



İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doktora / Yüksek Lisans  
Tezlerine Sanayi Desteği Projesi



# GIDA İŞLEMEDE KURUTMA TEKNOLOJİLERİNİN TEMEL İLKELERİ

# IV

"4. Grup Öğütülmüş Tahıl ve Unlu Mamüller Sanayii"  
adına desteklenmiştir



İSTANBUL  
SANAYİ ODASI

Mesrutiyet Caddesi No:62 Tepebaşı 34430 - İstanbul Tel: (0212) 252 29 00 Faks: (0212) 249 50 07 e-posta: kobi@iso.org.tr

İSO Yayın No: 2010/4 ISBN: 978-9944-60-582-3



İSTANBUL  
SANAYİ ODASI



İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi

# Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri



Kısaltılmış Doktora Tezi

**Dr. Gökhan BİNGÖL**  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Gıda Mühendisliği Bölümü  
Maslak-İstanbul

Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı (USDA)  
Tarımsal Araştırma Servisi  
Batı Bölgesel Araştırma Merkezi  
İşlenmiş Ürün Araştırma Birimi  
Albany-California, ABD

**Prof. Dr. Y. Onur DEVRES**  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Gıda Mühendisliği Bölümü  
Maslak-İstanbul

**İSO Yayın No: 2010/4**

**ISBN: 978-9944-60-582-3**

**Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri,**

**İstanbul Sanayi Odası, İstanbul**

**Tasarım ve Uygulama: Mürettebat Reklamcılık**

Tüm Hakları Saklıdır. Bu yayındaki bilgiler ancak kaynak gösterilmek suretiyle kullanılabilir.

Gıdaların kurutulması eski zamanlardan günümüze kadar devam eden; kullanılan enerjinin azaltılması ve kalitenin yükseltilmesi için kendini teknolojik gelişmelere sürekli uyarlamak zorunda olan bir temel işlemdir. Gıda işleminde kurutma, yeni ürün formülasyonlarının tasarlanabilmesine ve aynı zamanda meyve ve sebzelerin raf ömürlerinin uzatılabilmesine imkân vermektedir. Meyve ve sebzeleri gerek küçük gerekse büyük ölçekte kurutmaya başlamadan önce her zaman hatırlanılması gereken soru "amacıma uygun kurutma yöntemini mi seçtim?" olmalıdır. Tek bir kurutma yönteminin tüm gıdalar için ekonomik ve son ürün kalitesi açısından uygun olduğunu söylemek mümkün değildir. Dolayısıyla son ürünün arzu edilen kalite kriterlerine uygun olması ve aynı zamanda da ekonomik olarak üretilebilmesi için farklı ürünlere farklı kurutma işlemleri optimum kurutma parametreleriyle uygulanmalıdır.

Günümüzde birçok kurutma yöntemi mevcut olup, tek başlarına bir ürünün kurutulmasında kullanılabileceği gibi, kimi zaman da beraber kullanımları son ürün kalitesi ve kurutma ekonomisi üzerinde olumlu etkiler vermektedir. Örneğin mikrodalga enerjisinin vakumla birleştirilmesi son ürünün kalite özelliklerini arttırırken, sütün evaporatörlerde konsantre edildikten sonra püskürtmeli kurutucuda kurutulması ekonomik açıdan önemli bir kazanç sağlamaktadır. Bazı durumlarda ise çözeltiye daldırma veya buharla haşlama gibi kurutma öncesi uygulanabilen ön işlemler hem son ürün kalitesini arttırmakta hem de kuruma hızını arttırdığından işlem süresini kısaltmaktadır. Dolayısıyla bu kitabı hazırlarken sadece kurutma yöntemlerinin salt olarak kendilerinden değil, aynı zamanda da farklı yöntemler ile birleştirilerek kullanılmasına özel önem verilmiştir.

Günümüzde küresel olarak artan insan nüfusu ve paralelindeki iyi yaşam beklentileri kısıtlı olan enerji kaynakları üzerine baskı yapmaktadır. Bu ise endüstriyel üretimde enerjinin daha etkin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Enerji kaynaklarını oldukça fazla kullanan kurutma işlemi disiplinlerarası ve oldukça geniş bir çalışma alanıdır. Endüstriyel ölçekte iyi tasarlanmış modern kurutma cihazlarıyla enerjiyi daha etkin kullanmakla beraber daha kaliteli son ürün eldesi de mümkün olmaktadır.

Bu kitabın hazırlanmasında İTÜ Gıda Mühendisliği Bölümü'nde, "Farklı Ön işlemlerin Thompson Çekirdeksiz Üzümlerinin Mikrodalga Yardımlı Konvektif ve Yalnız Konvektif Kurutulması Sırasında Kurutma ve Renk Kinetiği Üzerine Olan Etkilerinin İncelenmesi" adıyla Şubat 2008'de tamamlanan doktora çalışması temel alınmıştır. Kurutma işlemi temel olarak ısı ve kütle transferi olaylarının beraber gerçekleşmesinden oluşmuş temel bir işlem olarak farklı seviyelerdeki gıda mühendisliği kitaplarında yer almaktadır. Ancak kurutma ile ilgili Türkçe kitaplar sınırlıdır. Bu kitabın hedef kitlesi olarak sanayide çalışanlar alınmıştır. Bu nedenle sözkonusu tez bazı noktalarda sadeleştirilmiş, bazı noktalara eklemeler yapılmış ancak genel olarak çok fazla teknik ayrıntının verilmesinden sakınılmıştır. Bununla birlikte okuyucuya rehber olacağı düşünülen ısı ve kütle transferinin temel kavramlarına da gerekli görülen bölümlerde değinilmiştir. Ayrıca dipnotlar eklenerek temel bilgilerin kısaca tanımlanarak, hatırlanmaları sağlanmıştır.

Elinizdeki bu kitapta yer alan kurutma teknolojilerinin her birisi kendi başına bir kitap olabileceğinden, her teknolojinin sadece temel işleyiş mekanizmasından ve literatürdeki uygulamalarından bahsedilmesi uygun görülmüştür. Herbir teknoloji için matematiksel ayrıntılardan kaçınılmış fakat teknolojiye ışık tutacak temel eşitliklere de kitapta yer verilmiştir. Gelecekte daha yaygın olarak kullanılacağı düşünülen mikrodalga ve infrared (kızılötesi) gibi teknolojilere daha fazla değinilirken, geçmişten günümüze varlığını sürdürmüş sıcak hava, güneş enerjisi ile kurutma sistemlerinden de kısaca bahsedilmiştir.

Söz konusu çalışmanın sanayide çalışan mühendislerin yanı sıra, kurutma teknolojilerini çalışmak isteyen lisans ve yüksek lisans seviyesindeki öğrencilere ve ayrıca kurutma teknolojilerini kendi bireysel meraklarından öğrenmek isteyen kişilere de faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu kitap ile Türkiye ve özellikle İstanbul'daki sanayicilere ulaşmamızı sağlayan, doktora çalışmasının desteklenmesinde ve kitabın basımında destek olan İstanbul Sanayi Odası'na içtenlikle teşekkür ederiz.

Dr. Gökhan BİNGÖL  
Dr. Y. Onur DEVRES  
İstanbul, Ekim 2009

Drying of foods is a unit operation that dates back to ancient times and continues to evolve under ever-changing technological advancements, resulting in reduced energy usage and improved quality of the final product. Drying enables the design of new product formulations and at the same time, extends the shelf life of fruits and vegetables. Prior to drying of fruits and vegetables either on an industrial or small scale, it is vital to ask the following question: "Have I selected the most suitable drying method for my objectives?" It is not possible to claim that a single drying method will be sufficient to meet the desired quality and drying economics of all food products; therefore, different drying methods with properly selected drying parameters should be applied to different foodstuffs.

Although there are many drying methods available to dry a particular food commodity, combinations of these methods might improve both final product quality and drying economy. Previous studies have shown that the combination of microwave energy with vacuum improves the quality of the final product. Also, using evaporators prior to spray drying have been shown to increase the concentration of milk, resulting in improvement of the drying economy. In some instances, pretreating fruits and vegetables, such as dipping in chemical solutions or blanching with steam, followed by drying might not only accelerate the drying rate but also improve the final product quality. Therefore, in this book, special attention was given not only to the individual use of drying methods, but also to their combined applications.

Currently, the global increase in population in parallel with high life expectancy puts pressure on already limited energy resources. This serves as a driving force to increase the efficient use of energy in industrial processes. Drying is an energy intensive process. With the aid of well-designed industrial scale dryers, it is possible to both increase energy efficiency as well as to obtain higher final product quality.

This book is based on the PhD dissertation awarded in 2008 in the Food Engineering Department at Istanbul Technical University and titled "The Effects of Different Pretreatments on Drying Rate and Color Kinetics of Convective and Microwave Assisted Convective Drying of Thompson Seedless Grapes". Drying can be regarded as a combination of heat and mass transfer processes and is described at different levels in Food Engineering books. However, there are limited books published in Turkish on drying technology. This book is mainly directed to industrial professionals. Therefore, some of the technical details in the aforementioned PhD dissertation were simplified. However, some parts were expanded in more detail to provide a concrete understanding of the respective topic. Moreover, the fundamentals of heat and mass transfer were mentioned when necessary. In addition, footnotes providing definitions of essential concepts were added to the text.

In this book, each drying technology mentioned could itself be written as a separate book; therefore, it was considered relevant to point out the essential mechanism of each respective technology and its applications that can be found in literature. The mathematics of each technology were not described in detail; however, basic equations pertaining to the respective technology was mentioned. Promising novel drying technologies, such as microwave and infrared drying, were described in relatively more detail compared to technologies that are still more commonly used, such as hot air and sun/solar drying.

This study should be beneficial to engineers working in drying industries, to graduate and undergraduate students who want to study drying technologies and to individuals who want to practice drying technologies due to their personal interests.

We consider it is a privilege to acknowledge the generous support of Istanbul Chamber of Industry, without which the aforementioned PhD dissertation and the publication of this book would not have been possible.

Gökhan BINGÖL, PhD  
Y. Onur DEVRES, PhD  
Istanbul, October 2009



## SUNUŞ

Bu çalışma; İstanbul Sanayi Odası ile İstanbul Teknik Üniversitesi arasında, sanayi-üniversite işbirliğinin geliştirilmesi ve akademik çalışmaların ekonomik kalkınmaya katkısının artırılması amacıyla başlatılan "ISO-İTÜ Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği" projesi kapsamında yayınlanmıştır.

Üniversitede doktora ve yüksek lisans tezlerini yürüten araştırmacıların desteklendiği proje ile, üniversite ve sanayinin gündemini buluşturarak, ticari ürüne dönüştürülen bilimsel araştırma ve patent sayısının artmasına, küresel rekabet gücümüzün gelişmesine katkıda bulunulması hedeflenmektedir.

Proje kapsamında, üniversite'de hali hazırda yürütülen doktora/yüksek lisans tez/tezleri arasından uygun bulunanlar ile Meslek Komitelerimizin sektörel ihtiyaçları doğrultusunda belirlediği konulardaki akademik çalışmalara destek verilmektedir.

İstanbul Sanayi Odası 4. Grup Öğütülmüş Tahıl ve Unlu Mamuller Sanayii Meslek Komitesi adına desteklenen bu çalışmanın sanayinin ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde hayata geçirilmesine yönelik katkılarından dolayı Tez Değerlendirme Komitesi üyelerimiz olan;

Dr. Mehmet Çetin Duruk (İreks Gıda),  
Serdar Sarıgül (Filiz Gıda),  
İbrahim Ethem Bingöl (Hey Gıda),  
Murat Palancı'ya (Malatya Pazarı) teşekkür ediyoruz.

Başta araştırmacı olmak üzere, araştırmacıya danışmanlık yapan öğretim üyesi ve Değerlendirme Komitesi'nin katkılarıyla oluşturulan ve sanayi-üniversite işbirliğinin işlevsel ve somut bir çıktısı olan bu çalışmanın sektöre fayda sağlamasını ümid ediyoruz.

Saygılarımızla,  
İstanbul Sanayi Odası



İÇİNDEKİLER	IX
CONTENTS	XI
GÖSTERİMLER	XIII
ŞEKİL LİSTESİ	XIV
TABLO LİSTESİ	XV
1. GİRİŞ	1
2. KURUTMA SIRASINDA KULLANILAN NEMLİ HAVANIN TERMODİNAMİK (PSİKROMETRİK) ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Standart Atmosfer	3
2.2. Doyma Durumunda Suyun Termodinamik Özellikleri	4
2.3. Havanın İçerdiği Nem ile İlgili Tanımlar	5
2.4. Doyma Durumundaki Nem ile İlgili Tanımlar	6
2.5. Kuru ve Nemli Hava için İdeal Gaz Tanımlamaları	7
2.6. Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Hesaplanması	9
3. BİYOLOJİK MALZEMELERİN KURUTULMASI	11
3.1. Kurutma Sırasında Meydana Gelen Kalite Değişiklikleri	12
3.2. Su Aktivitesi ve Önemi	13
3.3. Kuruma Eğrilerinin Özellikleri	14
3.4. Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi	15
3.5. Difüzyon Teorisi	16
3.6. Matematiksel Modellemenin Kurutma Teknolojileri Açısından Önemi	18
4. KURUTMA ÖNCESİ UYGULANABİLECEK ÖNİŞLEMLER	19
4.1. Biyolojik Malzemelerin Kimyasal Çözeltilere Daldırılması	19
4.2. Biyolojik Malzemelerin Haşlanması	20
5. GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN KURUTUCULAR	23
6. SICAK HAVA İLE KURUTMA SİSTEMLERİ	25
7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİ	31
8. BİYOLOJİK MALZEMELERİN MİKRODALGA İLE İŞLENMESİ	35
8.1. Elektromanyetik Spektrum	35
8.1.1. Elektromanyetik Dalgalar	35
8.1.2. Tanım ve yasalar	36
8.2. Mikrodalga Sistemler	37
8.2.1. Magnetron	37
8.2.2. Dalga Kılavuzu	38
8.2.3. Mikrodalga Aplikatör	38
8.3. Malzemelerin Elektromanyetik Özellikleri	38
8.3.1. Dielektrik malzemelerin polarizasyonu	38

8.3.2. Malzemelerin dielektrik özellikleri	39
8.4. Malzemelerin mikrodalga ile ısınması	41
8.5. Biyolojik malzemelerin mikrodalga-yardımlı kurutulması	43
8.5.1. Biyolojik malzemelerin kuruma esnasındaki ısınma şablonları	43
8.5.2. Mikrodalga kurutmanın avantajları ve kullanımını kısıtlayabilen faktörler	44
8.5.3. Mikrodalga enerjisinin birleşik kullanımı	45
<b>9. BİYOLOJİK MALZEMELERİN INFRARED (KIZILÖTESİ) IŞINIMI İLE İŞLENMESİ</b>	<b>47</b>
9.1. Kızılötesi Isıtmanın Temel Prensipleri	47
9.2. Kızılötesi Isıtıcılar	48
9.3. Kızılötesi Kurutma	49
<b>10. ÖRNEK ÇALIŞMA</b>	<b>51</b>
<b>11. SONUÇ</b>	<b>59</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>61</b>
<b>EK A Nemli Havanın Özelliklerinin Hesaplanmasında Kullanılan Tablolar</b>	<b>69</b>
<b>EK B Nemli Havanın Özelliklerinin Hesaplanması</b>	<b>79</b>
<b>EK C Percy Spencer'nin Mikrodalga Çalışması için Almış Olduğu Patentler</b>	<b>83</b>
<b>İNDEKS</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	
Dr. Gökhan BİNGÖL (Türkçe)	91
Dr. Gökhan BİNGÖL (English)	93
Prof. Dr. Y. Onur DEVRES (Türkçe)	92
Prof. Dr. Y. Onur DEVRES (English)	94

## CONTENTS

<b>CONTENTS</b>	<b>XIII</b>
<b>ABBREVIATIONS</b>	<b>XIV</b>
<b>FIGURE LIST</b>	<b>XV</b>
<b>TABLE LIST</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2. THERMODYNAMIC PROPERTIES (PSYCHROMETRIC) OF HUMID AIR</b>	<b>3</b>
2.1. Standard Atmosphere	3
2.2. Thermodynamic Properties of Saturated Water	4
2.3. Definition of Moisture Content	5
2.4. Definition of Saturated Moisture Content	6
2.5. Ideal Gas Relationship for Dry and Humid Air	7
2.6. Calculation of Thermodynamic Properties of Humid Air	9
<b>3. DRYING OF BIOLOGICAL MATERIALS</b>	<b>11</b>
3.1. Quality Changes during Drying	12
3.2. Water Activity	13
3.3. Properties of Drying Curves	14
3.4. Mathematical Modeling of Drying Curves	15
3.5. Diffusion Theory	16
3.6. Importance of Mathematical Modeling in Drying Technologies	18
<b>4. APPLICABLE PRETREATMENTS PRIOR TO DRYING</b>	<b>19</b>
4.1. Dipping of Biological Materials into Chemical Solutions	19
4.2. Blanching of Biological Materials	20
<b>5. SOLAR DRYING SYSTEMS</b>	<b>23</b>
<b>6. HOT AIR DRYING SYSTEMS</b>	<b>25</b>
<b>7. FREEZE-DRYING SYSTEMS</b>	<b>31</b>
<b>8. MICROWAVE PROCESSING OF BIOLOGICAL MATERIALS</b>	<b>35</b>
8.1. Electromagnetic Spectrum	35
8.1.1. Electromagnetic Waves	35
8.1.2. Definition and regulations	36
8.2. Components of Microwave Ovens	37
8.2.1. Magnetron	37
8.2.2. Waveguide	38
8.2.3. Applicator	38
8.3. The electromagnetic properties of materials	38
8.3.1. Polarization of dielectric materials	38
8.3.2. Dielectric properties of materials	39
8.4. Microwave heating of materials	41

8.5. Microwave-assisted drying of biological materials	43
8.5.1. Heating pattern of biological materials during drying	43
8.5.2. Advantages of microwave drying and factors restricting its applications	44
8.5.3. Combined use of microwave energy	45
<b>9. INFRARED PROCESSING OF BIOLOGICAL MATERIALS</b>	<b>47</b>
9.1. The Principles of Infrared Heating	47
9.2. Infrared Heaters	48
9.3. Infrared Drying	49
<b>10. CASE STUDY</b>	<b>51</b>
<b>11. RESULTS</b>	<b>59</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>61</b>
<b>APPENDIX A Tables Used During Calculation of Psychrometric Properties of Humid Air</b>	<b>69</b>
<b>APPENDIX B Calculation of Psychrometric Properties of Humid Air</b>	<b>79</b>
<b>APPENDIX C Patents Held by Percy Spencer During His Research on Microwave</b>	<b>73</b>
<b>INDEX</b>	<b>89</b>
<b>ABOUT THE AUTHORS</b>	
Gokhan Bingol, PhD	93
Y. Onur Devres, PhD	94

