının çok yakın değerlerde olmasıdır. Benzer şekilde yedinci ve onuncu raf içinde aynı durum söz konusudur. Ekserji kayıplarının hesaplanmasında referans sıcaklığı olarak çevre sıcaklığı alınmıştır. Çevre sıcaklığının ortalama değeri 18 °C dir. O halde, kurutma havasının sıcaklığı arttıkça referans sıcaklığı sabit olmak üzere, raflardaki ve dolaptaki ekserji kaybı da yaklaşık lineer olarak artmaktadır. Bununla birlikte kurutma süresinin artmasıyla ekserji kayıplarının azaldığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, ürünlerdeki nemin zamanla azalması ve bu nedenle de ısı kayıplarının giderek azalması şeklinde ifade edilebilir.

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 kurutma dolabının ve rafların kurutma işlemi sırasındaki ekserji verimlerinin kurutma havası sıcaklığına ve zamana bağlı olarak değişimini gösterir.



Şekil 3.9. Kurutma dolabının ve rafların kurutma işlemi sırasındaki ekserji verimlerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.10. Kurutma dolabının ve rafların kurutma işlemi sırasındaki ekserji verimlerinin kurutma sıcaklığına bağlı değişimi

Şekillerden de anlaşıldığı gibi ekserji kayıplarının kurutma süresi arttıkça azalması nedeniyle, kurutma dolabının ve rafların ekserji verimleri başlangıçta hızlı bir düşüş göstermekte, ilerleyen kurutma zamanı değerlerinde yaklaşık olarak lineer bir değişim göstermekte ve artan zamanla ekserji veriminin yükseldiği gözlenmektedir. Ayrıca kurutma dolabının ve rafların ekserji verimleri kurutma havası sıcaklığının artmasıyla azalma göstermektedir. Bunun nedeni üründen ayrılacak nemin minimum boyuta düşmesi ve bu sebeple ısı kayıplarının azalmasıdır. Yani artan kurutma havası sıcaklıklarında, kuruma zamanının da artmasına bağlı olarak raflara ve kabine giren ve çıkan kurutma havası sıcaklıkları birbirlerine yakın değerler almaktadırlar.



## BÖLÜM 4

### SONUÇLAR

Güneş enerjisi destekli polenin tek tabaka kurutulması işleminin matematik modellenmesi, literatürde sunulan yarı ampirik ya da ampirik modelleri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel verilerden yararlanarak polen için en uygun kuruma eğrisi modeli belirlenmiştir. Deneysel kuruma eşitliklerindeki tüm sabitler belirlenmiştir. Polenin tek tabaka güneş enerjili kurutma işlemini temsil eden en iyi model, istatistik analiz sonucu  $\chi^2$  (khi-kare), MBE (ortalama eğilim hatası), RMSE (ortalama kare hatası) ve P (ortalama bağıl sapma modülü) değerlerinin en küçük, aynı zamanda R (korelasyon katsayısı) nin ise en büyük değer aldığı Midilli-Küçük Modeli olarak belirlenmiştir.