## GÖSTERİMLER

<b>a</b>	: Tablo 3.1'de yer alan eşitliklerdeki sabit
<b>a<sub>1</sub></b>	: Tablo 3.1'de yer alan Wang ve Singh eşitliğindeki sabit
<b>a*</b>	: Yeşil'den kırmızıya değişebilen kromatik renk bileşeni
<b>b<sub>1</sub></b>	: Tablo 3.1'de yer alan Wang ve Singh eşitliğindeki sabit
<b>b*</b>	: Mavi'den sarıya değişebilen kromatik renk bileşeni
<b>c</b>	: Eşitlik 8.3'de ışık hızını temsil etmektedir, $3.0 \times 10^8$ (m/s)
<b>C</b>	: Özgül Isı Kapasitesi (J/kg·K)
<b>CIE</b>	: Comission Internationale d'Eclairage
<b>D<sub>eff</sub></b>	: Efektif Difüzivite (m <sup>2</sup> /s)
<b>d.b.</b>	: Kuru baz
<b>E</b>	: Eşitlik 8.5'de Elektrik Alan (V/m), Eşitlik 9.2'de Toplam Enerji
<b>f</b>	: Frekans (Hz)
<b>h</b>	: Planck's Sabiti, $6.625 \times 10^{-34}$ (J·s) veya Entalpi (J/kg)
<b>h<sub>fg</sub></b>	: Buharlaştırma Entalpisi (J/kg)
<b>HHP</b>	: Yüksek Hidrostatik Basınç
<b>k</b>	: Tablo 3.1'de yer alan eşitliklerdeki sabit, eşitlik 8.9'da Isı İletim Katsayısı (W/m·K)
<b>k<sub>1</sub></b>	: Tablo 3.1'de yer alan eşitliklerdeki sabit
<b>L*</b>	: Lüminisans renk bileşeni
<b>M</b>	: Zamana bağlı Yığın Nem İçeriği (kuru baz)
<b>M<sub>a</sub></b>	: Kuru havanın moleküler ağırlığı (kmol/kg)
<b>M<sub>0</sub></b>	: Başlangıç Nem İçeriği (kuru baz)
<b>M<sub>eq</sub></b>	: Denge Nem İçeriği (kuru baz)
<b>MR</b>	: Nem Oranı
<b>P</b>	: Basınç (Pa)
<b>P<sub>w</sub></b>	: Nemli havadaki su buharı kısmi basıncı (Pa)
<b>P<sub>ws</sub></b>	: Doymuş saf suyun kısmi basıncı (Pa)
<b>P<sub>ws</sub>*</b>	: Yaş termometre sıcaklığında bulunan doymuş saf suyun kısmi basıncı (Pa)
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>T</b>	: Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)
<b>T*</b>	: Yaş Termometre Sıcaklığı (°C)
<b>T<sub>D</sub></b>	: Çiymenme Noktası Sıcaklığı (°C)
<b>W</b>	: Nemli Havanın Nem Oranı (kg / kg kuru hava)
<b>W<sub>s</sub></b>	: Havanın Doyma Noktasındaki Nem Oranı (kg / kg kuru hava)
<b>W<sub>s</sub>*</b>	: Havanın Yaş Termometre Sıcaklığındaki Doyma Noktasındaki Nem Oranı (kg / kg kuru hava)
<b>w.b.</b>	: Yaş Baz

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. VisualBASIC programlama dili kullanılarak geliştirilen Psikrometri programı	10
Şekil 3.1. Su aktivitesine bağlı mikroorganizma gelişimi	13
Şekil 3.2. Kuruma Eğrilerinin Temel Özellikleri	14
Şekil 5.1. Kabinet Tipi Güneş Enerjili Kurutucu	23
Şekil 6.1. Hava ile Kurutma İşlemi	25
Şekil 6.2. Açık Döngü Püskürtmeli Kurutma Sistemi	28
Şekil 7.1. Suyun Faz Diyagramı	32
Şekil 8.1. Elektromanyetik Spektrum	35
Şekil 8.2. Magnetronun yapısı	37
Şekil 8.3. Yüksek Frekanslı Kurutma Sırasındaki Isı Artışı	44
Şekil 10.1. Farklı Hava Sıcaklıklarında Kontrol (K) ve Kabuğu Soyulmuş (KS) Üzümlerin Kuruma Kinetikleri	51
Şekil 10.2. Kontrol (K), çözeltiye daldırılmış (ÇD) (40°C'de 3 dakika), Buharla Haşlanmış (BH) (90°C) ve Kabuğu Soyulmuş (KS) Üzümlerin 60°C Hava Sıcaklığındaki Kuruma Hızları	53
Şekil 10.3. Dahili ve Harici Önışleme Yöntemlerinin Üzümün Kuruma Hızı Üzerindeki Etkisi	54
Şekil 10.4. Kontrol ve Önışlenmiş Üzümlerin Kuruma Esnasında a*-Değerlerindeki Değişim	55
Şekil 10.5. Mikrodalga ve Konvektif Isıtma Profilleri (Birincil Eksen) ve Üzümlerin Kuruma Eğrileri (İkincil Eksen)	56
Şekil 10.6. Buharla Haşlanmış Üzümlerin SEM Resimleri: (a) Mikrodalga yardımcı konvektif kurutma, (b) Konvektif Kurutma.	57
Şekil C.1. Mikrodalga Cihazın Teknik Çizimi	84
Şekil C.2. Gıdaların Mikrodalga ile Isıtılmasında Kullanılabilecek Yöntemler	85



## TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Çeşitli yükseklikler için Standart Atmosfer verileri	4
Tablo 2.2. Sıcaklığa bağlı su buharı doyma basıncının değişik sıcaklık aralıklarında hesaplanması	4
Tablo 2.3. Basınca bağlı su buharı doyma sıcaklığının değişik basınç aralıklarında hesaplanması	4
Tablo 2.4. Nemli havanın yedi ana termodinamik özelliğinin üçlü kombinasyon kümeleri	9
Tablo 3.1. Deneysel Kurutma Verilerini Tanımlamaya Yardımcı Olan İnce-Tabaka Modelleri	16
Tablo 3.2. Çeşitli Gıdaların Efektif Difüzivite Değerleri	17
Tablo 3.3. Kurutma İşlemleri İçin Kullanılabilecek Matematiksel Modeller	18
Tablo 7.1. Sıcak Hava ile Kurutma ve Dondurarak Kurutma Arasındaki Farklar	31
Tablo 7.2. Dondurarak Kurutma işleminde enerji harcaması	33
Tablo 8.1. Bazı Gıdaların Dielektrik Özellikleri ve Mikrodalganın Nüfuz Derinlikleri	40
Tablo 8.2. Bazı Gıdaların Dielektrik Özellikleri ve Mikrodalganın Nüfuz Derinlikleri	40
Tablo 9.1. Gıdalar için İnfrared Emilim Bandları	47
Tablo 9.2. Bazı Ürünlerin Nüfuz Derinliği	49
Tablo 9.3. Patates ve Havuçun Farklı Yöntemler ile Kurutulması Sırasında 1 kg Suyun Buharlaştırılması için Harcanması Gereken Enerji Miktarı (MJ)	49
Tablo 10.1. Kontrol ve Kabuğu Soyulmuş Üzümlerin Farklı Sıcaklıklardaki $L^*a^*b^*$ Değerleri ve Hue Açıları	52
Tablo 10.2: Farklı Metodlarla Önişlenmiş ve 60°C Hava Sıcaklığında Kurutulmuş Üzümlerin $L^*a^*b^*$ Değerleri ve Hue Açıları	53
Tablo A.1: Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Hesaplanması	70
Tablo A.2: Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması	72
Tablo C.1. Percy LeBron Spencer'in Patentlerinin Listesi	87



## 1. GİRİŞ

“Longman Dictionary of Contemporary English”e (1990) göre gıda, yaşayan canlıların enerji sağlamak, gelişmek ve yaşamak için vücutlarına aldıkları madde olarak tanımlanmaktadır. İşleme, depolama ve dağıtım esnasında gıdalar fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak birçok değişime uğramaktadırlar (Karel, 1991). Bunun sonucunda yapı ve renkte değişimlere neden olmaktadır. Ayrıca aroma maddelerinin bozulması ve besin maddelerinin indirgenmesi gibi istenmeyen biyokimyasal reaksiyonlar da ortaya çıkabilmektedir (Ratti, 2001).

Onsekizinci yüzyılda sebzelerin kurutulması, kaydedilmiş ilk sanayi tipi gıda kurutmasıdır. Bundan sonra kurutma endüstrisindeki gelişmeler ortaya çıkan savaşlar ile paralellik göstermiştir. İngiliz askerleri Kırım'da (1854-1856) vatanlarından gönderilen kurutulmuş sebzeleri kullanmışlar; Boer Savaşı (1899-1902) esnasında Kanada'da kurutulmuş sebzeler Güney Afrika'ya nakledilmiş ve I. Dünya Savaşı sırasında 4500 ton dehidre edilmiş gıda (taze fasulye, lahana, havuç, patates, ıspanak, mısır, turp ve çorba karışımları) Birleşik Devletler'den Avrupa'ya gönderilmiştir (Vega-Mercado ve ark. 2001).

Kurutma bozulmaya neden olan mikroorganizmaların ve kimyasal reaksiyonların durdurulduğu veya yavaşlatıldığı bir işlemdir. Kurutulmuş ve dehidre edilmiş terimleri aynı anlamda değildirler. ABD Tarım Bakanlığı dehidre edilmiş ürünleri %2.5'dan (kuru bazda) daha fazla su içermeyen gıdalar sınıfına koyarken, kurutulmuş gıdaları ise %2.5'dan daha fazla su içerenler arasında gruplamıştır (Ratti, 2001).

Kurutma işlemine başlamadan önce tüm meyve ve sebzeler temiz suda yıkanmalı ve zarar görmüş veya bozulmuş olanları uzaklaştırılmalıdır. Üzüm ve çilek gibi küçük meyveler kesilmeden kurutulabilir fakat çoğu sebze ile mango, ananas ve elma gibi daha büyük meyveler kurutulmadan önce soyulmalı, ayıklanmalı ve kuruma yüzeyini arttırmak ve difüzyon mesafesini azaltmak için, örnek olarak küp şeklinde kesilmelidirler (Esper ve Mühlbauer, 1998)

Evranuz (1998)'e göre kurutma işleminin amaçları genel olarak,

1. Gıda maddesinin dayanma süresini uzatmak,
2. Ürün hacminin küçültülmesi ile depolama ve taşımada ekonomi sağlamak,
3. Yeni ürün formülasyonları geliştirmek şeklinde sıralanabilir.

Kurutma teknolojisi güneş enerjili sistemlerden, fırın kurutucular, tünel kurutucular, püskürtmeli kurutucular, tepsili kurutucular, silindir kurutucular, mikrodalga, infrared (kızılötesi), ekstrüzyon ve daha birçoklarını içeren güncel teknolojilere kadar gelişmiştir (Ratti, 2001). Kurutma işleminin asıl amacının daha hızlı kurutmak değil, daha iyi kalitede bir ürün elde etmek olduğu tüm uygulamalar sırasında dikkate alınmalıdır (Esper ve Mühlbauer, 1998). Bu nedenle son yıllarda kurutma işlemi sırasında kalite kaybının mümkün olduğunca az tutulması, son üründeki kalite beklentilerinin yükseltilmesi, enerji verimliliği gibi nedenlerden dolayı kurutma yöntemlerinden uygun olanları birlikte de kullanılabilirler. Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde fırın, tünel, püskürtmeli kurutucuların mikrodalga ile desteklendiği; mikrodalga ile kızılötesi yöntemlerinin birarada kullanıldığı araştırmaların sayısında artış gözlenmektedir. Diğer taraftan son yıllarda enerji tasarrufu, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik önlemler de alınmaya başlanmıştır. Bu kapsamda atmosfere daha az gaz salan teknolojiler, bazı durumlarda daha pahalı olmasına rağmen tercih edilmeye başlanmıştır. Türk Gıda Sanayi'nin de bu yenilikleri izleyeceği, kullandıkları kurutma teknolojilerinde iyileştirmeler yapacağı şüphesizdir. Bu değerlendirmelerin ışığında yatırım aşamasında uygun teknolojilerin seçilmesi, ekonomi ve çevre açısından herkesin çıkarınadır.



## 2. KURUTMA SIRASINDA KULLANILAN NEMLİ HAVANIN TERMODİNAMİK (PSİKROMETRİK) ÖZELLİKLERİ

### 2. KURUTMA SIRASINDA KULLANILAN NEMLİ HAVANIN TERMODİNAMİK (PSİKROMETRİK) ÖZELLİKLERİ

Psikrometri konusu kapsamında nemli havanın termodinamik özelliklerinin saptanması ve bu özelliklerinden yararlanarak nemli havanın kullanıldığı işlemlerin ve koşulların analizi yapılmaktadır. Kurutma işlemi sırasında ürün neminin aktarıldığı ortam hava olmaktadır. Havanın nem alma kapasitesi ise birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı bu bölüm kapsamında etkin bir kurutma için havanın psikrometrik özelliklerinin hesaplanması üzerinde durulacaktır.

Atmosferik hava, çok sayıda gaz bileşenin yanı sıra su buharı ile çeşitli kirletici maddelerden (duman, polen ve kirliliğin kaynağından uzak noktalarda normalde havada bulunmayan gazlar) oluşmaktadır.

Kuru hava tanımı ile içinde bulunan tüm su buharı ve kirleticiler uzaklaştırılmış hava belirtilmektedir. Yapılan çok sayıda ölçümler sonucunda kuru hava içeriğinin zaman, coğrafi yerleşim ve yüksekliğe göre küçük değişimler göstermesine rağmen genelde sabit olduğu saptanmıştır. Hacimsel olarak kuru havanın içeriği %78.084 azot, %20.9476 oksijen, %0.934 argon, %0.0314 karbondioksit, %0.001818 neon, %0.000524 helyum, %0.0002 metan, %0-0.0001 sülfürdioksit, %0.00005 hidrojen, %0.0002 kadar kripton, xenon ve ozon gibi gazlardan oluşmaktadır. Kuru havanın moleküler ağırlığı 28.9645 (kmol/kg) ve gaz sabiti ise  $R=287.055$  (J/kg K) olarak bilinmektedir (ASHRAE, 1981a).

Nemli hava ise, kuru hava ve su buharından oluşan ikili bir karışım olmaktadır. İçindeki su buharı miktarı sıfır (kuru hava) ile sıcaklığa ve basınca bağlı olarak değişen bir maksimum değer arasında değişmektedir. Maksimum su buharı içeriği ile doyma durumu tanımlanmakta ve nemli hava ile yoğuşmuş su fazı arasındaki denge durumu belirtilmektedir. Suyun moleküler ağırlığı 18.01534 (kmol/kg), su buharının gaz sabiti de  $R=461.52$  (J/kg K)'dir (ASHRAE, 1981a)

#### 2.1. Standart Atmosfer

Yukarıda da belirtildiği gibi, atmosferik havanın sıcaklığı ve basıncı yüksekliğe bağlı olarak değişebildiği gibi, coğrafi yerleşim ve hava koşullarına bağlı olarak da farklılıklar gösterebilmektedir. Standart atmosfer tanımı ile havayı iş gören akışkan olarak kullanan mühendislerin, değişik yüksekliklerdeki havanın özelliklerini belli bir standart çerçevesinde hesaplamalarına olanak sağlanması amaçlanmıştır. Deniz seviyesinde standart sıcaklık 15°C ve standart barometrik basınç 101.325 (kPa) olarak alınmaktadır. Troposfer (alt atmosfer) boyunca sıcaklığın lineer olarak stratosferin alt kademelerinde sabit olacak şekilde azaldığı; alt atmosferin, ideal gaz olarak davranan kuru havadan oluştuğu kabul edilmektedir. Yerçekimi ivmesi de 9.807 (m/s<sup>2</sup>) olarak sabit alınmaktadır. Tablo 2.1'de 0 ile 10 000 m yükseklikler arasındaki sıcaklık ve basınç değerleri verilmiştir (ASHRAE, 1981a).

Yükseklik (m)	Sıcaklık (°C)	Basınç (Pa)
-500	18.2	107 478
0	15.0	101 325
500	11.8	95 461
1000	8.5	89 874
2000	2.0	79 495
3000	-4.5	70 108
4000	-11.0	61 640
5000	-17.5	54 020
6 000	-24.0	47 181
7 000	-30.5	41 061
8 000	-37.0	35 600
9 000	-43.5	30 742
10 000	-50.0	26 436

Tablo 2.1. Çeşitli yükseklikler için Standart Atmosfer verileri

## 2.2. Doyma Durumunda Suyun Termodinamik Özellikleri

Nemli havanın termodinamik özelliklerinin saptanabilmesi için öncelikle doyma durumundaki suyun basınç ve sıcaklığının bilinmesi gerekmektedir. Tablo 2.2'de doyma durumundaki suyun -100°C ile 200°C aralığındaki sıcaklığı bilindiğinde doyma basıncının, Tablo 2.3'de ise 1 ile 1 555 099 Pa aralığındaki doyma basıncı bilindiğinde buna karşılık gelen sıcaklığın hesaplanması ile ilgili eşitlikler verilmiştir. Eşitliklerin elde edilmesi sırasında ASHRAE (1981b)'nin verileri en küçük kareler yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve değişik aralıklar için polinomal eşitlikler elde edilmiştir (ASHRAE, 1981b; Devres, 1989; Devres, 1994). Tablo 2.2'de  $\alpha = A \cdot T^2 + B \cdot T + C + D \cdot T^{-1}$ , T (K) ve  $p_{ws} = 1000 \cdot \exp(\alpha)$ ,  $p_{ws}$  (Pa) olarak hesaplanırken, Tablo 2.3'de  $T = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K$ , T (K),  $\beta = \ln(p_{ws})$ ,  $p_{ws}$  (Pa) şeklinde hesaplanmalıdır.

	S I C A K L I K (K)				
	$213.15 \leq T < 273.15$	$273.15 \leq T < 322.15$	$322.15 \leq T < 373.15$	$373.15 \leq T < 423.15$	$423.15 \leq T < 473.15$
A	$-0.7297593707 \cdot 10^{-5}$	$+0.1255001965 \cdot 10^{-4}$	$+0.1246732157 \cdot 10^{-4}$	$+0.1204507646 \cdot 10^{-4}$	$+0.1069730183 \cdot 10^{-4}$
B	$+0.5397420727 \cdot 10^{-2}$	$-0.1923595289 \cdot 10^{-1}$	$-0.1915465806 \cdot 10^{-1}$	$-0.1866650553 \cdot 10^{-1}$	$-0.1698965754 \cdot 10^{-1}$
C	$+0.2069880620 \cdot 10^{+2}$	$+0.2705101899 \cdot 10^{+2}$	$+0.2702388315 \cdot 10^{+2}$	$+0.2683629403 \cdot 10^{+2}$	$+0.2614073298 \cdot 10^{+2}$
D	$-0.6042275128 \cdot 10^{+4}$	$-0.6344011577 \cdot 10^{+4}$	$-0.6340941639 \cdot 10^{+4}$	$-0.6316972063 \cdot 10^{+4}$	$-0.6220781230 \cdot 10^{+4}$

Tablo 2.2. Sıcaklığa bağlı su buharı doyma basıncının değişik sıcaklık aralıklarında hesaplanması

	B A S I N Ç (Pa)				
	$1 \leq p < 611$	$611 \leq p < 12350$	$12350 \leq p < 101420$	$101420 \leq p < 476207$	$476207 \leq p < 1555099$
E	$+0.1004926534 \cdot 10^{-2}$	$+0.5031062503 \cdot 10^{-2}$	$+0.1209512517 \cdot 10^{-4}$	$+0.2467291016 \cdot 10^{-1}$	$+0.2748402484 \cdot 10^{-4}$
F	$+0.1392917633 \cdot 10^{-2}$	$-0.8826779380 \cdot 10^{-1}$	$-0.3545542105 \cdot 10^{+0}$	$-0.9367112883 \cdot 10^{+0}$	$-0.1068661307 \cdot 10^{+1}$
G	$+0.2815151574 \cdot 10^{+0}$	$+0.1243688446 \cdot 10^{+1}$	$+0.5020858479 \cdot 10^{+1}$	$+0.1514142334 \cdot 10^{+2}$	$+0.1742964962 \cdot 10^{+2}$
H	$+0.7311621119 \cdot 10^{+1}$	$+0.3388534296 \cdot 10^{+1}$	$-0.2050301050 \cdot 10^{+2}$	$-0.9882417501 \cdot 10^{+2}$	$-0.1161208532 \cdot 10^{+3}$
K	$+0.2125893734 \cdot 10^{+3}$	$+0.2150077993 \cdot 10^{+3}$	$+0.2718585432 \cdot 10^{+3}$	$+0.4995092948 \cdot 10^{+3}$	$+0.5472618120 \cdot 10^{+3}$

Tablo 2.3. Basınca bağlı su buharı doyma sıcaklığının değişik basınç aralıklarında hesaplanması

### 2.3. Havanın İçerdiği Nem ile İlgili Tanımlar

Havanın içinde bulunan nem miktarı işlemin tasarlanması sırasındaki hesaplamalarda önem taşımaktadır. Konu ile ilgili değerlendirmelerin daha sağlıklı yapılabilmesi için geliştirilen tanımlamalar aşağıda sunulmuştur (ASHRAE, 1981a).

*Nem oranı (W)* : Ele alınan kuru hava ve su buharından oluşan karışım içindeki su buharı kütlesinin, o karışım içindeki kuru hava kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Aynı ifade bazı kaynaklarda nem içeriği ya da karışım oranı olarak da tanımlanmaktadır.

$$W = \frac{m_w}{m_a} \quad (2.1)$$

*Mol oranı (x<sub>i</sub>)* : Karışım içindeki (i) bileşenin mol sayısının (n<sub>i</sub>), o karışımı oluşturan tüm bileşenlerin mol sayıları toplamına (n) oranı, söz konusu bileşenin mol oranını (x<sub>i</sub>) vermektedir. Kuru havanın mol oranı x<sub>a</sub>, su buharının nem oranı x<sub>w</sub>, doyma durumundaki su buharının mol oranı x<sub>ws</sub> ile gösterilmektedir. Nemli hava için, x<sub>a</sub>+x<sub>w</sub>=1 olmaktadır. Yukarıda tanımlanan nem oranı aynı zamanda, kuru hava ve su buharı mol oranlarının moleküler ağırlıkları ile çarpımlarının birbirlerine oranına da eşit olmaktadır.

$$W = \frac{M_w}{M_a} \frac{x_w}{x_a} = \frac{18.01534}{28.9645} \frac{x_w}{x_a} = 0.62198 \frac{x_w}{x_a} \quad (2.2)$$

*Özgül nem (q)* : Karışım içindeki su buharı kütlesinin, toplam nemli hava kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$q = \frac{m_w}{m_w + m_a} \quad (2.3)$$

Nem oranı ile aynı eşitlik tanımlanırsa,

$$q = \frac{W}{1 + W} \quad (2.4)$$

elde edilmektedir.

*Mutlak nem (d<sub>v</sub>)* : Karışım içindeki su buharı kütlesinin, o karışımın toplam hacmine oranı olmaktadır. Bazı kaynaklarda su buharı yoğunluğu olarak da raslanılmaktadır.

$$d_v = \frac{m_w}{V} \quad (2.5)$$

**Yoğunluk ( $\rho$ )** : Karışımın toplam kütesinin toplam hacime oranı, o karışımın yoğunluğunu vermektedir.

$$\rho = \frac{m_a + m_w}{V} \quad (2.6)$$

#### 2.4. Doyma Durumundaki Nem ile İlgili Tanımlar

İşlem sırasında nemli havanın doyma durumunun dikkate alındığı ya da karşılaştırıldığı koşullar için aşağıda verilen tanımlamalar geliştirilmiştir (ASHRAE, 1981a).

**Doyma nem oranı ( $W_s$ )** : Aynı sıcaklık ve basınçtaki suya bağlı olarak doyma durumuna geçen nemli havanın içerdiği nem olarak tanımlanmaktadır.

**Doyma derecesi ( $\mu$ )** : Aynı sıcaklık ve basınçtaki doymuş havanın nem oranı  $W_s$  ile havanın nem oranı  $W$  arasındaki oran olmaktadır.

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{T,p} \quad (2.7)$$

**Bağıl nem ( $\phi$ )** : Ele alınan nemli hava kütesindeki su buharının mol oranı  $x_w$ 'nin aynı sıcaklık ve basınçtaki doyma durumundaki nemli hava kütesindeki su buharının mol oranı  $x_{ws}$ 'e oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \Big|_{T,p} \quad (2.8)$$

Aynı ifade daha önceki bilgilerden yararlanarak,

$$\phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \cdot x_{ws}} \quad (2.9)$$

şeklinde de yazılabilmektedir.

**Çiylenme noktası sıcaklığı ( $T_d$ )** : Ele alınan nemli hava kütesinin, aynı nem oranı  $W$  ile aynı basınçta doyma durumuna geçtiği andaki sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır.

$$W_s(p, T_d) = W \quad (2.10)$$

**Yaş termometre sıcaklığı ( $T^*$ )** : Söz konusu kuru termometre sıcaklığı  $T$  ve nem oranı  $W$ 'de bulunan havanın, basınç sabit kalmak üzere nem verilerek adyabatik olarak doyma durumuna getirilmesi sırasında elde edilen sıcaklığa yaş termometre sıcaklığı adı verilmektedir.



## 2.5. Kuru ve Nemli Hava için İdeal Gaz Tanımlamaları

Nemli hava, birbirinden bağımsız iki ideal gazın karışımı olarak ele alındığında, her birinin ayrı ayrı ideal gaz kanununa uyduğu kabul edilmektedir (ASHRAE, 1981a) :

$$\begin{aligned} p_a \cdot V &= n_a \cdot R \cdot T \\ p_w \cdot V &= n_w \cdot R \cdot T \end{aligned} \quad (2.11)$$

burada  $p_a$  kuru havanın kısmi basıncı,  $p_w$  su buharının kısmi basıncı,  $V$  karışımın toplam hacimi,  $n_a$  kuru havanın mol sayısı,  $n_w$  su buharının mol sayısı,  $R$  genel gaz sabiti ( $=8.31441 \text{ J/gmol}\cdot\text{K}$ ) ve  $T$  mutlak sıcaklık olmaktadır. Kuru hava ve su buharından oluşan karışım da ideal gaz kanununa uymaktadır:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.12)$$

veya,

$$(p_a + p_w) \cdot V = (n_a + n_w) \cdot R \cdot T \quad (2.13)$$

olmaktadır. Kuru hava ve su buharının nem oranları :

$$x_a = \frac{p_a}{p_a + p_w} = \frac{p_a}{P} \quad (2.14)$$

$$x_w = \frac{p_w}{p_a + p_w} = \frac{p_w}{P} \quad (2.15)$$

olarak yazılabilmektedir. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak nem oranı  $W$  ile doyma nem oranı  $W_s$  aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir. Eşitlikte kullanılan  $p_{ws}$ , verilen  $T$  sıcaklığındaki suyun doyma basıncı olmaktadır.

$$W = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (2.16)$$

$$W_s = 0.62198 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \quad (2.17)$$

Bağıl nem ile ilgili tanımdan yararlanarak,

$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \Big|_{T,p} = \frac{P_w}{P_{ws}} \Big|_{T,p} = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \cdot (P_{ws} / p)} \quad (2.18)$$

yazılabilmektedir. Hem  $\phi$  hem de  $\mu$  değerleri kuru hava için sıfır, doymuş nemli hava için 1 olmaktadır. Ara değerler ise, özellikle yüksek sıcaklıkta birbirlerinden farklı olmaktadır.

*Entalpi (h)* : Bir karışımın entalpisi, o karışımı oluşturan her bir elemanın entalpileri toplamına eşit olmaktadır. Bu nedenle nemli havanın entalpisi,

$$h = h_a + W \cdot h_g \quad (2.19)$$

olarak yazılabilmektedir. Burada  $h_a$  kuru havanın,  $h_g$  ise karışımın sıcaklığında bulunan doymuş su buharının özgül entalpisini göstermektedir. Bu değerler yaklaşık olarak,

$$\begin{aligned} h_a &= T \text{ (kJ / kg)} \\ h_g &= 2501 + 1.805 \cdot T \text{ (kJ / kg)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada T (°C) havanın kuru termometre sıcaklığı olmaktadır. Böylelikle nemli havanın entalpisi,

$$h = T + W \cdot (2501 + 1.805 \cdot T) \text{ (kJ / kgKH)} \quad (2.21)$$

şeklini almaktadır. Entalpi aynı zamanda yaş termometre sıcaklığı ile ilgili tanımlardan yararlanarak,

$$h = h_s^* - (W_s^* - W) \cdot h_w^* \quad (2.22)$$

olarak da ifade edilebilmektedir. Termodinamik yaş termometre sıcaklığında bulunan suyun entalpisi aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$h_w^* = 4.186 \cdot T^* \text{ (kJ / kg)} \quad (2.23)$$

## 2.6. Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Hesaplanması

Nemli havanın işgören akışkan olarak kullanıldığı kurutma, iklimlendirme ve soğuk muhafaza gibi işlemlerde nemli havanın termodinamik özellikleri ile ilgili bilgilere ihtiyaç bulunmaktadır. Genel olarak bu bilgiler yukarıda verilen eşitliklerden ya da daha önceden belirli toplam basınç ya da yükseklik (genellikle deniz seviyesi) için hazırlanmış şekil ve tablolardan yararlanarak elde edilebilmektedir. Bu işlem için iki özelliğin bilinmesi, diğer özelliklerin saptanması için yeterli olmaktadır. Bununla birlikte deniz seviyesinden farklı bir yerde inşa edilecek bir tesisin hesaplamaları sırasında, piyasada kolaylıkla bulunabilen deniz seviyesi için hazırlanmış çizelgelerden yararlanılması ileride bir takım problemlere yol açabilecektir. Bunun önüne geçmenin en kolay yolu ideal gaz kanunu ile geliştirilen yukarıdaki eşitlikler olmasına rağmen, uzun hesaplamalar açısından pratikte bir takım uygulama problemleri bulunmaktadır. Uzun hesaplamaların ve gerekiyorsa iterasyonların bilgisayar ortamında yapılması uygulamaya çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Devres, 1994).

Nemli havanın termodinamik özelliklerini yedi ana başlık altında toplayabiliriz : Kuru ve yaş termometre ile çiylenme noktası sıcaklıkları, atmosferik basınç (nemli havanın toplam basıncı), nem oranı, bağıl nem ve entalpi (ASHRAE, 1981a; Devres, 1994). Gibbs Faz Kuralı'na göre azot, oksijen ve su buharından oluştuğu kabul edilen bir sistemin serbestlik derecesi dört olmaktadır. Uygulama kolaylığı açısından oksijen ile azot arasındaki kütle oranları sabit kabul edildiğinde, söz konusu serbestlik derecesi üçe düşmektedir (Agrawal ve Rao, 1974). Böylelikle herhangi üç özellik bilindiği takdirde, diğer özelliklerin hesaplanması mümkün olabilecektir. Yukarıda verilen yedi ana özelliğin üçlü kombinasyon kümeleri oluşturulduğunda ortaya 35 ayrı olasılık çıkmaktadır. Bu kümeler Tablo 2.4'de sunulmuştur.

1	T	T*	T <sub>D</sub>	2	T	T <sub>D</sub>	P	3	T	P	W	4	T	W	φ	5	T	φ	h
6	T	T*	P	7	T	T <sub>D</sub>	W	8	T	P	φ	9	T	W	h				
10	T	T*	W	11	T	T <sub>D</sub>	φ	12	T	P	h								
13	T	T*	φ	14	T	T <sub>D</sub>	h												
15	T	T*	h																
16	T*	T <sub>D</sub>	P	17	T*	P	W	18	T*	W	φ	19	T*	φ	h				
20	T*	T <sub>D</sub>	W	21	T*	P	φ	22	T*	W	h								
23	T*	T <sub>D</sub>	φ	24	T*	P	h												
25	T*	T <sub>D</sub>	h																
26	T <sub>D</sub>	P	W	27	T <sub>D</sub>	W	φ	28	T <sub>D</sub>	φ	h								
29	T <sub>D</sub>	P	φ	30	T <sub>D</sub>	W	h												
31	T <sub>D</sub>	P	h																
32	P	W	φ	33	P	φ	h												
34	P	W	h																
35	W	φ	h																

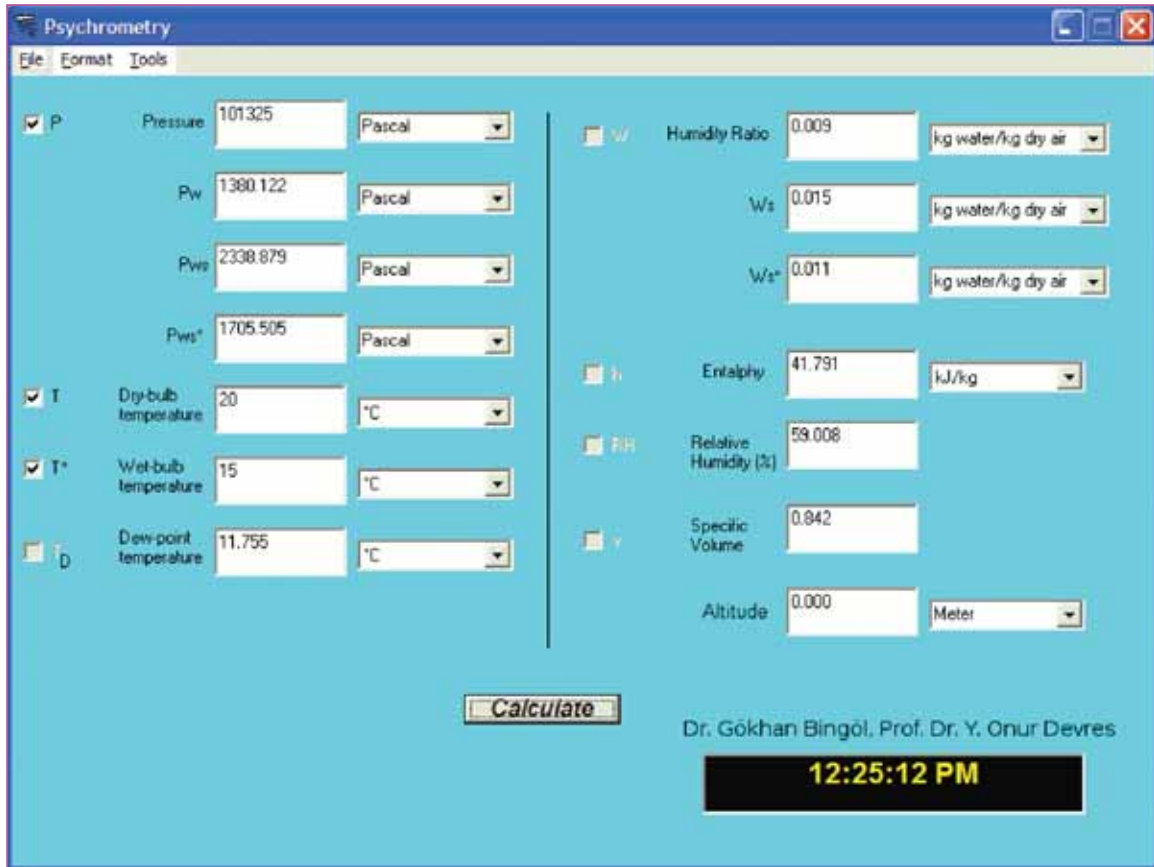
T	Kuru termometre sıcaklığı
T*	Yaş termometre sıcaklığı
T <sub>D</sub>	Çiylenme noktası sıcaklığı
P	Basınç
W	Nem oranı
φ	Bağıl nem
h	Entalpi

Tablo 2.4. Nemli havanın yedi ana termodinamik özelliğinin üçlü kombinasyon kümeleri (Devres, 1994)

Tablo 2.4'de verilen her bir olasılık için çözüm yollarının sunulması için (Devres, 1994) tüm eşitlikler EK A'da verilen Tablo A.1'de toplanmış ve sonrasında bu eşitlikler kullanılarak elde edilen çözüm yolları Tablo A.2'de tanımlanmıştır. Tablo A.1'in ikinci sütununda verilen özelliğin hesaplanması için üçüncü sütunda belirtilen özellik/özelliklerin bilinmesi yeterli olmaktadır. Tablo A.2'de ise o an için bilinenler kullanılarak adım adım bilinmeyenler elde edilmektedir. Bu sırada bazı durumlarda sonuca doğrudan ulaşırlarken, çoğu durumda çözüm ancak sayısal analiz yöntemleri ile elde edilebilmektedir.

Nemli havanın termodinamik özelliklerinin hesaplanması için geliştirilen bilgisayar programında 35 ayrı olasılıktan 32'sinin çözümü elde edilmiştir. Tablo A.2'de verilen 9, 11 ve 26 nolu kombinasyonlarda, bilinen özellikler aynı eşitlik içinde bulunduğundan, geri kalan eşitlikler çözüme olanak sağlayamamaktadırlar.

Bilgisayar programı ilk olarak FORTRAN ve daha sonra görselliği ve kullanım kolaylığını arttırmak için VisualBASIC (Şekil 2.1) kullanılarak geliştirilmiştir. Programa girilen herhangi üç bağımsız özellik ile diğer özelliklerin istenilen birimlerde elde edilmesi mümkündür. Şekil 2.1'de sadece basınç, kuru ve yaş termometre sıcaklıkları seçilerek, çiylenme noktası sıcaklığı, mutlak ve bağıl nem, entalpi ve özgül hacim değerlerinin yanı sıra, doyma basıncı ve nemi ve girilen basınca göre Tablo 2.1 kullanılarak hesaplanan yükseklik değerini de elde etmek mümkündür. Programa ayrıca ek olarak yazılan birim çevirme ve farklı gazlar için geliştirilen buhar tablosu okuma alt programlarına da menüler aracılığıyla ulaşmak mümkündür.



Şekil 2.1. VisualBASIC programlama dili kullanılarak geliştirilen Psikrometri programı

Çözüm sırasında, çözümü mümkün olan 32 ayrı olasılıktan 21'inde sayısal analiz yöntemleri kullanılmış, 3'ünde ise ikinci dereceden denklem çözümü ile sonuca ulaşılmıştır. Tüm çözümlerde özellikler oldukça küçük hatalar ile saptanmıştır. Özellikle basıncın bilinmediği bazı durumlarda %0.5 mertebelerindeki hatalar ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak nemli havanın termodinamik özelliklerinin, genelde deniz seviyesi için geliştirilen psikrometrik tablolardan bulunması yerine bilgisayar yardımı ile hesaplanması işlem hassasiyetini artıracak, tesisin işletilmesi sırasında çıkabilecek problemleri azaltacaktır. Tabloların kullanılması ile ilgili örnek çözümler EK B'de verilmiştir.

### 3. BİYOLOJİK MALZEMELERİN KURUTULMASI

#### 3. BİYOLOJİK MALZEMELERİN KURUTULMASI

Endüstriyel temel işlemlerin daha iyi tasarlanabilmesi için ısı ve kütle transferi olaylarının daha iyi bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Isı ve kütle transferini içeren temel işlemler ile genel olarak kurutma, evaporasyon (buharlaştırma) ve distilasyon operasyonlarında karşılaşılmaktadır (Geankoplis, 1993).

Kurutma işleminin geçmişinin tam olarak ne zaman başladığı bilinmemektedir. Fakat tarihsel kayıtlar bize eski insanların gıdaları kurutmayı deneme ve yanılma ile öğrendiğini göstermektedir. İlk insanlar soğuk ve zorlu kış günleri için çeşitli ürünleri güneşte veya ıste kurutmuşlardır. Bu sırada et, balık, meyve ve sebze önde gelen ürünler olmuşlardır. Gıda kurutmasının bilimsel bir temele dayalı olarak gelişmesi dünya çapında endüstrilerin kurulmasına olanak sağlamıştır (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996).

Kurutma veya dehidrasyon, katı maddelerden su gibi buharlaşabilen maddelerin mikroorganizma gelişimini ve/veya kimyasal reaksiyonları yavaşlatmak ve/veya durdurmak amacıyla uzaklaştırılması işlemidir. Kurutulmuş bir gıda uzun raf ömrünün yanı sıra ağırlığının azalmasından da dolayı nakliye işlemlerindeki maliyeti de azaltmaktadır (Geankoplis, 1993; Cohen ve Yang, 1995).

Eskiden beri süregelen ve günümüzde de yaygın olarak kullanılan kurutma tekniklerinden birisi de sıcak hava ile ürünün kurutulmasıdır. Ürün içinde bulunan nemin buharlaştırılması için gerekli olan gizli ısı<sup>1</sup> hava tarafından sağlanır ve buharlaşan nem üründen hava vasıtasıyla uzaklaştırılır. Hava ile ürün arasında ısı ve nem transferi aynı anda gerçekleşir ve bu şekilde ürünün nemi ve dolayısıyla su aktivitesi<sup>2</sup> azaltılır (Ramaswamy ve Marcott, 2006). Nem transferi sırasında etkili olan büyüklük hava ile ürünün yüzeyi arasındaki su buharı kısmi basınçları arasındaki farktır.

Biyolojik bir malzemenin kurutma sonrası kalitesi, kurutma sırasında meydana gelen biyokimyasal ve fiziksel değişimler ile anlaşılabilir. Kurutma süresi, sıcaklığı ve su aktivitesi son ürünün kalitesi üzerinde etkili olmaktadır. Düşük kurutma sıcaklığı son ürünün kalitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmasına karşın kurutma süresini uzatmaktadır. Diğer taraftan yüksek kurutma sıcaklığı kurutma süresini azaltmasına rağmen, çok yüksek seçildiğinde yüzeyin hızla nem kaybederek kabuk bağlaması sonucu ürünün kuruma süresinin uzamasına da neden olabilmektedir. Düşük su aktivitesine sahip son üründe mikroorganizma gelişmesi engellenmekte fakat lipid oksidasyon reaksiyonları hızlanmaktadır (Franzen, 1988).