Ayrıca termodinamiğin 1. ve 2. kanunundan yararlanarak güneş enerjili polen kurutma işleminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bunun neticesinde raflarda ve kurutma dolabında kurutma işlemine sağlanan enerji ve ekserji değerlerinin, enerji ve ekserji kayıplarının belirlenmesi ve bunun yanında kurutma işleminin ekserjetik veriminin belirlenmesi için hesaplamalar yapılmıştır. Bunun sonucunda, kurutma dolabında kullanılan ısı miktarının 0.077-0.515 kJ/s aralığında değiştiği, maksimum enerji kullanım oranının % 54 değerinde olduğu ve bu değer kurutma periyodunun kırkinci dakikasında elde edildiği belirlenmiştir. Kurutma dolabının ekserji değerleri 0.018-0.034 kJ/s, kurutma dolabının ekserji verimi ise yaklaşık olarak % 38 olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca, kurutma sistemlerinin ekserji analizi üreticilere kullandıkları sistemin verimi hakkında bilgi verir. Çeşitli kurutma sistemleri arasından, üreticiler termodinamik analiz verilerine göre dizayn edilen kurutma amaçlı kullanacakları bir kurutma sistemini seçebilirler. O halde, ekserji analizi sistemdeki kurutma işleminin verimini azaltacak yönde meydana gelen kayıpların belirlenmesi ve böylece kurutma işleminin veriminin iyileştirilmesi konusunda önemli bir araç olarak kullanılmıştır. Özellikle ekserji kayıpları dikkate alınarak uygulamada güneş enerjili polen kurutma işlemi için dizayn edilecek kurutucuların tasarlanması gerekir. İleri düzeyde çalışmalar için, güneş enerjili kurutma sisteminin termo-ekonomik analizinin ayrı bir bilimsel araştırma kapsamında ele alınması önerilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bingöl Ş., Sebze İşleme Sanayiinde Gelişmeler ve Pazarlama Durumu, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, Ankara, 1983, 289.
- [2] Doğantan Z. S., Kahramanmaraş Biberlerinin Kurutmaya Yönelik Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Saptanması ile Doğal Koşullarda ve Plastik Örtü Altı Güneş Toplayıcılarıyla Kurutma Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Ç. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Mekanizasyon Anabilim Dalı, Adana, 1986.
- [3] Donald B. Brooker, Fred W. Bakker-Arkema, Carl W. Hall, Drying Cereal Grains, The AVI Publishing Company, INC., Westport, Connecticut, 1973.
- [4] Yağcıoğlu A., Tarım Ürünlerinde Kurutma Tekniği, Ege Üniv. Ziraat Fakültesi Yayınları, İzmir, 1999, 536.
- [5] Devahastin S., Mujumdar 's Practical Guide to Industrial Drying, Exerges Corporation, Montreal, 2000.
- [6] Perry R. H., Green D. W., Perry's Chemical Engineering Handbook, 6 th ed, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [7] Bançhero J. T., Badger W. L., Çeviri Çataltaş İ., Kimya Mühendisliğine Giriş, İnkılap ve Aka Kitapevi, 1973.
- [8] Huizhen L., Morey R. V., Thin Layer Drying of Yellow Dent Corn, Transactions of the ASAE, 27/2 (1984) 581-585.
- [9] Chiang W-C., Petersen J. N., Thin Layer Air Drying of French Fried Potatoes, Journal of Food Technology, 20 (1985) 67-78.
- [10] Shepherd H., Bhardwaj R. K., Thin Layer Drying of Pigeon Pea, Journal of Food Science, 53/6 (1988) 1813-1817.
- [11] Chen P., Pei D. C. T., 1989, A Mathematical Model of Drying Processes, Int. J. Heat Mass Transfer, 32/2 (1989) 297-310.
- [12] Dinçer İ., Soğuk Su Banyosunda Soğutulan Küresel Şekilli Domatesin Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi, Mühendis ve Makine Dergisi, 33/387 (1992) 21-26.
- [13] Ayvaz H., Güneş Enerjisiyle Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Kullanılacak Endüstriyel Kurutucu Tasarımı, Doktora Tezi, Ege Üniv. Güneş Enerjisi Ens., İzmir, 1992.
- [14] Miketinac M. J., Sokhansanj S., Tutek Z., Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients in Thin Layer Drying of Grain, American Society of Agricultural Engineers, 35/6 (1992) 1853-1858.



- [15] Şahbaz F., Kayhan I., Hava Akış Hızı ve Sıcaklığının Patatesin Kuruma Hızına Etkisi, Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences, 18 (1994) 163-168.
- [16] Tırıs M., Tırıs Ç., Edin M., İki Ayrı Tip Güneşli Kurutucuda Çeşitli Meyve ve Sebzelerin Kuruma Eğrilerinin İncelenmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 17/3 (1994) 27-32.
- [17] Üretir G., Modeling Computer Controlled Apple Drying Processes, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 1995.
- [18] Pal U. S., Chakraverty A., Thin Layer Convection-Drying of Mushrooms, Energy Convers. Mgmt. 38/2 (1997) 107-113.
- [19] Göğüş F., Maskan M., Water Transfer in Potato During Air Drying, Drying Technology, 16/8 (1998) 1715-1728.
- [20] Simal S., Rossello C., Mulet A., Modelling of Air Drying in Regular Shaped Bodies, Chemical Engineering, 4 (1998) 171-180.
- [21] Akbaba H., Drying Characteristic of Squash with Hot Air, Drying '98 Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki, Greece, 1998, 1476-1480.
- [22] Sarsavadia P. N., Sawhney R. L., Pangavhane D. R., Singh S. P., Drying Behaviour of Brined Onion Slices, Journal of Food Engineering, 40 (1999) 219-226.
- [23] Balladin D. A., Headley O., Solar Drying of Rose Petals, Renewable Energy, 18 (1999) 249-255.
- [24] Temple S. J., Van Boxtel A. J. B., Thin Layer Drying of Black Tea, J. Agric. Engng. Res. 74 (1999) 167-176.
- [25] Midilli A., Olgun H., Ayhan T., Experimental Studies of Mushroom and Pollen Drying, International Journal of Energy Research, 23 (1999) 1143-1152.
- [26] Mengeş H. O., Aydın C., Konya Bölgesinde Yetiştirilen Stanley Çeşidi Eriklerin Sıcak Hava ile Kurutulmasında Kuruma Üzerine Etki Eden Faktörler, Tarımsal Mekanizasyon 19. Ulusal Kongresi, Erzurum, 2000, 324-331.
- [27] Sarsılmaz C., Yıldız C., Pehlivan D., Drying of Apricots in a Rotary Column Cylindrical Dryer (RCCD) Supported with a Solar Energy, Renewable Energy, 21 (2000) 117-127.
- [28] Can A., Kurutma Koşullarında Biyolojik Ürünler İçinden Nem Transportunun Kinetiği, Mühendis ve Makine Dergisi, 33/392 (2000) 9-12.