Biyolojik bir malzemenin kurutma sonrası saklama stabilitesi su aktivitesi düştükçe artmakta ve düşük sıcaklıkta kurutulmuş ürünler daha iyi saklama stabilitesine sahip olmaktadır. Lipid içeren gıdalar düşük su aktivitesinde oksidasyona duyarlı olduğundan, bu tip ürünler kurutmadan sonra oksijen geçirgenliği düşük paketlerde muhafaza edilmelidirler (Okos ve ark., 2007).

King (1974) kurutma işleminde başarılı olabilmek için aşağıdaki hususların sağlanması gerektiğini belirtmiştir:

#### 1. Ürün kalitesi

- Minimum kimyasal ve biyokimyasal bozulma reaksiyonları,
- Ürün yapısının muhafazası,
- Suyun, aroma ve tat gibi uçucu malzemeleri etkilemeden seçici olarak uzaklaştırılması.
- Son ürünün arzulan renkte olması,
- Hızlı ve basit rehidrasyon,
- Kurutma sırasında kontaminasyon (mikrobiyal bulaşma) olmaması.

<sup>1</sup> Suyun sıvı evresinden buhar evresine geçmesi için gerekli ısı. Deniz seviyesinde 2257 kJ/kg ya da 539.4 kcal/kg'dir.

<sup>2</sup> Su aktivitesi: Gıdanın buhar basıncının (p), saf suyun buhar basıncına (p<sub>0</sub>) oranına su aktivitesi adı verilir. Ayrıca gıdayı çevreleyen ortamın denge bağıl nemine (ERH) oranı olarak da tanımlanabilmektedir. Saf distile suyun su aktivitesi değeri 1'dir. Su aktivitesi 0.6 olan bir ürün, bağıl nemi %70 olan nemli hava ile temasa geçtiğinde havadan nem alır.

## 2. Kurutma ekonomisi

- Minimum ürün kaybı,
- Suyun hızlı uzaklaştırılması (kurutma ekipmanının birim miktarından yüksek kapasite eldesi),
- Ucuz enerji kaynağı,
- Karmaşık olmayan kurutma cihazı (güvenilirlik ve minimum işçilik).

### 3.1. Kurutma Sırasında Meydana Gelen Kalite Değişiklikleri

Kurutma işlemi sırasında karşılaşılan kalite değişiklikleri yedi başlık altında toplanabilmektedir. Genel değerlendirmeleri aşağıda yapılmıştır.

**1) Kararma Reaksiyonları:** Kararma reaksiyonları ürünün rengini değiştirmenin yanısıra çözünürlüğünü ve besinsel değerlerini azaltmakta; tadı istenmeyen şekilde değiştirmekte ve geri dönüşü olmayan yapısal değişimlere de neden olmaktadır. Enzimatik olmayan iki ana kararma reaksiyonları, Maillard<sup>3</sup> ve karamelizasyondur<sup>4</sup>. Kararma reaksiyonları orta seviyeli nem miktarında hızlanmakta, çok düşük ve yüksek nem oranlarında ise yavaşlamaktadır. Kararma reaksiyonlarının engellenmesi için literatürde farklı tavsiyeler bulunmakla beraber, hemen hemen hepsi kurutma sırasında ürünün gereksiz yüksek sıcaklıklara maruz kalmamasını önermektedir (Okos ve ark., 2007).

**2) Lipid Oksidasyonu:** Lipid oksidasyonu birçok gıdada acılaşıma, istenmeyen tat değişimlerinden, yağda çözünen vitamin ve pigmentlerin kaybından sorumludur. Ürünün nem miktarı, substrat tipi (yağ asitleri) ve enzim aktivitesi, reaksiyon uzunluğu, oksijen içeriği, sıcaklık, metallerin varlığı, doğal antioksidanların varlığı, UV ışığı, protein ve serbest aminoasit içeriği oksidasyonu etkileyen faktörler arasında sayılabilmektedir. Saguy ve Karel'e (1980) göre özellikle nem içeriği oksidasyon reaksiyon hızı üzerinde etkili olmakta ve su aktivitesinin 0.3 civarlarına indirgenmesi oksidasyon reaksiyonları önemli ölçüde azaltmaktadır. Oksijen varlığının oldukça düşük seviyelere indirgenmesi de reaksiyon hızını önemli ölçüde düşürmektedir (Okos ve ark., 2007).

**3) Rehidrasyon ve Büzülme:** Rehidrasyon kurutulmuş bir ürünün tekrardan su alma kapasitesi olarak tanımlanabilmektedir. Kurutulmuş bir ürünün rehidrasyon özellikleri kurutma esnasında meydana gelen kimyasal ve yapısal değişimler, kurutma koşulları, ürüne kurutma öncesi uygulanan ön işlemler ve ürün kompozisyonu ile doğrudan ilişkilidir.

Yapısal ve hücrel bozulmalar minimize edildiğinde rehidrasyon miktarı en yüksek seviyeye ulaşabilmektedir (Okos ve ark., 2007).

**4) Çözünbilme Kapasitesi:** Özellikle süt tozu gibi kurutulmuş taneli yapıdaki gıdaların kalite kriterleri arasında yer almaktadır. İşlem koşulları, muhafaza şartları; ürünün kompozisyonu, pH'sı ve tane büyüklüğü çözünbilme kapasitesini etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda kurutulan gıdalarda protein denatürasyonu<sup>5</sup> gerçekleşebileceğinden çözünürlük önemli ölçüde azalmaktadır (Okos ve ark., 2007).

**6) Aroma ve Tat:** Aroma ve tadı sağlayan uçucu bileşikler sudan daha düşük kaynama noktasına sahip olduğundan, kurutma esnasında buharlaşma yoluyla ürünün uzaklaşabilmektedir. Fakat kurutmanın ilk aşamalarında ürün yüzeyi üzerinde çepe çevre ince kuru bir tabaka oluşturulabilirse bu bileşikler muhafaza edilebilmektedir (Okos ve ark., 2007).

<sup>3</sup> Maillard reaksiyonu, aminoasit ile indirgen şeker arasında ısı etkisi ile ortaya çıkan bir kimyasal reaksiyondur. Ekmeğin, bisküvinin, etin, kahvenin yüzeyinin yüksek sıcaklık nedeni ile renk değiştirmesi, koyulaşması bu reaksiyon nedeniyledir.

<sup>4</sup> Karamelizasyon, şekerin oksidasyonudur. Suyun etkisi ile sukroz, fruktoz ve glükoza dönüşür. Bu sırada karamel kokusundaki uçucu maddeler ortaya çıkar.

<sup>5</sup> Denatürasyon, proteinlerin dış etkiler nedeni ile yapılarının bozulmasına denir. Yumurthanın piştiği zaman renginin ve yapısının değişmesi bu tür bir işlemdir.

**7) C-Vitamini Kayıpları:** C-Vitamini veya diğer adıyla askorbik asit yüksek nem içeriğinde yüksek sıcaklıklara duyarlıdır. Kurutma esnasında askorbik asit kayıplarını minimize edebilmek için, yüksek nem içeriğinde düşük sıcaklık uygulanmalı ve ürünün nem içeriği azaldığı zaman askorbik asit daha stabil bir yapıya sahip olduğundan, sıcaklık kademeli olarak arttırılabilmektedir (Okos ve ark., 2007; Mishkin ve ark., 1982).

### 3.2. Su Aktivitesi ve Önemi

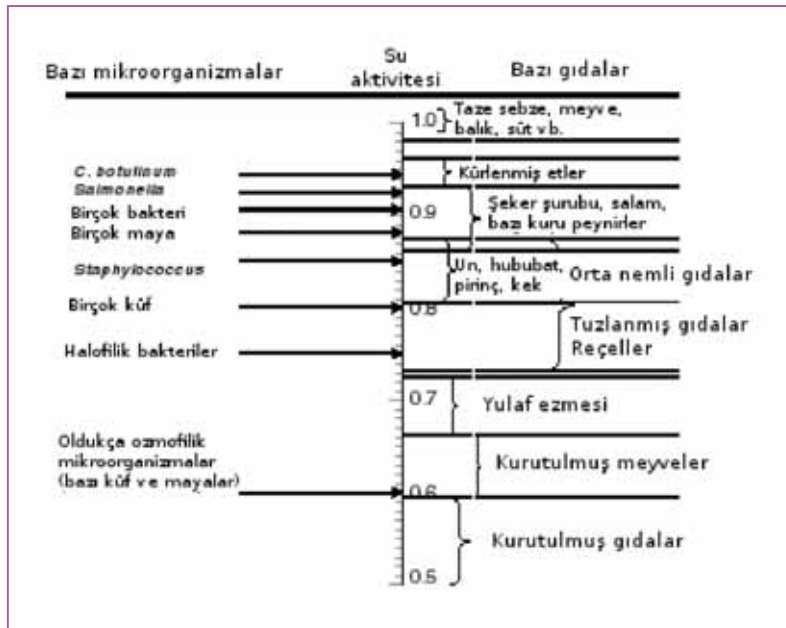
Kurutma ile gıdaların korunması iki şekilde gerçekleşir:

- 1) Mikroorganizmaların gelişmesi ve enzimlerin aktivitesi için gerekli olan su uzaklaştırılır,
- 2) Suyun uzaklaşması ile gıdada bulunan tuzların, şekerlerin ve asitlerin konsantrasyonunda artış meydana gelerek mikroorganizmaların gelişmesine elverişsiz kimyasal bir ortam oluşturulur.

Kurutulmuş gıdaların mikrobiyal stabilitesi, mikroorganizmaların yaşamsal faaliyetlerinin engellenmesi neticesinde elde edilir. Gıda kurutmasında önemli bir parametre su aktivitesidir ve gıdanın buhar basıncının ( $p$ ), saf suyun buhar basıncına ( $p_0$ ) oranı olarak tanımlanır. Ayrıca su aktivitesi, gıdayı çevreleyen ortamın denge bağıl nemine (ERH) oranı olarak da

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{ERH}{100} \quad (3.1)$$

Su aktivitesi serbest suyun mikroorganizmalar tarafından kullanılabilirliğinin bir ölçüsüdür. Tüm mikroorganizmalar için optimum ve minimum bir su aktivitesi değeri vardır. Su aktivitesinin optimum seviyenin altına indirilmesi spor oluşumu ve bakteri gelişimini yavaşlatırken, minimumun altına indirilmesi bakteri gelişimini durdurmaktadır. Taze sebze, meyve, et ve sütün su aktivitesi değeri 0.97 ile 0.99 arasında iken, kurutulmuş gıdaların su aktivitesi değeri genellikle 0.70 ve altındadır. Şekil 3.1'de su aktivitesi ve mikroorganizma gelişimi arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 3.1. Su aktivitesine bağlı mikroorganizma gelişimi (Karel, 1975)

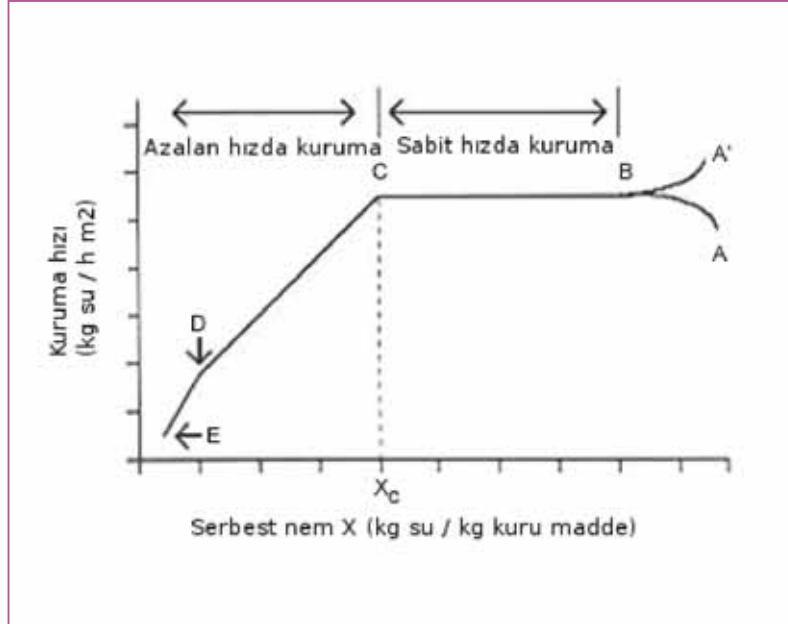


Mikrobiyal gelişimi su aktivitesinin yanında, sıcaklık, pH, gıdanın besin içeriği, koruyucular, oksijen içeriği ve diğer gıda bileşenleri gibi birçok faktör etkilemektedir. Aynı nem içeriğinde farklı gıdalar için farklı su aktivitesi değerleri elde edilebileceği unutulmamalıdır (Ramaswamy ve Marcott, 2006).

### 3.3. Kuruma Eğrilerinin Özellikleri

Kurutma işlemi Şekil 3.2'den de görüldüğü gibi "sabit kuruma" ve bir veya iki "azalan hızda kuruma" bölgelerine ayrılmaktadır (Fortes ve Okos, 1980).

Şekil 3.2'deki A' ve A noktaları sıcak veya soğuk bir cismi temsil etmektedir. B noktası ise ürün yüzeyinin denge noktasını göstermektedir. A (veya A') ile B noktası arasında geçen sürenin kısa olmasından dolayı kuruma süresinin analizi sırasında ihmal edilmektedir (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996). Tipik bir kurutma işleminin basamakları aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 3.2. Kuruma Eğrilerinin Temel Özellikleri (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996)

1. *Sabit kuruma periyodu (B-C)*: Eğer kurutma işleminin başında, malzeme tamamıyla nemli ise, su akışı hidrolik gradiyent altında gerçekleşmektedir. Nem serbest formda ve yüzeyde tutulmakta ve buhar basıncı, dolayısıyla buharlaşma en yüksek seviyede olmaktadır (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996). Teorik olarak üründen buharlaşan su miktarı ile saf sudan buharlaşan su miktarı aynı kabul edilmektedir. Pratikte ise bu farklı olabileceğinden genellikle üründen buharlaşan su miktarının saf sudan buharlaşan su miktarının %80 veya daha fazla olduğu safha olarak da kabul edilmektedir. Malzemenin yüzey sıcaklığı ıslak termometre sıcaklığında olduğundan sabit kuruma periyodu bazen ıslak termometre kuruma periyodu olarak da adlandırılabilir. Dolayısıyla ürün yüzeyindeki kısmi basınç ve nem miktarı, üzerinden geçen havanın ıslak termometre sıcaklığında doyma buhar basıncı ve doyma nemine eşit olacaktır. Kuruma hızını etkileyen diğer önemli bir parametre de kütle transferini doğrudan etkilediğinden dolayı havanın hızı olmaktadır (Nonhebel ve Moss, 1971).

2. *Birinci azalan kuruma periyodu (C-D)*: Bu periyotta da sabit kuruma periyodunda olduğu gibi buhar basıncı halen en yüksek seviyelere yakındır.



Gıdanın yüzey sıcaklığı ıslak termometre sıcaklığının üzerine çıkmakta ve suyun iç bölgelerden yüzeye difüzyon ile taşındığı genel olarak kabul edilmektedir.

3. *İkinci azalan kuruma periyodu (D-E)*: Kuruma hızı çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Su gıda içindeki ince kılcallarda tutulmakta ve kılcal yüzeylerinden çok yavaş bir şekilde geçebilmektedir. Suyun kısmi buhar basıncı da çok hızlı bir düşüş göstermektedir.

4. *Üçüncü azalan kuruma periyodu*: Bu periyotda hava ile denge elde edilmekte olup buharlaşan su miktarı yoğunlaşan su miktarına eşit olmaktadır (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996).

### 3.4. Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Kurutma işlemini tanımlamaya yardımcı olan ince tabaka modelleri teorik, yarı-teorik ve empirik olmak üzere üç ana bölüme ayrılabilir (Sharaf-Eldeen ve Hamdy, 1979). Teorik modeller nem transferinin difüzyon benzeri dahili mekanizmalar tarafından kontrol edildiğini öne sürerken, diğer modeller hava hızı, hava sıcaklığı gibi harici dirençleri dikkate almaktadırlar (Babalıs ve ark., 2006).

Yarı-teorik modeller Fick kanununun sadeleştirilmesi ile elde edilebilmektedirler. Empirik modeller direk olarak nem içeriği ile zaman arasındaki istatistiksel ilişkilerden elde edilebilirken, kurutma işleminin kendisi ile fiziksel bir bağlantı kurmamaktadır (Babalıs ve ark., 2006).

Newton'un soğuma kanuna benzeyen ve farklı kütle transfer işlemlerini sadece bir tane ince tabaka kuruma sabitinde (k) birleştiren temel eşitlik Lewis (1921) tarafından önerilmiştir.

$$\frac{dM}{dt} = -k \cdot (M - M_{denge}) \quad (3.2)$$

Eğer eşitlik (3.1)'deki yığın nem içeriğinin (M) sadece zamana bağlı olduğu kabul edilirse, eşitliğin çözümü aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$MR = \frac{M - M_{denge}}{M_0 - M_{denge}} = \exp(-k \cdot t) \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)'deki nem oranı (MR) madde içerisindeki tamamlanmamış nem değişimini, t zamanında ürün içerisinde bulunan serbest su miktarının başlangıçtaki serbest su miktarına oranını göstermektedir (Babalıs ve ark., 2006).

Kurutma eğrilerini modellemek için literatürde farklı araştırmacılar tarafından bulunan eşitlikler Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Model	Matematiksel İfade	Kaynaklar
Lewis	$MR = \exp(-k \cdot t)$	(Lewis, 1921)
Page	$MR = \exp(-k_1 \cdot t^n)$	(Page, 1949)
Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(Henderson ve Pabis, 1961)
Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(Yaldiz ve ark., 2001)
Difüzyon Yaklaşımı	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(Yaldiz ve Ertekin, 2001)
Wang ve Singh	$MR = 1 + a_1 \cdot t + b_1 \cdot t^2$	(Wang ve Singh, 1978)
Midilli ve ark.	$MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t^n) + b \cdot t$	(Midilli ve ark., 2002)

**Tablo 3.1.** Deneysel Kurutma Verilerini Tanımlamaya Yardımcı Olan İnce-Tabaka Modelleri

Tablo 3.1.'de verilen eşitlikler birçok araştırmacı tarafından meyve ve sebzelerin kuruma eğrilerini tanımlamak için kullanılmıştır. Margaris ve Ghiaus (2007) Sultaniye tipi üzümün ve Doymaz ise siyah üzümün kuruma eğrilerini tanımlamak amacıyla Page eşitliğini kullanmışlardır. Yaldiz ve Ertekin (2001) sıcak hava ile kurutulan patlıcanların kuruma eğrisinin en iyi Midilli ve ark. (2002) tarafından önerilen eşitlik ile tanımlandığını bulmuşlardır. Doymaz (2004) Logaritmik denklemin dutların kuruma eğrisinin tanımlanmasında kullanılabileceğini önermiştir. Roberts ve ark. (2008) Henderson ve Pabis denklemlerinin üzüm çekirdeklerinin kuruma eğrilerini %10'dan daha küçük Lewis denkleminin ise %5'den daha az bir hata ile tanımladığını bulmuşlardır.

### 3.5. Difüzyon Teorisi

Difüzyon katı içindeki kılcallarda ve boşluklarda meydana gelir. Difüzyon ile su yüzeye doğru taşınır ve hava akımı ile de yüzeyden buhar durumunda uzaklaştırılır. Yavaş kuruyan malzemelerde su biyolojik malzemenin içinden yüzeyine temel olarak difüzyonla taşınır. Genel olarak katı madde yüzeyinden meydana gelen buharlaşmaya karşı kütleli direnç ihmal edilebilir seviyede olduğundan, kuruma hızı tamamen difüzyon miktarı ile ilişkilidir. Madde yüzeyindeki nem miktarı denge nemine çok yakın olduğundan hava hızının artırılması kuruma hızı üzerinde ihmal edilebilir seviyede etkili olmakta, ancak havanın mutlak neminin değişmesi denge bağıl nemini değiştireceğinden kuruma hızı üzerinde bu noktada etkili olmaktadır (McCabe ve ark., 1993; Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996).

Difüzyon teorisi kurutulan katıda meydana gelen büzülme, yüzey sertleşmesi gibi fiziksel değişimleri dikkate almamaktadır. Tek boyut için modifiye edilmiş Fick Kanunu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial M(L,t)}{\partial t} = \frac{1}{L^n} \left( L^n \cdot D_{ef} \cdot \frac{\partial^2 M}{\partial L^2} \right) \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4)'de L (m), cisim düzlem levha ise yarı kalınlığını, silindir ve küre ise yarıçapını temsil ederken,  $D_{ef}$  ( $m^2/s$ ) ise efektif difüzyon sabitini göstermektedir. Eşitlikteki n katsayısı düzlem levha için 0, silindir için 1 ve küre için ise 2 olarak alınacaktır.

Thompson çekirdeksiz üzümü gibi silindirik kabul edilebilecek bir biyolojik malzeme için eğer eşitlik (3.4)'deki efektif difüzyon sabit kabul edilip, üzümde kuruma sırasında meydana gelen büzülme ihmal edilirse, sonsuz bir silindir için aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$MR = \frac{M - M_{denge}}{M_0 - M_{denge}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a_n^2} \cdot \exp\left(-\frac{a_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{r^2}\right) \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.5)'de  $\beta_n$  birinci tip sıfırıncı derece Bessel fonksiyonunun kökünü göstermektedir (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996).

Eşitlik (3.5) açıldığında ilk terim haricindeki terimler için kuruma süresi uzun olduğunda  $\beta_n$  değeri hızlı bir şekilde artmakta ve exponansiyelin değeri sıfıra yaklaşmaktadır. Üç basamak hassasiyetle  $\beta_1$  değeri 2.404'e eşit olmaktadır. Dolayısıyla sadeleştirmeler yapıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$MR = \frac{M - M_{denge}}{M_0 - M_{denge}} = 0.692 \cdot \exp\left(-\frac{5.78 \cdot D_{ef} \cdot t}{r^2}\right) \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.6) kullanılarak kurutma sırasındaki efektif difüzyon katsayısı,  $D_{ef}$  ( $m^2/s$ ) herhangi bir t (saniye) anı için eğer yarıçap (m) ve nem içeriği bilirse (kuru baz) hesaplanabilmektedir. Eşitlik (3.6) kullanılırken aşağıdaki varsayımlar yapılarak etkin difüzyon hassas bir şekilde hesaplanmış olur: (1) izotermal kuruma koşulları, (2) sabit etkin difüzyon katsayısı, (3) ihmal edilebilir büzülme, (4) tekdüze başlangıç nem içeriği, (5) ihmal edilebilir harici direnç (Srikiatden ve Roberts, 2006).

İkinci ve üçüncü kabullerden kaynaklanan sapmaları düzeltmek için Azzouz ve ark. (2002) tarafından önerilen yöntem kullanılabilir. Bu yöntemde efektif difüzyon ve yarıçap değerleri kısa zaman aralıklarında sabit kabul edilebilmektedir. Ürünün kuruması sırasında, ardışık zaman aralıkları için, nem içeriği ve yarıçap bilindiği takdirde anlık  $D_{ef}$  hesaplanabilmesi mümkün olabilmektedir. Örnek olması için çeşitli gıdalar için  $D_{ef}$  değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996).

Gıda	T (°C)	$D_{ef}$ ( $m^2/s$ )
Elma	66	$6.40 \cdot 10^{-9}$
Elma*	25	$2.43 \cdot 10^{-10}$
Kuru üzüm	25	$4.17 \cdot 10^{-11}$
Havuç (küp şeklinde)	40	$6.75 \cdot 10^{-11}$
	60	$12.1 \cdot 10^{-11}$
	80	$17.9 \cdot 10^{-11}$
	100	$24.1 \cdot 10^{-11}$
Patates	54	$2.58 \cdot 10^{-11}$
	60	$3.94 \cdot 10^{-11}$
	65.5	$4.37 \cdot 10^{-11}$
	68.8	$6.36 \cdot 10^{-11}$
Dana kıyması*	25	$3.07 \cdot 10^{-11}$
Armut (dilim)	66	$9.63 \cdot 10^{-10}$

**Tablo 3.2.** Çeşitli Gıdaların Efektif Difüzyon Değerleri (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996).

\*dondurarak kurutulmuş

Tablo 3.2'den de görüldüğü gibi farklı gıdalar farklı efektif difüzyon hızlarına sahip olabilmektedir. Aynı ürün için efektif difüzyon hızı farklı sıcaklıklarda farklı değer alabilmekte ve değerler genellikle sıcaklık ile artış göstermektedir.

### 3.6. Matematiksel Modellemenin Kurutma Teknolojileri Açısından Önemi

Artan enerji maliyetleri, tüketicilerin son ürünlerdeki kalite kriterlerini arttırması, dünya çapında iklim değişikliklerine neden olan sera gazı üretimindeki artış, kurutma teknolojilerindeki araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin yakın gelecekte de etkin bir şekilde devam edeceğini göstermektedir. Enerjiyi oldukça yoğun olarak kullanan kurutma işlemlerinin daha iyi tasarlanmış ve boyutları küçültülmüş kurutucular ile gerçekleştirilmesi sayesinde işlem maliyetinde tasarruf mümkün olabilmektedir (Mujumdar ve Zhonghua, 2008).

Kurutma işleminde yapılacak yenilikler ısı, kütle ve momentum transferinin temel ilkelerinin yanı sıra malzeme bilgisinin uygulanmasıyla gerçekleşmesi mümkündür. Mikroskopik boyutlarda kurutma işleminin modellenmesi malzemenin iç yapısı ile ilgili olup ekipmanın özelliklerinden genellikle bağımsızdır. Örneğin homojen yapıdaki gözenekli bir malzemenin kuruması sırasında fiziksel değişim ve hatta kimyasal reaksiyonlar meydana gelmekte ve bunlar da ürün içerisindeki nem transferi mekanizmasını etkilemektedir. Gıda maddelerinin yapısının homojen olmadığı göz önüne alındığı zaman modelleme sırasında karşılaşılabilecek sorunlar daha da iyi anlaşılabilir. Isı ve kütle transferi birbiri üzerinde ve aynı zamanda da malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde etkili olabilmekte ve bu tekrar bir döngü olarak birbirleri ile etkileşim göstermektedir. Dolayısıyla sadece temel özelliklerin kullanıldığı ve malzeme veya ortam özelliklerine bağlı genel bir kurutma teorisinin geliştirilmesini beklemek gerçekçi değildir (Mujumdar ve Zhonghua, 2008). Farklı ürün ve sistemler ısı, kütle ve momentum transferi ve malzeme bilgisi kullanılarak oluşturulan farklı modeller ile incelenmelidir. Aşağıdaki tabloda kurutma işlemleri için uygulanabilecek modeller verilmiştir.

Model	Tanım	Uygulama Alanı
Latis Boltzmann Simülasyonu ("Lattice Boltzmann Simulation")	Mezoskopik boyutta akış işleminin incelenmesi. Gözenekli ortamda sıvı akışının incelenmesi için basit ve etkin bir yöntem.	Mikrofiltrasyon ve emülsifikasyon işlemleri ile bazı kurutma işlemleri.
Ayrık Eleman Modeli ("Discrete Element Model")	Fiziksel tanelerin bireysel olarak hareketlerinin takibi; hesaplama maliyeti yüksektir*.	Tamburda tanelerin karışması veya akışkan yatak kurutucuda tanelerin takibi.
Gözenek Ağ Modeli ("Pore Network Model")	Gözenekli cisimler içindeki akışın simülasyonu veya gözenek yapısının kuruma üzerindeki etkisinin incelenmesi gibi mikroskopik boyutlardaki taşınım işlemleri.	Gözenekli malzemelerin kurutulması.
Hesaplamalı Akışkan Dinamiği ("Computational Fluid Dynamics") (CFD)	Mühendislik için oldukça geniş bir modelleme yöntemidir. Diğer modeller ile etkileştirildiğinde oldukça ileri ve kapsamlı modeller elde edilebilmektedir.	Oldukça geniş uygulama alanı
Sonlu Eleman Analizi ("Finite Element Method") (FEM)	Isı, kütle ve momentum transferinin yanı sıra diğer tüm olaylarda kullanılabilir. Karmaşık geometriler için uygundur.	Oldukça geniş uygulama alanı
Termo-mekanik Model ("Thermomechanical Model")	Difüzyon eşitliklerini kullanan basitleştirilmiş bir modeldir.	Büzülme, ürün kırılmaları içindeki kuvvet dağılımı ve ısı gerilmeleri.

**Tablo 3.3.** Kurutma İşlemleri İçin Kullanılabilecek Matematiksel Modeller

\*Hesaplama maliyeti modelin bilgisayar ile çözümü esnasında bilgisayarın yapması gereken işlem sayısını göstermektedir. Ekonomik herhangi bir maliyeti belirtmemektedir.

## 4. KURUTMA ÖNCESİ UYGULANABİLECEK ÖNİŞLEMLER

### 4. KURUTMA ÖNCESİ UYGULANABİLECEK ÖNİŞLEMLER

#### 4.1. Biyolojik Malzemelerin Kimyasal Çözeltilere Daldırılması

Farklı ürünlerin hasat sonrası raf ömrünün uzaltılmasında kütikül ve kütiküler zar önemli bir rol oynamaktadır. Kütikül, meyvelerin ve yaprakların epiderm hücresi üzerinde harici ve sürekli bir zar oluşturmaktadır. Kütikülün görevleri aşağıdaki şekildedir (Glenn ve ark., 2005):

1. Su buharı geçirgenliğini kontrol ederek su kaybını en aza indirmek,
2. Hücre içinde bulunan çözünmüş maddelerin dışarıda bulunabilecek suya (yağmur, ıslaklık vb) geçmesini engellemek,
3. Patojen istilasına karşı ilk engeli oluşturmak,
4. Mekanik etkilere, pestisit ve gübrelere ve ayrıca güneş ışınlarına karşı kalkan etkisi göstermek,
5. Gazların etkin bir şekilde giriş çıkışına yardımcı olmak.

Meyve ve yaprak üzerindeki kütikül tabakası eğer zarar görmemiş ise çok düşük nem geçirgenliğine sahiptir. Kütikül iki farklı bileşikten oluşmuştur: doğal mumlar ve kütin. Doğal mumlar lipidlerin heterojen karışımından oluşmuş olup ve bitkiden bitkiye oldukça farklılık gösterebilmektedir. Doğal mumlar alkol, alkan, aldehit, keton ve uzun zincirli yağ asitlerinin (C16:1 ve C18:1) heterojen karışımından meydana gelmiştir. Mumsu tabaka kütikül üzerinde epikütiküler mumsu tabaka olarak bilinen ince ve amorf bir tabaka olarak birirmektedir. Mum kristallerinin yapı ve şekli çevresel koşullar ve gelişim şartlarına göre şekillenen mumsu tabakanın kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir (Glenn ve ark., 2005). Suda çözünürlük göstermeyen tüm bu bileşikler yüksek molekül ağırlıklarına sahip olup, benzer fiziksel özellik göstermektedirler. İkinci bileşik olan kütin, çapraz polimerizasyonla birbirine bağlanmış bileşimlere sahip olduğundan organik çözücülerde düşük çözünürlüğe sahiptir (Mazliak, 1970; Suarez ve ark., 1984; Grabowski ve Marcotte, 2003).

Üzüm gibi mumsu tabakaya sahip meyvelerin kurutulması sırasında sıcak su veya kükürt, NaOH, ve metil veya etil oleat çözeltilerine daldırma işlemi sıklıkla uygulanmaktadır (Doymaz ve Pala, 2002). Daldırma işlemi kuruma süresini kısaltmakla beraber aynı zamanda ürünün renk, tat, besinsel değeri ve sanitasyon kalitesini de arttırmaktadır (Pangavhane ve ark., 1999). Kuruma hızını arttırmada en etkin daldırma çözeltisi, C10-C18 zincirli yağ asitlerinin etil esterleri olarak bulunmuştur. Bu çözeltiler arasında üzüm için en etkin olan etil oleat ve etil linoleat çözeltileridir (Ponting ve McBean, 1970).

Etil oleat üzüm kabuğu üzerinde kütle transferine dirençli olan mumsu tabakayı çözdüğünden (Saravacos ve Marousis, 1988) etil oleat konsantrasyonu arttırıldığı zaman kuruma hızı artmakta ve kuruma süresi kısalmaktadır. Fakat etil oleat ürüne farkedilebilir bir tat eklediğinden, üzüm için en uygun etil oleat konsantrasyonu %2 olarak bulunmuştur (Ponting ve McBean, 1970). Tarhan (2007) yaptığı çalışmada kurutmadan önce erikleri %4 oranında etil oleat içeren çözeltilere 60 saniye süreyle daldırılmış, fakat son ürünlerdeki tat değişimini çalışmasında bildirmemiştir.

Etil oleat ile birlikte potasyum karbonat ( $K_2CO_3$ ) veya NaOH gibi alkali maddelerin kullanımı da mumsu tabakaya hasar vererek, kuruma sırasında nem uzaklaştırılmasını kolaylaştırarak kuruma hızını arttırmıştır. Üzümleri %0.5 etil oleat veya %2.5  $K_2CO_3$  içeren çözeltilere daldırarak kabukta çatlaklar oluşturarak nem transferini hızlandırmaktadır (Saravacos ve Marousis, 1988). Ponting ve McBean (1970) çalışmalarında Grncarevic'in (1963) potasyum karbonatın tek başına kuruma hızını arttırmada etkili olduğuna dair bulgularından bahsederken, Radler (1964) sadece potasyum karbonat içeren çözeltilere ürünü daldırmakla suya daldırmak arasında fark olmadığını bildirmiştir. Doymaz ve Pala (2002) kırmızı biberleri %2 etil oleat ve farklı miktarlarda  $K_2CO_3$  içeren çözeltilere daldırmışlardır. Araştırmacılar  $K_2CO_3$  miktarını %4'den %5'e çıkarmanın kuruma süresini 21 saatten 19 saate düşürdüklerini rapor etmişler, fakat aynı çalışmada  $K_2CO_3$

miktarını %4'den %6'ya çıkarmanın kuruma süresini sadece yarım saat kısalttığını bildirmişlerdir. Doymaz (2006) oda sıcaklığında %2 etil oleat ve %2.5 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> veya %2.5 KOH veya %2.5 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içeren kimyasal çözeltilere, önlemler görmeden kuruma süresi 65 saat olan, siyah üzümü daldırmış ve kurutma süresini sırasıyla 25, 30 ve 33 saat olarak bulmuştur. Bu bulgulardan etil oleat ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> çözeltilerinin üzüm için daha etkin olduğu sonucuna varılabilmektedir. Çözelti sıcaklığına bağlı olarak Pangavhane ve ark. (1999) daldırma çözeltilerini iki gruba ayırmıştır:

1. *Soğuk daldırma*: Çözelti sıcaklığı genel olarak ortam sıcaklığında veya çok az üzerindedir. Kuruma hızını sıcak daldırmaya göre daha az artırır, fakat renk açısından daha kaliteli son ürün elde edilebilir.
2. *Sıcak daldırma*: Çözelti sıcaklığı soğuk daldırma sıcaklığından daha yüksektir. Kütükül tabakası üzerinde çatlaklar ve delikler oluşturduğundan kuruma hızını soğuk daldırmaya göre daha fazla artırır.

#### 4.2. Biyolojik Malzemelerin Haşlanması

Su aktivitesinin 0.75'den aşağı düşürülmesi ile gıdalarda enzim aktivitesi engellenir. Haşlama gibi kısa süreli ısı işlemler de ham sebze enzim inaktivasyonu için kullanılabilir. Evcil hayvanların beslenmesinde kullanılan gıdalarda olduğu gibi, enzimler nişastayı glukozaya çevirmede kullanılarak gıdanın duyu özellikleri geliştirilebilir. Fakat diğer durumlarda enzim aktivitesi istenmeyen bir durumdur. Gıdanın besinsel değerini düşürebilir, kararmasına neden olabilir veya hacminin küçülmesine yol açabilir (Barbosa-Canovas ve Vega-Mercado, 1996). Bitkilerde bulunan renksiz polifenollerin dehidrejenasyonu ve oksidasyonu neticesinde kararma meydana gelir. Birincil reaksiyon polifenol oksidaz (PPO) enzimi tarafından katalizlenir ve kırmızı-kahverengi quionon ara ürünü meydana gelir (Busch, 1999). Oksidatif kararma armut, elma, muz, kiraz, nektarin, kayısı ve üzüm gibi meyvelerde önemli bir sorun teşkil eder (Ramaswamy, 2004). Bakır içerikli bir enzim olan PPO aynı zamanda fenolaz, tirozinaz, difenol oksidaz veya kateşol oksidaz olarak da bilinir (Kim ve ark., 2005). PPO enzimi buğday, çay, patates, salatalık, enginar, marul, armut, papaya, üzüm, şeftali, mango ve elma gibi hemen hemen gelişmiş tüm bitkilerde mevcuttur (Martinez ve Whitaker, 1995).

Meyve ve sebzelerde bulunan PPO enzimini inaktive etmenin farklı yöntemleri bulunmaktadır. Kim ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada 100°C sıcaklığındaki soğan özütünü kullanarak armutta bulunan PPO enzimini inaktive etmişlerdir. Araştırmacılar PPO inaktivasyonunun soğan özütünün yüksek sıcaklığından veya soğanda doğal olarak bulunan tiol maddesinden kaynaklanmış olabileceğini bildirmişlerdir. Gomez-Lopez (2002) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise L-sistein, askorbik asit, NaCl, glisin ve resorsinol gibi kimyasal inhibitörlerin avakadoda bulunan PPO enzimini inaktivasyonu incelenmiştir. Kullanılan kimyasallar arasında en etkili L-sistein ve daha sonra askorbik asit bulunmuştur.

Kontrollü atmosfer ortamında yakılarak kullanılan ve indirgen bir madde olan kükürt, gıda sanayi tarafından meyvelerde meydana gelen kararma reaksiyonlarını engellemek amacıyla kullanılmaktadır (Martinez ve Whitaker, 1995). Fakat kükürt astım, isilik ve mide rahatsızlıklarına neden olabilmektedir. Sofralık üzümde tütsüleme vasıtasıyla kükürt dioksit kullanımı A.B.D. Çevre Koruma Dairesi (EPA, "Environmental Protection Agency") tarafından pestisit olarak sınıflandırılmış ve miktarının 10 ppm'den daha az olması (Warner ve ark., 2000) ve ayrıca işlenmiş gıdalarda ise 10 ppm'den daha fazla olan miktarın ürün paketi üzerine yazılması gerekli görülmüştür.

Enzimlerin inaktivasyonu gibi gıdaların işlenmesinden önce çok amaçlı olarak kullanılabilen haşlama işlemi sıcak suya daldırma veya gıda üzerine buhar püskürtme şeklinde uygulanabilmektedir (Fellows, 2000). Literatürde haşlama işleminin farklı ürünlere uygulandığı görülmektedir: kayısı (Piga ve ark., 2004), muz püresi (Palou ve ark., 1999), yeşil biber (Thomas ve Gopalakrishnan, 1991), patates (Yemencioğlu, 2002) ve şeker kamışı küspesi (Leblebici ve Köksel, 1999).

Meyve ve sebzelerde kararma reaksiyonları genel olarak hasat sonrası dokular bir stresle karşılaştığında veya bozulma başladığında meydana gelmektedir (Robert ve ark., 1996). Haşlama ile PPO inaktive edilebileceği gibi yetersiz haşlama ile de istenmeyen reaksiyonlar hücrenin zarar görmesinden ötürü başlatılabilir. Uygun olmayan ısıtma koşulları, birbirinden ayrı durumda olan enzim ve substratın bir araya gelmesine neden olduğundan bozulma reaksiyonlarını hızlandırabilmektedir (Fellows, 2000). Renk, müşteriler için önemli bir görsel kalite kriteri olduğundan (Maskan, 2001), kararma reaksiyonlarının önlenmesi gıda endüstrisi açısından önem taşımaktadır (Kim ve ark., 2005).