- [29] Yıldız O., Ertekin C., Uzun H. İ., Bazı Sebzelerin Güneş Enerjili Kurutucular ile Kurutulma Olanakları Üzerine Araştırmalar, Tarımsal Mekanizasyon 19. Ulusal Kongresi, Erzurum, 2000, 332-337.
- [30] Midilli A., Olgun H., Rzaev P., Ayhan T., Drying and Conservation Conditions of Pollen, Journal of the Science of Food and Agriculture, 80 (2000) 1973-1980.
- [31] Yıldız O., Ertekin C., Thin Layer Solar Drying of Some Vegetables, Drying Technology, 19/3 (2001) 583-596.
- [32] Midilli A., Determination of Pistachio Drying Behavior and Conditions in a Solar Drying System, International Journal of Energy Research, 25 (2001) 715-725.
- [33] Toğrul İ. T., Kurutmada Konik Yoğunlaştırıcı Bir Güneş Enerjisi Sisteminin Kullanılması, Doktora Tezi, Fırat Üniv. Kimya Müh. Anabilim Dalı, Elazığ, 2001.
- [34] El-Sebaei A. A., Aboul-Enein S., Ramadan M. R. I., El-Gohary H. G., Experimental Investigation of an Indirect Type Natural Convection Solar Dryer, Energy Conversion and Management 43 (2002) 2251-2266.
- [35] Bala B. K., Mondol M. R. A., Biswas B. K., Chowdury B. L., Janjai S., Solar Drying of Pineapple Using Solar Tunnel Drier, Renewable Energy 28 (2003) 183-190.
- [36] Cao W., Nishiyama Y., Koide S., Thin-Layer Drying of Maitake Mushroom Analysed with a Simplified Model, Biosystems Engineering, 85/3 (2003) 331-337.
- [37] Doymaz İ., Pala M., The Thin-Layer Drying Characteristics of Corn, Journal of Food Engineering 60 (2003) 125-130.
- [38] Toure S., Nkembo S. K., Comparative Study of Natural Solar Drying of Cassava, Banana and Mango, Renewable Energy, 29 (2004) 975-990.
- [39] Karim M. A., Hawlader M. N. A., Development of Solar Air Collectors for Drying Applications, Energy Conversion and Management, 45 (2004) 329-344.
- [40] Tinoumi S., Mihoubi D., Zagrouba F., Simulation Model for a Solar Drying Process, Desalination, 168 (2004) 111-115.
- [41] Erentürk S., Gülaboğlu M. S., Gültekin S., The Thin-Layer Drying Characteristics of Rosehip, Biosystems Engineering, 89/2 (2004) 159-166.
- [42] Resio A. N. C., Aguerre R. J., Suarez C., Drying Characteristics of Amaranth Grain, Journal of Food Engineering, 65 (2004) 197-203.