## 5. GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN KURUTUCULAR

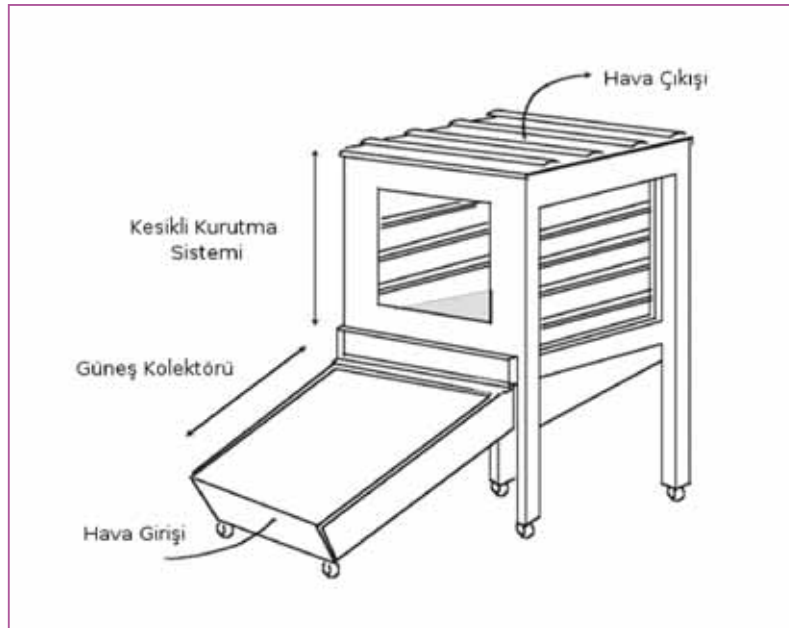
### 5. GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN KURUTUCULAR

Doğrudan ya da dolaylı güneş enerjisini kullanan kurutucular bu sınıfa girmektedirler. Güneş enerjisiyle çalışan kurutucular genel olarak ısıtma biçimleri ve güneş enerjisinden faydalanma şekillerine göre iki ana sınıfa ayrılırlar (Ekechukwu ve Norton, 1999):

- 1) Pasif güneş enerjili kurutma sistemleri,
- 2) Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri.

*Pasif Güneş Enerjili Kurutma Sistemi:* Tropik ülkelerde pasif kurutma geleneksel olarak iki şekilde yapılmaktadır. Ürünün yetiştiği bitki toprakla temas halindeyken ya da yerinden alınmadan kesilerek ölmesine izin verilir. Böylece mahsul yerinde kurutulmuş olur. Ürün toprağa, hasıra ya da çimento zemine yayılır veya yatay ya da dikey raflara konularak güneş enerjisi ve doğal hava akımları ile kurutulur (Şekil 5.1.). Yüksek ürün kaybı, küf ve böcek oluşumu, kuş ve kemirgen zararı ve değişen hava koşulları gibi kısıtlayıcı faktörler bu tip sistemlerin dezavantajları arasında yer almaktadır (Ekechukwu ve Norton, 1999). Genel olarak bu şekilde kurutulmuş ürünler uluslararası kalite standartlarını sağlayamadıklarından uluslararası pazarlarda satılamamaktadırlar (Esper ve Mühlbauer, 1998).

*Aktif Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri:* Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri kısmi olarak güneş enerjisine bağımlıdır. Isıtma sistemlerinde, güneş enerjisi ve/veya elektrik enerjisi ya da fosil yakıtlar kullanılırken, hava sirkülasyonu için fanlar kullanılmaktadır. Tipik bir aktif güneş enerjili kurutma sistemi, ısı kaynağı olarak yalnızca güneş enerjisi kullanırken, kuruma havasının sirkülasyonu için fanlar ve/veya pompalar kullanır (Ekechukwu ve Norton, 1999). Hava ürün boyunca dolaşırken yüksek dirençle karşılaştığından, sadece birkaç tane tepsi hava akımını engellemeksizin yerleştirilebilir (Esper ve Mühlbauer, 1998).



Şekil 5.1. Kabinet Tipi Güneş Enerjili Kurutucu (Kalra ve Bhardwaj, 1981)

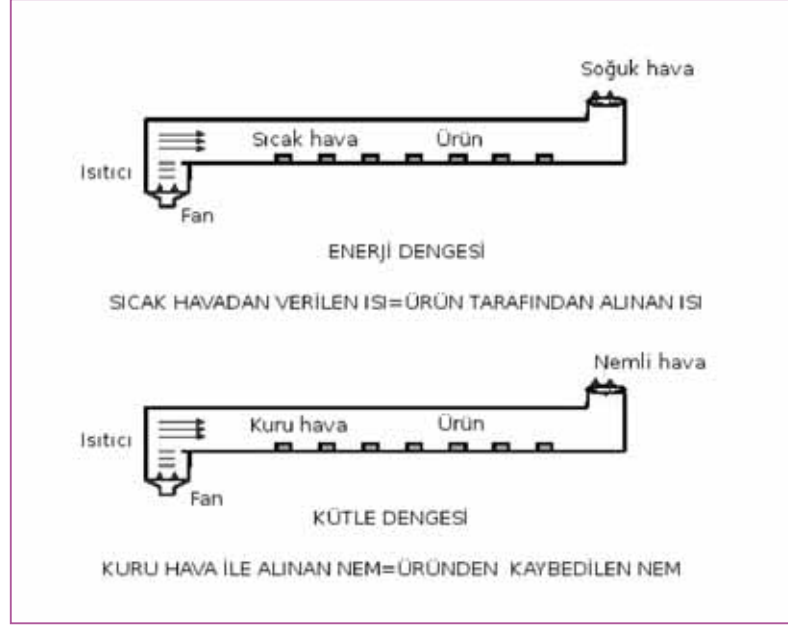
Aktif güneş enerjili kurutucuların diğer kullanım alanları ise büyük ölçekli ticari kurutmalardır. Burada güneş kolektörleri fosil yakıtlı kurutuculara ek olarak kullanılmakta ve böylece toplam enerji harcaması azalırken, kurutma koşulları kontrol altında tutulabilmektedir.



## 6. SICAK HAVA İLE KURUTMA SİSTEMLERİ

### 6. SICAK HAVA İLE KURUTMA SİSTEMLERİ

Geçmiş çok eskilere dayanan ve halen yaygın olarak kullanılan kurutma tekniklerinden birisi de sıcak hava ile ürünün kurutulmasıdır. Ürün içinde bulunan nemin buharlaştırılması için gerekli olan gizli ısı hava tarafından sağlanır ve buharlaşan nem üründen hava vasıtasıyla uzaklaştırılır. Hava ile ürün arasında ısı ve nem transferi aynı anda gerçekleşir (Şekil 6.1) ve bu şekilde ürünün nemi ve dolayısıyla su aktivitesi azaltılır.



Şekil 6.1. Hava ile Kurutma İşlemi

Sıcak hava ile kurutma işleminde, kurutma iki alt gruba ayrılır:

1. *Aktif kurutma olarak da adlandırılan ve gıdayı çevreleyen hava tarafından gıdaya transfer edilen enerji vasıtasıyla ürün yüzeyindeki nemin buharlaştırılması aşaması:* Sabit kuruma periyodu olarak da adlandırılabilir bu fazda, nemin gıdadan uzaklaştırılma hızı havanın sıcaklık, nemi, hızı ve basıncı ve ayrıca hava ile temas eden ürünün yüzey alanına bağlı olmaktadır.
2. *Kısıtlanmış veya dirençli kurutma olarak da adlandırılabilen ve ürün içinde bulunan nemin yüzeye taşınıp daha sonra uzaklaştırılması aşaması:* Bu fazda nemin katı içindeki hareketi ürünün fiziksel yapısına, sıcaklığına ve nem içeriğine bağlı olarak gerçekleşmektedir (Ramaswamy ve Marcott, 2006).

Kurutma sırasında ürün ile kurutma ortamı arasındaki ısı transferi ve havanın termodinamik koşulları kuruma hızı üzerinde oldukça etkilidir. Etkili olan parametreler aşağıda sunulmaktadır (Nonhebel ve Moss, 1971):

#### 1. Isı transferi

- Isıtma ortamı ile sıvı yüzeyi arasındaki ısı transferi,
- Ürünün katı tabakalarından ürün içinde bulunan sıvıya gerçekleşen ısı transferi,
- Isıtma ortamından yaklaşık olarak kurumuş olan ürüne olan ısı transferi,
- Ürün içinde bulunan sıvının (gıdalar için çoğunlukla su) ısıl iletkenlik katsayısı ve gizli ısı kapasitesi,

- Nemli ürünün veya yaklaşık olarak kurumuş ürünün ısı iletkenlik katsayısı,
- Kurutulacak ürünün sıcaklığa bağlı sınıflandırılabilme özelliği; bazı ürünler içinde bulunan sıvı buharlaştırılmadan eriyebilmektedir.

## 2. Havanın termodinamik koşulları

- Havanın sıcaklık ve basıncı,
- Havanın kuruma sırasında bileşimindeki değişimi,
- Ürün yüzeyinden geçen havanın bağıl hızı.

Sabit kuruma periyodunda, ürüne paralel olarak akan nemli havanın ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir:

$$h_c = 0.057 \cdot G^{0.8}$$

$$G = p \cdot v$$
(6.1)

Eşitlik (6.1)'de  $h_c$  ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) taşınım ısı transfer katsayısını ve  $G$  ( $kg/m^2 \cdot s$ ) ise ürünün birim alanı üzerinden geçen havanın kütlesini göstermektedir. Azalan kuruma periyodunda ise ürün kurudukça ısı transferinin dolayısıyla havanın hızının etkisi azalacağı için (6.1) no'lu eşitliğin kullanımında hatalar ortaya çıkabilmektedir.

Havayı ısıtmak için harcanan yakıt kurutma işlemindeki en önemli ekonomik faktördür. Ticari kurutucular bu maliyeti azaltabilmek için ısı kayıplarını indirgeyecek veya havanın enerjisini kazanacak şekilde tasarlanmışlardır. Brennan (1992) kurutma işleminin ekonomik olabilmesi için aşağıdaki faktörlere dikkat çekmektedir:

- Kurutma kabinleri veya sıcak havayı taşıyan kanalların izolasyonu,
- Kurutma sonrası dışarı atılan havanın tekrardan sisteme verilmesi,
- Doğal gaz ile çalışan direkt alev ısıtmalı ve kükürt oksit miktarının düşük olduğu yakma ünitelerinin kullanılması,
- İki aşamalı kurutma yapılması (iki farklı kurutma teknolojisinin aşamalı olarak ürüne uygulanması),
- Çok tesirli evaporatör kullanarak sıvı ürünlerin yüksek katı madde içeriğinin kurutma öncesi konsantrasyonu,
- Havanın neminin otomatik olarak kontrol edilmesi (Fellows, 2000).

Ürünün fiziksel ve kimyasal yapısına ve arzu edilen son nem miktarına göre sıcak hava ile kurutma farklı sistemler ile gerçekleştirilebilmektedir:

1. **Tepsili/Tünel/Bantlı Kurutucular:** Tünel kurutucular meyvelerin kurutulması için çoğunlukla tercih edilmektedirler. Tepsili kuruculara benzemelerine karşın tünel kurutucularda tepsiler hava akımına paralel veya zıt yönde ilerlerler. Tünel kurutucular basit olmalarına karşın verimli olarak çalışırlar. Büyük miktarlardaki ürünün kurutulmasına olanak sağladığından endüstriyel kurutmaya oldukça uygundur. Genellikle kayısı, şeftali, armut, elma, incir ve benzeri ürünlerin kurutulmasında kullanılırlar.

**Bantlı kurutucular** tünel ve tepsili kurutuculara kıyasla pahalı olmalarına karşın, daha fazla miktarda ürünün sabit kalitede üretilmesine olanak sağlamaktadırlar. Yaklaşık 60 metre uzunluğundaki bir ekipman ile saatte iki tondan yedi tona kadar değişen miktarlarda ürün kurutulabilmektedir. Bu tip kurutucuların en büyük avantajı otomatik kontrolün kolay olmasından dolayı işçilik maliyetinin düşürülebilmesidir (Tang ve Yang, 2004; Salunkhe ve ark., 1991).

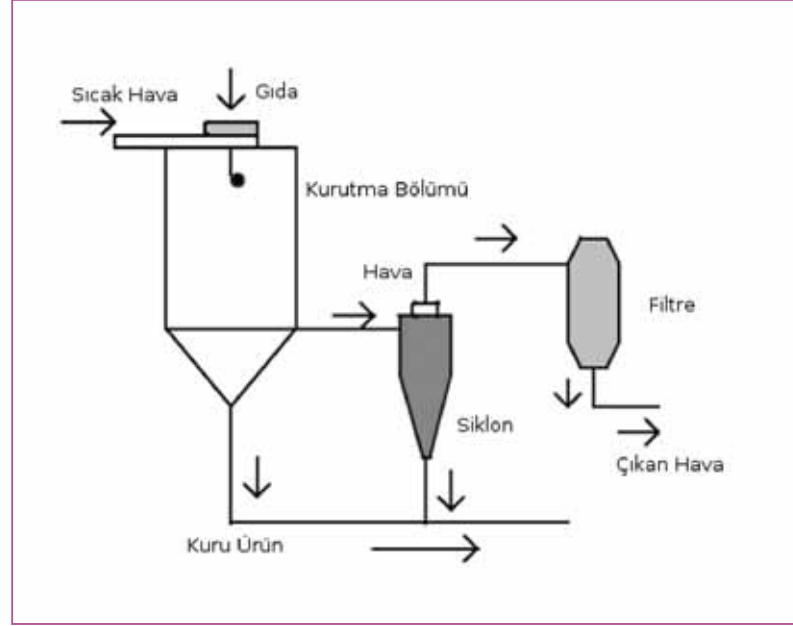
2. **Püskürtmeli Kurutucular:** Püskürtmeli kurutucu, kurutulması istenen, pompalanabilir akışkanının kurutma ortamı olarak kullanılacak yüksek sıcaklıktaki gaz akışkana püskürtülmesi ile katı/yarı katı duruma geçmesi olarak tanımlanabilir. Ürünün yüzey alanı püskürtme işlemi ile artırıldığından, 3-40 saniye gibi kısa sürede çok hızlı bir kurutma sağlanarak, yüksek kalitede son ürün kalitesi elde edilir. Örnek olarak 1 lt akışkan, 12 milyar parçacık halinde püskürtülerek, yaklaşık 30 m<sup>2</sup> yüzey alanında kurutma işlemi gerçekleşir. Püskürtme 100 mikronluk ortalama parçacık boyutunda yapıldığında 1 kg'lık üründe yaklaşık 3000 m<sup>2</sup>, 20 mikron boyutunda ise yaklaşık 15000 m<sup>2</sup> yüzey alanı oluşur. Kurutucuya beslenen madde çözelti, derişik çözelti ya da süspansiyon olabilir. Toz halindeki kurutulmuş ürün 100 mikrondan küçük tek parçacıklardan ya da çözünürlüğü artırmak için bir araya getirilmiş parçacıklar ve boşluklardan, başka bir ifade ile 250-400 mikron mertebelerindeki gözenekli topraklardan oluşabilir. Bu ayırım beslemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, kurutucu tasarımı ve çalışma koşullarına bağlı olarak gerçekleşebilir (Anon., 2009a).

Süt endüstrisinde ilk püskürtmeli kurutma işlemi denemelerinin geçmişi 1800 yıllarına dayanır; fakat 1850'ye kadar sütün büyük ölçekte kurutulması mümkün olmamıştır. Diğer taraftan tüm çalışmalarda süte şeker, sülfirik asit ya da alkali eklenmesi gerektiğinden, o günlerde yapılan uygulamalarda elde edilen ürünün saf olduğunu iddia etmek oldukça zordur. Sütün lüleler yardımı ile kapalı bir ortamdaki sıcak havaya püskürtüldüğü ilk püskürtmeli kurutucu patenti Alman Stauf tarafından 1901 yılında alınmıştır. Amerikalı Grey ve Danimarkalı Jensen'in lüleli püskürtmeli kurutucu geliştirmesi ve bunu ticari ölçekli üretilip 1913 yılından itibaren satmaları ile yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlk dönel atomizer 1912 yılında Alman Kraus tarafından geliştirilmiş, fakat asıl 1933 yılında Danimarkalı mühendis Nyrop'un dünya çapında patent alması ile püskürtmeli kurutucuların etkin bir şekilde kullanılmalarının önü açılmıştır (Anon., 2009b).

Bir püskürtmeli kurutma sisteminde temel olarak şu bileşenler mevcuttur:

- 1) Kurutma hacmi,
- 2) Sıcak hava sistemi ve dağıtımı,
- 3) Ürün besleme sistemi,
- 4) Atomize cihazı,
- 5) Toz ayrıştırma sistemi,
- 6) Pnömatik aktarma ve soğutma sistemi,
- 7) Kurutma/soğutma sonrası ek kurutma amaçlı akışkan yatak,
- 8) Proses kontrol cihazları ve otomatik kontrol sistemi.

Bunların bir arada çalışmasının genel ilkeleri aşağıda sunulmuştur. Kurutucu hacim olarak genelde 40°-60° konik açılı, paslanmaz çelik silindirik tasarımlar kullanılır. Üzerlerinde 80-100 mm yalıtım olması ısı kayıplarını azaltma açısından tercih edilir. İç bölümünün hava akımını herhangi bir şekilde engellemeyecek, dolayısı ile toz birikimi olmayacak şekilde yapılması gerekir. Hacim üzerinde gözetleme camı/kapısı, ışık kaynağı, basınç emniyet ventilleri ile su veya buharlı yangın söndürme cihazları bulunmalıdır (Anon., 2009c). Şekil 6.2'de örnek bir püskürtmeli kurutma sistemi görülmektedir.



Şekil 6.2. Açık Döngü Püskürtmeli Kurutma Sistemi (Barbosa-Cánovas ve Vega-Mercado, 1996)

Temel olarak ürün viskozitesinin azalması ve kurutma ekonomisinin sağlanması amacıyla ön ısıtmaya tabi tutulur. Kurutma işlemi için besleme akışkanı sıvı ürün deposundan atomizer cihaza pompalanır. Atomizasyon işlemi etkin bir kurutmanın yapılabilmesi için son derece önemlidir. Sıcak hava ve püskürtülen akışkan paralel (parçacık ve hava aynı yönde hareketli), çapraz (parçacık ve hava ters yönde hareketli) ve karışık (hem paralel hem de çapraz bir arada) akışta hareket edebilirler. Paralel akışta ürün sıcaklığı çıkan hava sıcaklığından düşük olduğundan, sıcaklığa duyarlı ürünlerde daha çok tercih edilirler. Diğer taraftan oksijene duyarlı ürünlerde hava yerine azot gazı inert (ürün ile herhangi bir reaksiyona girmeyen) kurutma ortamı olarak kullanılabilir. Atomizer, santrifüj kuvveti etkili olduğu dönel; basınç ile ortaya çıkan kuvvet etkili olduğunda basınç lüleli ve kinetik enerji etkili olduğu zaman iki akışkan lüleli ya da ultrases lüleli olabilir. Dönel atomizer viskoz maddelerde, kristalli yapılarda, daha yüksek kurumadde içeriklerinde avantaj taşır. Basınç lüleleri, yüksek basınç düşük kapasiteli (300-400 bar, %40-42 kurumadde akışkan için lüle başına 50-150 kg/h besleme debisi) ile düşük basınç yüksek kapasiteli lüleler (150-200 bar, %48 kuru maddeli akışkan için lüle başına 1000-1500 kg/h besleme debisi) olmak üzere iki çeşittir. Daha sonra akışkan sıvı, 10 ile 200 mm çapında küçük damlacıkların oluşabilmesi amacıyla pompalanarak bir nozül veya atomizerden geçirilerek yüksek miktarda yüzey alanı elde edilir. Damlacıklar kurutma bölgesine püskürtülüp 150° ile 200°C arasında değişen sıcak hava ile temas ettirmek vasıtasıyla kurutulurlar. Kuru ürün sıcak havadan siklon veya filtreler ile ayrılırlar.

Ürünün kurutucu hacime beslenmesi ile eş zamanlı olarak hava, kurutucu hacimin tepesinde bulunan dağıtıcılar yardımı ile ortama verilir. Bunun öncesinde kurutma havasının dış ortamdan filtreden geçirilerek alınması ve ısıtılarak fan yardımı ile ortama beslenmesi gerekir. Boru üzeri kanatçıklı doğrudan olmayan ısıtma sistemi kullanılarak 5 (m/s) hızındaki kurutma havası 175-250°C'ye kadar ısıtılabilir. Isıtmanın doğrudan doğal gaz yakılarak yapıldığı sistemlerde istenirse 2000°C'lere kadar erişilebilir. Bu durumda yanma ile ortaya çıkan su ve NOx'lere dikkat edilmelidir.

Atomize edilmiş damlacıklar sıcak hava ile temas ettiklerinde buharlaşma gerçekleşir ve bu sırada buharlaşma gizli ısıları üründen ve havadan alınarak, her ikisi de soğurlar. Püskürtülen maddenin kurutulmasından sonra kurutulmuş ürünün çoğu kurutma haciminin tabanına düşer ve pnömatik taşıma ile soğutma sistemine alınır. Pnömatik taşıma toz ürünün tipine göre 4-5 kat fazla hava debisi ile yapılır. Hava hızı 20 m/s'ye kadar çıkabilir. Kurutucu içindeki kurutma yeterli gelmez ise akışkan yataklı ek kurutma sistemi kullanılabilir (Anon., 2009d).

Püskürtmeli kurutucularda nem çok hızlı bir şekilde buharlaşır ve kurumanın büyük bölümü küçük damlacıkların yüzey/hacim oranından dolayı sabit kuruma periyodunda gerçekleşir. Dolayısıyla ürünün sıcaklığı büyük çoğunlukla havanın ıslak termometre sıcaklığında kalır. Kurumanın sonlarına doğru ürünün sıcaklığı artsa da bu süre çok kısa (1-20 saniye) olduğundan ürüne herhangi bir zarar vermez (Tang ve Yang, 2004). Toz halindeki çok küçük taneler kurutma havası içinde kaldıklarından, hava dışarı verilmeden ayrılmaları gerekir. Bunun için siklonlar, torba filtreler ve ıslak tutucular kullanılır. Çapı 1 m'den az siklonlar yüksek verimli olmalarına rağmen, zor temizlenmeleri, girinti-çıkıntılarında mikrobiyal birikimlere daha açık olmaları nedeni ile günümüzde %99.5 verimli, 2.5-3 m çapındaki, 25000-30000 (kg hava/h) kapasitesine sahip püskürtmeli kurutucular daha çok tercih edilirler. Torba filtreler %99.9 verimle çalışırlar. Ancak işçilik maliyetleri ve sanitasyon gibi problemleri bulunur. Islak tutucularda tozlu hava dışarı verilmeden önce suyun, sütün ya da peynir altı suyunun içinden geçirilerek, tozun ayrılması sağlanır. Bazı uygulamalarda egzost havası doğrudan dışarı verilmeyip, besleme havasının ısıtılması için kullanılabilir. Isının bu şekilde geri kazanımına rejenerasyon denilir. Isı geri kazanımı ve besleme akışkanının derişikliğine bağlı olarak her 1 kg suyun buharlaşması için 700-1000 kcal'ye ya da her 1 kg kurutulmuş ürün için 1000-1600 kcal ısı enerjisine ihtiyaç bulunur.

Püskürtmeli kurutucular gıda sanayinde süt, peyniraltı suyu, laktoz, yumurta vb. ürünlerin kurutulmasında; sodyum kazeinat, dondurma karışımları, bebek mamaları vb. üretiminde yoğun olarak kullanılırlar (Anon., 2009d).

3. *Akışkan Yatak Kurutucular:* Gıda maddesinin hava ile akışkan hale getirilmesi prensibine dayanmaktadır. Parçacık üzerindeki basınç düşümü ile orantılı olarak hava tarafından uygulanan kaldırma kuvveti parçacığın ağırlığına eşit olduğu zaman, parçacık akışkanlaşmaya başlar. Havanın sahip olabileceği minimum hız, gıda maddesini akışkanlaştırmaya yetecek derecede olmalıdır. Bu ise gıdanın boyutları, şekli ve yoğunluğu ile değişmektedir. Tipik olarak hava hızı akışkanlaşma hızının 2 ile 4 katı arasında değişmektedir. Parçacığın akışkanlaştırılması ile kurutma yüzey alanı artacağından, kütle ve ısı transferi de artmaktadır. Tipik bir akışkan yatak kurutucu saatte 10 kg ile 100 ton arasında gıdayı 1 dakika ile 2 saat arasında değişen bir zamanda kurutabilmektedir.





## 7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİ

### 7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİ

Dondurarak kurutma yöntemine liyofilizasyon<sup>6</sup> da denmektedir. İlk olarak 1940'larda kuru plazma ile kan ürünlerinin büyük miktarda üretimi için geliştirilmiştir ve daha sonra antibiyotik ile biyolojik maddeler endüstriyel ölçekte dondurarak kurutma ile hazırlanmıştır.

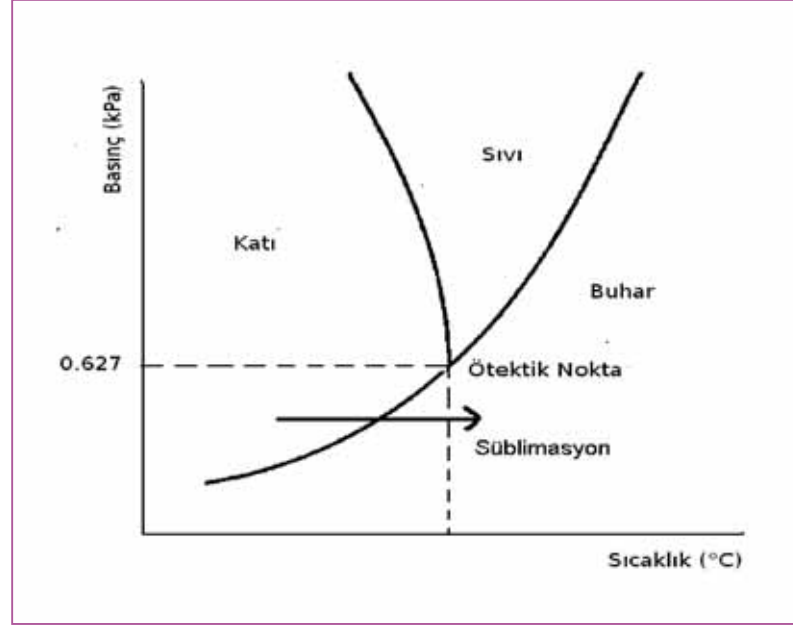
Sıcak hava ile kurutma ve dondurarak kurutma arasındaki farklar aşağıdaki tabloda verilmiştir. Her ikisinin de ayrı ayrı avantajları bulunurken, kalite açısından dondurarak kurutma öne çıkmaktadır.

Sıcak Hava ile Kurutma	Dondurarak Kurutma
Sebze ve tane gibi kolay kuruyan ürünlerde başarılıdır.	Birçok üründe başarılı olarak uygulanabilmesine rağmen, diğer yöntemler ile kurutulamayan gıdalar ile uygulaması sınırlıdır.
Et ürünlerinde başarılı değildir.	Pişmiş ve ham etin kurutulmasında başarıyla kullanılabilir.
Sıcaklık 37° ile 93°C arasında değişebilir.	Sıcaklık donma noktasının altında olabilir.
Atmosferik basınçta gerçekleşir.	Basınç oldukça düşüktür (27-133 Pa)
Suyun gıda yüzeyinden evaporasyonu ile gerçekleşir.	Buzun süblimasyonu (katı fazdan direk buhar fazına geçiş) ile gerçekleşir.
Katı madde hareketinden kaynaklanan yüzey sertleşmesi gerçekleşebilir.	Katı madde hareketi minimum seviyededir.
Ürün üzerindeki stresten dolayı yapısal bozulmalar ve büzülme meydana gelir.	Büzülme ve yapısal değişimler minimum seviyededir.
Kurutulan ürünün rehidrasyonu minimum seviyededir.	Hızlı rehidrasyon meydana gelir.
Koku ve aroma çoğunlukla değişmektedir.	Koku ve aroma muhafaza edilebilmektedir.
Ürünün rengi genellikle kurutma sonunda daha esmerdir.	Ürün rengini muhafaza edebilmektedir.
Kurutma maliyeti düşüktür.	Kurutma maliyeti sıcak havaya göre genellikle 4 kata kadar daha fazladır.

**Tablo 7.1.** Sıcak Hava ile Kurutma ve Dondurarak Kurutma Arasındaki Farklar (Fellows, 2000)

Dondurarak kurutma genel olarak iki basamaktan oluşur : (1) ürün dondurulur, ve (2) ürün indirgenmiş basınç altında direkt süblimasyon ile kurutulur (Mercado ve ark., 2001). Şekil 7.1'de de görüldüğü üzere süblimasyonu sağlamak için sistem basıncı kritik noktanın ( $P_c$ ,  $T_c$ ) altına indirilirken sıcaklık artırılır.

<sup>6</sup> Fransızca "lyophilisation" kelimesinden gelmektedir.



Şekil 7.1. Suyun Faz Diyagramı

Dondurarak kurutma pahalı olmasına karşın kalite açısından ele alınacak olursa en iyi kurutma yöntemidir. Diğer taraftan pahallığın ürün fiyatına göre izafi bir değer olduğu akıldan çıkarılmamalıdır. Hammaddenin ilk görünüşünü, tadını, rengini, lezzetini, yapısını koruması dondurarak kurutmayı en iyi kurutma yöntemi yapmaktadır. Ürün ayrıca ilk şeklini ve boyutlarını koruduğu için rehidrasyon özellikleri iyi olmaktadır (George ve Datta, 2002). Dondurarak kurutulmuş gıdaların rehidrasyon oranı genellikle hava ile kurutulanlardan 4-6 kat daha yüksek olduğundan, hazır yemek ve çorba gibi dondurarak kurutulmuş ürünleri mükemmel yapmaktadır (Ratti, 2001). Bununla birlikte kurutmada itici güç olan buhar basıncı konvansiyonel metotlara göre oldukça düşük olduğundan, kurutma zamanı diğer yöntemlere göre daha uzun, dolayısıyla maliyet bağılı olarak daha fazladır. Bu nedenle dondurarak kurutma, pahalı sebzelerin kurutulmasında ekonomik bir yöntem olmaktadır (Datta ve George, 2002).

Dondurarak kurutma gıdaların raf ömrünü uzatmak için cazip bir yöntem olarak gösterilmektedir (Ma ve Arsem, 1982; Vega-Mercado ve ark., 2001). Gıda ürünlerinin dondurarak kurutulması iki temel neden dolayı tercih edilir (Vega-Mercado ve ark.,2001):

1. *İşlem sırasında hava yok sayılacak kadar azdır:* Düşük işleme sıcaklığı ve havanın yokluğu oksidasyona bağlı bozulmaları ve kimyasal modifikasyonları önlemektedir.
2. *Ortam sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda kurutma:* Yüksek sıcaklıkta yapıda, görünümde ve/veya aromada değişiklik veya bozulma oluyorsa, vakum altında minimum zararlarla kurutulabilirler.

Dondurarak kurutma işlemi üç temel basamaktan oluşmuştur: ürünün dondurulması, birincil kuruma ve ikincil kurutma. Dondurma aşamasının temel amacı ürün içinde hareketli halde bulunan serbest suyun dondurulmasıdır. Dondurma aşaması ürünün yapısı, şekli, içinde bulunan buz kristallerinin dağılımı açısından önemli olduğundan son ürünün yapısını da etkilemektedir. Birincil kurutma aşamasında donmuş ürün süblimasyonun gerçekleşebilmesi için vakum altında ısıtılır. Bu sırada ürün ötektik nokta (Şekil 7.1'de 0.627 kPa ve 0°C noktası) altında tutulur.

Birincil kurutma aşamasında ürün içinde bulunan toplam nemin %90'ı, serbest suyun tamamı ve bir kısım bağlı su, süblimasyon yolu ile uzaklaştırılır. İkincil kurutma aşamasında donmamış halde bulunan bağlı su desorpsiyon yolu ile kuru tabakalardan uzaklaştırılarak son üründe %1-3 arasında nem kalır. Son aşama sıcaklık artırılarak ve suyun kısmi buhar basıncı düşürülerek gerçekleştirilir. İkincil kurutma aşaması bağlı suyun düşük buhar basıncından dolayı birincil kurutma aşamasının %30-50'si arasında bir zaman dilimine ihtiyaç duyar. Dondurarak kurutma işlemi mevcut tüm serbest ve bağlı su uzaklaştığı zaman sonlandırılır. Son durumda ürün içinde kalan nem miktarı ürünün yapısal bütünlüğüne ve raf ömrüne etki etmeyecek miktardadır (Walti-Chanez ve ark., 2004; Fellows, 200).

Dondurarak kurutma sırasında dondurma, vakum, süblimasyon ve yoğunlaştırma işlemleri meydana gelir.

Tablo 7.2'de herbir işlemin harcadığı enerji yüzdesi görülmektedir.

Aşama	Enerji Harcaması (%)
Dondurma	4
Vakum	26
Süblimasyon	45
Yoğunlaştırma	25

**Tablo 7.2.** Dondurarak Kurutma işleminde enerji harcaması (Ratti, 2001)

Tablodan da anlaşılacağı üzere süblimasyon neredeyse enerjinin yarısını harcarken, dondurma aşaması yüksek enerji tüketmemektedir. Vakum ve yoğunlaştırma aşamalarının enerji harcaması hemen hemen eşit sayılabilir. Klasik vakum dondurarak-kurutma işleminde yapılacak herhangi bir yenilik şu noktaları amaçlamalıdır (Ratti, 2001):

- Süblimasyona yardımcı olabilmek için ısı transferinin geliştirilmesi,
- Vakumun kısıtlanması için kurutma zamanının azaltılması,
- Yoğunlaştırıcı kullanımından sakınılabilmesi.

Dondurarak kurutulacak maddeye mikrodalga ışınlama uygulandığında kuru tabakalar etkilenmez ve ışınlama donmuş bölge tarafından absorbe edilir. Donmuş bölgenin yüksek ısı iletkenliği olduğundan, mikrodalga enerji kullanılarak süblimasyon süresi ve dolayısıyla dondurarak kurutma zamanı %60-75 oranında azaltılabilmektedir. Ek olarak konvansiyonel dondurarak-kurutma ile mikrodalga enerji kullanılarak yapılan dondurarak kurutma karşılaştırıldığında, ürünler benzer veya mikrodalga kullanılarak kurutulduğunda daha yüksek kalitede olmaktadır (Ratti, 2001).

Dondurarak kurutmanın diğer kurutma yöntemlerine göre avantajı son ürünün oldukça kaliteli olmasıdır. Bu avantajları aşağıdaki şekilde listelemek mümkündür:

1. Aroma ve tadın oldukça iyi muhafazası,
2. Besinsel değerlerin yüksek miktarda korunması,
3. Büzülmenin minimum olması,
4. Şekil, renk ve görünüşün minimum derecede değişmesi,
5. Yapı ve doku üzerine ihmal edilecek miktarda az etki etmesi ve son yapının gözenekli olmasından dolayı rehidrasyon özelliklerinin iyi olması.

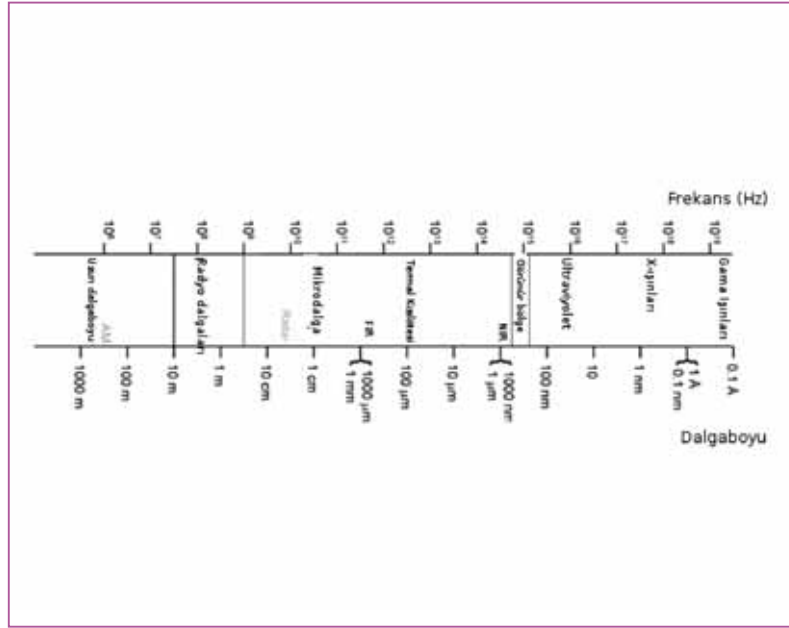


## 8. BİYOLOJİK MALZEMELERİN MİKRODALGA İLE İŞLENMESİ

### 8. BİYOLOJİK MALZEMELERİN MİKRODALGA İLE İŞLENMESİ

#### 8.1. Elektromanyetik Spektrum

Mikrodalgalar elektromanyetik dalgalar olup, 300 MHz ile 300 GHz arasında yer alırlar (Şekil 8.1). Bu bölge UHF ("Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)", 300 MHz-3 GHz), SHF ("Super High Frequency (Süper Yüksek Frekans)", 3 GHz-30 GHz) ve EHF ("Extremely High Frequency (Sonderece Yüksek Frekans)", 30 GHz-300 GHz) alt bölgelerinden oluşmaktadır. Elektromanyetik spektrumda düşük frekanslarda radyo dalgaları, yüksek frekanslarda kızılötesi ve görünür ışık ile iç içe geçmişlerdir (Regier ve Schubert, 2005).



Şekil 8.1. Elektromanyetik Spektrum ( <http://www.answers.com>)

#### 8.1.1. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar ile enerji transferi ışınım mekanizması ile gerçekleşir. Dalgalar foton veya quanta denilen ayırık enerji paketlerinden oluşmuş gibi düşünülebilir ve frekansı<sup>7</sup> olan her bir fotonun enerjisi eşitlik (8.1) ile hesaplanabilir.

$$e = h \cdot f$$

(8.1)

Burada  $h=6.625 \cdot 10^{-34}$  (J·s) değerine sahiptir ve Planck sabiti olarak adlandırılır (Çengel, 1998).

<sup>7</sup> Frekans bir olayın birim zaman (genelde 1 saniye) içinde hangi sıklıkla, kaç defa tekrarlandığının ölçümüdür. Bir olayın frekansını ölçmek için o olayın belirli bir zaman aralığında kendini kaç kere tekrar ettiği sayılır. Sonrasında bu sayı zaman aralığına bölünerek frekans elde edilir. SI birim sisteminde frekans Hertz (Hz) ile gösterilir. Bir Hertz, bir olayın saniyede bir tekrarlandığı anlamına gelir. Olayın iki Hertz'lik bir frekansa sahip olması, olayın saniyede kendini iki kere yinelediğini ifade eder. Saatin saniyede bir tıklaması 1 Hz'dir. Elektrik şebekesinden dağıtılan elektrik Türkiye'de 50 Hz'dir. Bu alternatif gerilimin saniyede 50 kere salındığını göstermektedir. 1000 Hz kısaltılmış olarak 1 KHz (kilohertz, 103 Hz), 1 milyon Hz 1 MHz (megahertz, 106 Hz), 1 milyar Hz 1 GHz (gigahertz, 109 Hz), 1 trilyon Hz ise 1 THz (terahertz, 1012 Hz) şeklinde ifade edilir.

Elektromanyetik dalgalar iki bileşenden meydana gelmiştir: elektrik alan (E, birimi V/m) ve manyetik alan (H, birimi A/m). Elektrik ve manyetik alanlar hem ilerleme yönüne hem de birbirine diktir. Frekans ve dalga boyu aşağıdaki eşitlik ile ilişkilendirilmektedir:

$$c = \lambda \cdot f \quad (8.2)$$

Eşitlik (8.1) ve (8.2) bir arada düzenlendiğinde,

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (8.3)$$

bulunmaktadır. Mikrodalgalar 300 MHz ile 300 GHz arasında yer aldıklarından, Eşitlik (8.2)'ye bu dalga boyları yazılıp işlem yapıldığında enerji değerleri  $1.24 \cdot 10^{-6}$  eV ve  $1.24 \cdot 10^{-3}$  eV<sup>8</sup> olarak elde edilir. Sonuç olarak mikrodalgaların fotonları yaklaşık 1µeV ile 1 meV arasındaki enerji değerlerine sahip olduğundan iyonlaştırma etkisine sahip değildirler<sup>9</sup> (Ehlerman, 2002). Vakumda elektromanyetik dalgaların hızı yaklaşık  $3 \cdot 10^8$  (m/s) olduğu için mikrodalgaın söz konusu olduğu frekanslarda mikrodalgaın dalga boyu 1 m ile 1 mm arasında yer alır. En çok kullanılan iki frekans 2450 MHz ve 915 MHz için bu formül uygulandığında dalga boyları sırası ile 12.25 cm ve 32.78 cm olarak elde edilmektedir (Saltiel ve Datta, 1998; Regier ve Schubert, 2005).