- [43] Lahsasni S., Kouhila M., Mahrouz M., Jaouhari J. T., Drying Kinetics of Prickly Pear Fruit, *Journal of Food Engineering* 61 (2004) 173-179.
- [44] Mohapatra D., Rao P. S., A Thin Layer Drying Model of Parpoiled Wheat, *Journal of Food Engineering* 66 (2005) 513-518.
- [45] Mohamed L. A., Kouhila M., Jamali A., Lahsasni S., Kechaou N., Mahrouz M., Single Layer Solar Drying Behaviour of Citrus Aurantium Leaves Under Forced Convection, *Energy Conversion and Management*, 46 (2005) 1473-1483.
- [46] Diamante L. M., Munro P. A., Mathematical Modeling of Hot Air Drying of Sweet Potato Slices, *International Journal of Food Science and Technology*, 26 (1991) 99-109.
- [47] Rossello C., Simal S., Berna A., Mulet A., 1992, Simple Mathematical Model to Predict the Drying Kinetics of Potatoes, *J. Agric, Food Science*, 40 (1992) 2374-2378.
- [48] Ratti C., Mujumdar A. S., Solar Drying of Foods: Modelling and Numerical Simulation, *Solar Energy*, 60 (1997) 151-157.
- [49] Zhang Z., Yang S., Liu D., Mechanism and Mathematical Model of Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Materials, *Heat Transfer Asian Research*, 28/5 (1999) 337-351.
- [50] Özdemir M., Devres Y. O., The Thin Layer Drying Characteristic of Hazelnuts During Roasting, *Journal of Food Engineering*, 42 (1999) 225-233.
- [51] Yıldız O., Ertekin C., Uzun H. İ., Mathematical Modeling of Thin Layer Solar Drying of Sultana Grapes, *Energy*, 26 (2001) 457-465.
- [52] Basunia M. A., Abe T., Thin-Layer Solar Drying Characteristics of Rough Rice Under Natural Convection, *Journal of Food Engineering*, 47 (2001) 295-301.
- [53] Panchariya P. C., Popovic D., Sharma A. L., Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process, *Jornal of Food Engineering*, 52 (2002) 349-357.
- [54] Midilli A., Küçük H., Yapar Z., A New Model for Single Layer Drying, *Drying Technology*, 20/7 (2002) 1503-1513.
- [55] Akpınar E. K., Midilli A., Biçer Y., Yıldız C., Thin Layer Drying of Red Pepper, *Journal of Food Engineering*, 59 (2003) 99-104
- [56] Akpınar E. K., Midilli A., Biçer Y., Modelling and Experimental Study on Drying of Apple Slices in a Convective Cyclone Dryer, *Journal of Food Process Engineering*, 26/6 (2003) 515-541.

- [57] Akpınar E. K., Midilli A., Biçer Y., Single Layer Drying Behavior of Potato Slices in a Convective Cyclone Dryer and Mathematical Modeling, *Energy Conv. Mgmt.*, 44/10 (2003) 1689-1705.
- [58] Midilli A., Küçük H., Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Pistachio by Using Solar Energy, *Energy Conversion Management*, 44/7 (2003), 1111-1122.
- [59] Bahnasawy A. H., Shenana M. E., A Mathematical Model of Direct Sun and Solar Drying of Some Fermented Dairy Products, *Journal of Food Engineering* 61 (2004) 309-319.
- [60] Toğrul İ. T., Pehlivan D., Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Some Fruits Under Open-Air Sun Drying Process, *Journal of Food Engineering*, 65 (2004) 413-425.
- [61] Akgün N. A., Doymaz İ., Modelling of Olive Cake Thin-Layer Drying Process, *Journal of Food Engineering*, 68 (2005) 455-461.
- [62] Sacilik K., Keskin R., Elicin A. K., Mathematical Modelling of Solar Tunnel Drying of Thin Layer Organic Tomato, *Journal of Food Engineering*, (2005).
- [63] Günhan T., Demir V., Hancıoğlu E., Hepbaşı A., Mathematical Modelling of Drying of Bay Leaves, *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 1667-1679.
- [64] Akpınar E. K., Determination of Suitable Thin Layer Drying Curve Model for Some Vegetables and Fruits, *Journal of Food Engineering* (2005).
- [65] Doymaz İ., Drying Behaviour of Green Beans, *Journal of Food Engineering* 69 (2005) 161-165.
- [66] Doymaz İ., Drying Characteristics and Kinetics of Okra, *Journal of Food Engineering* 69 (2005) 275-279.
- [67] Dinçer İ., On Energetic, Exergetic and Enviromental Aspects of Drying Systems, *International Journal of Energy Research*, 26 (2002) 717-727.
- [68] Midilli A., Küçük H., Energy and Exergy Analyses of Solar Drying Process of Pistachio, *Energy*, 28 (2003) 539-556.
- [69] Dinçer İ., Şahin A. Z., A New Model for Thermodynamic Analysis of a Drying Process, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47/4 (2004) 645-652.
- [70] Akpınar E. K., Midilli A., Biçer Y., The First and Second Law Analyses of Thermodynamic of Pumpkin Drying Process, *Jornal of Food Engineering*, (2005)
- [71] Akpınar E. K., Midilli A., Biçer Y., Energy and Exergy of Potato Drying Process Via Cyclone Type Dryer, *Energy Conversion and Management*, (2005)

- [72] ASAE, Moisture Measurement-Peanuts, ASAE Standard of ASAE S.410.1. Agr. Eng. Yearbook of Standarts, 1983, 329-331.
- [73] Crank J., The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford,1975.
- [74] McCabe W. L., Smith J. C., Unit Operations of Chemical Engineering, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, 1976.