### 8.1.2. Tanım ve yasalar

Mikrodalgaların frekans aralığı içinde TV yayınlarında, cep telefonu ve radar gibi haberleşme alanlarında da kullanılan frekanslar da yer almaktadır. Dalgaların birbirleriyle girişimlerini engellemek amacıyla endüstriyel, bilimsel ve tıbbi alanlarda kullanılmak üzere özel frekans bandları (ISM "Industrial Scientific Medical" olarak da adlandırılır) ayrılmıştır. Mikrodalgalar için ISM bandları 433, 915 ve 2450 MHz'dir. Bunlardan 433 MHz çok fazla kullanılmamakla beraber 915 MHz de Avrupa kıtasında genel olarak kullanılmamaktadır. Belirtilen frekans aralığı dışına sızıntılar oldukça kısıtlanmıştır. Diğer taraftan 915 ± 15 MHz kullanımı endüstriyel açıdan avantaj taşısa da ev tipi mikrodalgalarda genel olarak 2450 ± 50 MHz tercih edilmektedir. Ancak Avrupa'daki endüstriyel uygulamalarda 2450 MHz de yaygın olarak kullanılmaktadır (Dibben, 2001; Regier ve Schubert, 2005).

Girişim yasaları dışında, ayrıca iki tip güvenlik yasası da mevcuttur (Regier ve Schubert, 2005):

1) Mikrodalga cihaz ile çalışan bir kişinin maruz kalabileceği veya vücudu tarafından emilebilecek maksimum miktar: Bu yasa ısı etkilerinin hassas organlar üzerinde yapabileceği etki de düşünülerek  $1 \text{ (mW/cm}^2\text{)}$  ile kısıtlandırılmıştır. Ayrıca gelen ışınımın gücünün vücut ağırlığına oranı olarak tanımlanan özgül emilim oranı da (SAR "Specific Absorption Rate") maksimum  $0.4 \text{ (W/kg)}$  değerine sahip olabilmektedir.

<sup>8</sup>  $1 \text{ eV} = 1.60217653 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

<sup>9</sup> Atomik hidrojeni iyonize edebilmek için 13.6 eV enerji gereklidir. Bu ise  $1.24 \cdot 10^{-6}$  eV (300 MHz için) değerinin yaklaşık 11 milyon,  $1.24 \cdot 10^{-3}$  eV (300 GHz için) değerinin ise 11000 katıdır. Pu-239 atomunun fizyonunda (nükleer parçalanmasında) açığa çıkan enerji 210 MeV ( $210 \cdot 10^6 \text{ eV} = 210 \text{ milyon eV}$ )'dur. X ışınları ile Gamma ışınları arasında yer alan  $10^{18}$  Hz frekansının enerjisi ise 41350 eV'dur. CERN (<http://public.web.cern.ch/public/>)'de 30 Kasım 2009'da proton ışınlarının çarpıştırılması ile 1.18 TeV ( $10^{12}$  eV), 16 Aralık 2009'da 2.36 TeV enerji elde edilmiştir. 2010 yılında 7 TeV'a ulaşılması hedeflenmektedir.

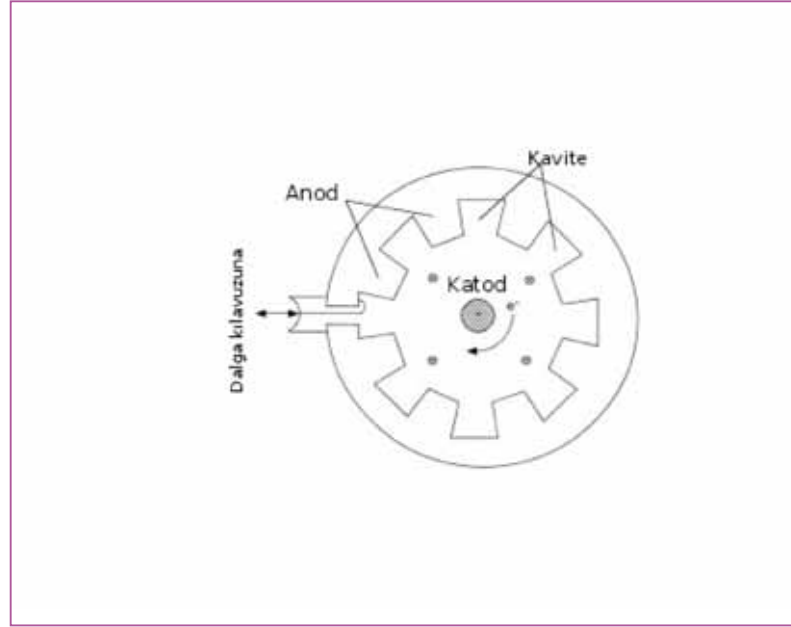
2) Mikrodalga ekipmandan çevreye olabilecek sızıntı miktarı: Sızıntının olduğu noktadan 5 cm uzakta maksimum 5 (mW/cm<sup>2</sup>) olarak yasal olarak sınırlandırılmıştır<sup>10</sup>.

## 8.2. Mikrodalga Sistemler

Mikrodalga ile ilgili ilk çalışmalar Percy Spencer ve Raytheon firması tarafından yapılmıştır. Spencer, 1945 yılında tesadüf olarak mikrodalga anteni dalga kılavuzunun çeşitli maddeleri (kendi vücudu, mısırın patlaması, cebindeki çikolatanın erimesi ve patlayan bir yumurta ile ilgili "efsaneler" de literatürde yer almaktadır) ısıttığını gözlemlemiştir. Bugünkü fırınlarda kullanılan 2450 MHz'i uygun frekans olarak seçen kişi Spencer olup konu ile ilgili ilk (1950, gıdaları işleme ile ilgili yöntem) ve toplamda 34 patentin sahibidir (bakınız EK C<sup>11</sup>). Raytheon 1950'lerde ticari mikrodalga fırınların öncülüğünü yapmıştır. Bunlar büyük, pahalı, duvara monte edilen fırınlardı ve Westinghouse ile Tapan firmaları tarafından piyasaya sürülmüşlerdi. 1960'ların ortalarında Raytheon grubu tarafından satın alınan Amana firması 500 USD'nin altında, tezgah üstü portatif fırını üretmiş ve mikrodalga pazarı gelişerek günümüze ulaşmıştır. Tipik bir mikrodalga sistem üç temel kısımdan oluşmaktadır: magnetron, dalga kılavuzu ve aplikatör. Bunlar kısaca aşağıda açıklanmıştır.

### 8.2.1. Magnetron

Endüstriyel ve ev tipi mikrodalga fırınlarda mikrodalga enerji kaynağı olarak en çok kullanılan cihaz Şekil 8.2'de gösterilen magnetrondur.



Şekil 8.2. Magnetronun yapısı (Regier ve Schubert, 2001)

Magnetron bir osilatör tübü olup, iki temel kısımdan meydana gelmektedir: anod ve katod. Magnetron, anoda beslenen düşük akım ve yüksek voltajdaki (4000-6000 V) doğru akım elektrik enerjisini mikrodalga enerjisine dönüştürür. Verimi genellikle %70-90 civarındadır.

<sup>10</sup> Güneşten yeryüzüne gelen ortalama toplam ısınım şiddeti Ülkemiz için günlük ortalama 3.6 kWh/m<sup>2</sup>'dir (<http://www.eie.gov.tr>). Güneşlenme süresi ise günlük ortalama 7.2 saat/gün'dür. Böylelikle anlık ısınım şiddeti 500 W/m<sup>2</sup> olmaktadır. 5mW/cm<sup>2</sup> (=50 W/m<sup>2</sup>) değeri, dalgaboyunu dikkate almadan kıyaslandığında yaklaşık %10'u gibi bir mertebeye karşılık gelmektedir. Ancak aynı zamanda mikrodalga enerjisine maruz kalınan süre de dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

<sup>11</sup> Percy Spencer ile ilgili patentler literatürde farklı şekilde değerlendirilmektedirler. Bu amaçla tüm patentleri derlenerek EK C'de sunulmuştur.

İki türlü magnetron vardır: kesikli ve sürekli dalga. Kesikli magnetronlar daha çok radar uygulamaları için, sürekli magnetronlar ise mikrodalga fırınlarda kullanılır (Tang, 2005). Magnetronun verebileceği maksimum güç anodun sıcaklığı ile kısıtlıdır. Genel olarak 2.45 GHz frekansta hava soğutmalı magnetronlar için güç 1.5 kW iken, su soğutmalı magnetronlarda güç 25 kW'a kadar çıkabilmektedir. Genelde ABD'de kullanılan 915 MHz magnetronlarında ise daha yüksek güçlere çıkılması mümkün olmaktadır (Regier ve Schubert, 2005).

### 8.2.2. Dalga Kılavuzu

Elektromanyetik dalgalar aplikatöre koaksiyel kablo gibi iletim hatları veya dalga kılavuzları ile iletilirler. Yüksek frekanslarda koaksiyel kabloya nazaran dalga kılavuzlarında daha düşük kayıp olduğundan, mikrodalga uygulamalarında tercih edilirler. Temel olarak dalga kılavuzları içi boş iletken, dikdörtgen veya silindirik şeklindeki yapılardır (Regier ve Schubert, 2005).

### 8.2.3. Mikrodalga Aplikatör

Ev tipi mikrodalga fırın için aplikatör terimi gıdanın konulduğu mikrodalga fırın içindeki hacim olarak da düşünülebilir. Uygulamada aplikatörler alan konfigürasyonuna göre üçe ayrılmaktadır: yakın-alan ("near-field"), tekli-mod ve çoklu-mod.

*Yakın-alan aplikatörleri:* Anten veya bir dizi boşluklardan geçerek aplikatöre gelen mikrodalgalar direk olarak ısıtılacak gıdanın üzerine gönderilirler (Regier ve Schubert, 2005).

*Tekli-mod aplikatörleri:* Bu tip aplikatörlerin çalıştığı frekansta sadece tek bir rezonans frekansı vardır. Malzemenin hacmi ve dielektrik kayıp faktörü oldukça küçük olması gerektiğinden, bu tip aplikatörlerin gıda endüstrisinde kullanımları oldukça sınırlıdır.

*Çoklu-mod aplikatörleri:* Gıda ısıtma uygulamalarında kullanılan aplikatörlerin büyük çoğunluğu daha büyük malzemeleri işlemek için çoklu-mod tipindedir (Dibben, 2001) ve boyutları tekli-mod aplikatörlere göre daha büyüktür (Regier ve Schubert, 2005). Aplikatör içinde elektrik alanının tek düze olabilmesi için mod-karıştırıcı ("mod stirrer") kullanılır.

## 8.3. Malzemelerin Elektromanyetik Özellikleri

### 8.3.1. Dielektrik malzemelerin polarizasyonu

Pozitif ve negatif yükler birbirinden belli bir mesafe uzakta olurlarsa elektrik olarak dipol özelliğe sahip olurlar. Sıfırdan farklı sürekli dipol momente sahip moleküller, polar molekül olarak adlandırılırlar. Polar olmayan moleküller ise elektrik alan etkisi altında, elektron dağılımlarının değişmesi veya çekirdeğin yer değiştirmesi neticesinde polar özellik kazanabilirler. Bir malzemenin bağıl geçirgenliği  $\rho$  ("relative permittivity"), o malzemenin harici olarak uygulanan elektrik alan tesirinde ne kadar hızlı polarize olabileceğinin bir ölçüsüdür (Ryynanen, 2002).

Metaxas ve Meredith (1998) dört tip polarizasyon listelemiştir: elektronik, atomik, oryantasyon ve Maxwell-Wagner. *Elektronik polarizasyon*, elektronların, elektrik alan etkisi altında çekirdek etrafında yer değiştirmesinden kaynaklanırken; *atomik polarizasyon* yüklerin eşit olarak dağılmamasından dolayı atom çekirdeğinin yer değiştirmesinden kaynaklanır. Sürekli dipole sahip olan polar dielektrik moleküller, sürekli yön değiştiren elektrik alanı takip etmek için saniyede milyonlarca kez yön değiştirebilirler ve bu da *oryantasyon polarizasyonu* olarak adlandırılır. Heterojen sistemlerin arayüzünde yük birikmesinden kaynaklanan polarizasyona *Maxwell-Wagner polarizasyonu* denir. Çözünmüş tuz iyonları gibi, malzeme içinde bulunan iyonlar, sürekli yön değiştiren alan içinde hareket ederler. İyonların hareketinden kaynaklanan ve doğrudan akım iletkenliği olarak da adlandırılan ve omik ısıtmaya benzeyen bu ısıtma şekli de malzemenin ısınmasına katkıda bulunur (Srikiatden ve Roberts, 2006).



Tüm bu belirtilen polarizasyon mekanizmaları içinde 1 GHz üzerindeki frekanslarda oryantasyon polarizasyonu mikrodalga ısıtma uygulamalarında etkin olmaktadır (Ryynanen, 2002). Atomik polarizasyon 200 MHz'den daha düşük frekanslarda önemli bir rol oynamaktadır (Wang ve ark., 2003).

### 8.3.2. Malzemelerin dielektrik özellikleri

Radyo frekansı (RF) ve mikrodalga ısıtmada malzemenin dielektrik özellikleri en önemli fiziksel parametredir (Tang, 2005) ve malzemenin elektromanyetik ışınlamaya etkileşimini göstermektedir (Ryynanen, 2002). Ürün ve proses geliştirme aşamalarında malzemenin fiziksel özelliklerinin bilinmesi önem arz etmektedir (Tang, 2005).

Malzemenin mikrodalga ile etkileşimi kompleks geçirgenlik,  $\epsilon_r$ , malzemenin elektriksel enerji depolama kabiliyeti ve geçirgenlik,  $\mu$ , manyetik enerji harcanımı ile karakterize edilebilmektedir. Malzemenin kompleks geçirgenlik veya kompleks dielektrik sabiti aşağıdaki eşitlik ile ifade tanımlanabilmektedir:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon \left| e^{-j\delta} \right| \quad (8.4)$$

Burada  $\epsilon'$  = Bağıl dielektrik sabiti,  
 $\epsilon''$  = Bağıl dielektrik kayıp faktörü,  
 $\delta$  = Dielektrik kayıp açısı ( $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ )  
 $j = \sqrt{-1}$

olmaktadır.  $\epsilon'$  malzemenin elektromanyetik alanda iken elektrik enerjisi depolama kabiliyeti (vakum için  $\epsilon'=1$ ) ve  $\epsilon''$  ise depolanan elektrik enerjisinin ısıya çevrilebilme özelliğini göstermektedir (Metaxas ve Meredith, 1988; Tang ve ark., 2002).

Biyolojik malzemelerin 2450 MHz mikrodalga frekansında bağıl dielektrik sabiti 40 ile 70 arasında değişirken, bağıl dielektrik kayıp faktörü 10 ile 17 arasında değişir. Wang ve ark. (2003) Agilent 4291B Impedance analizleyici cihazını kullanarak peynir altı suyu protein jelinin dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörünü 27 MHz ile 1800 MHz arasında incelemiştir. 1800 MHz frekansında peynir altı suyu protein jelinin dielektrik kayıp sabiti ve dielektrik kayıp faktörü  $57.17 \pm 0.60$ ,  $23.30 \pm 1.25$  arasında bulunmuştur. Garcia ve ark. (2004) benzer bir araştırmayı üzüm suyu üzerinde 3 GHz frekansında gerçekleştirmişler ve üzüm suyunun dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörünü 65.358 ve 19.976 olarak bulmuşlardır. Örneklerden de anlaşılacağı gibi malzemelerin dielektrik özellikleri hem malzemenin sıcaklığı hem de elektromanyetik dalganın frekansı ile ilişkilidir. Bazı ürünlere ait dielektrik özellikler ve mikrodalganın nüfuz derinlikleri Tablo 8.1 ve Tablo 8.2 verilmiştir.

	Sıcaklık (°C)	915 MHz			2450 MHz		
		$\epsilon'$	$\epsilon''$	$d_p$ (mm)	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$d_p$ (mm)
Hava		1.0	0.0		1.0	0.0	
<i>Su</i>							
Distile/deiyonize	20	79.5	3.8	122.4	78.2	10.3	16.8
%0.5 tuz	23	77.2	20.8	22.2	75.8	15.6	10.9
Buz	-12	-	-	-	3.2	0.003	11615
<i>Mısırozüyağı</i>							
	25	2.6	0.18	467.0	2.5	0.14	220
<i>Taze meyve ve sebze</i>							
Elma	22	60.0	9.5	42.6	57.0	12.0	12.3
Patates	25	65.0	20	21.3	54.0	16.0	9.0
Kuşkonmaz	21	74.0	21	21.5	71.0	16.0	10.3
<i>Kurutulmuş meyve (% nem, yaş baz)</i>							
%87.5	22	56.0	8.0	48.9	54.5	11.2	12.9
%30.3	22	14.4	6.0	33.7	10.7	5.5	11.9
%9.2	22	2.2	0.2	38.7	2.2	0.1	28.9
%68.7	60	32.8	9.1	33.1	30.8	7.5	14.5
%34.6	60	22.5	6.8	36.8	19.7	6.6	13.2
%11	60	5.3	1.7	71.5	4.5	1.4	29.9
<i>Yüksek protein içerikli ürünler</i>							
Yoğurt	22	71.0	21.0	21.2	68.0	18.0	9.0
Peyniraltı suyu protein jeli	22	51.0	17.0	22.2	40.0	13.0	9.6
Pişmiş salam	25	61.0	96.0	5.1	60.0	42.0	3.8
	50	50.0	140.0	3.7	53.0	55.0	2.8
Pişmiş et	25	76.0	36.0	13.0	72.0	23.0	9.9
	50	72.0	49.0	9.5	68.0	25.0	8.9

Tablo 8.1. Bazı Gıdaların Dielektrik Özellikleri ve Mikrodalga'nın Nüfuz Derinlikleri (Tang, 2005)

Meyve/Sebze	Nem içeriği (%) (yaş baz)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	915 MHz		2450 MHz	
			'	''	'	''
Armut	84	940	67	11	64	13
Avokado	71	990	47	16	45	12
Çilek	92	760	73	14	71	14
Elma	88	760	57	8	54	10
Greyfurt	91	830	75	14	73	15
Havuç	87	990	59	18	56	15
Kabak	95	700	63	15	62	13
Kavun	89	950	72	18	69	17
Kavun (Kantalup)	92	930	68	14	66	13
Kiwi	87	990	70	18	66	17
Limon	91	880	73	15	71	14
Limon, yeşil	90	970	72	18	70	15
Mango	86	960	64	13	61	14
Muz	78	940	64	19	60	18
Papaya	88	960	69	10	67	14
Patates	79	1030	62	22	57	17
Patates, tatlı	80	950	55	16	52	14
Portakal	87	920	73	14	69	16
Salatalık	97	850	71	11	69	12
Soğan	92	970	61	12	64	14
Şalgam	92	890	63	13	61	12
Şeftali	90	920	70	12	67	14
Turp	96	760	68	20	67	15
Üzüm	82	1100	69	15	65	17

Tablo 8.2. Bazı Gıdaların Dielektrik Özellikleri ve Mikrodalga'nın Nüfuz Derinlikleri (Nelson ve Datta, 2001)

Birçok biyolojik malzemenin manyetik geçirgenlik ("magnetic permeability") değeri serbest uzayinki ( $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  W/A·m) ile aynı değere sahiptir. Dolayısıyla bu malzemeler elektromanyetik alanın sadece elektrik alan kısmı ile etkileşirler. Gıdalar, demir ve kobalt gibi eser miktarda manyetik malzeme içerdiğinden manyetik özelliğe sahip olmadığı kabul edilebilir. Ferrit gibi manyetik malzemeler manyetik alanla da etkileştiğinden kayda değer miktarda ısınmaya neden olur ve yemeklerin istenilen esmer rengi ("browning of dishes") almasında kullanılabilir (Ryynanen, 2002; Tang ve ark., 2002).

Elektrik alan şiddeti  $E_0$  olan bir elektromanyetik dalga büyük bir dielektrik malzeme içinde ilerken alan şiddetindeki azalmanın yola bağlı ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$E = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (8.5)$$

Elektrik alan şiddetindeki azalma miktarı aşağıdaki eşitlikte de gösterildiği gibi malzemenin kayıp faktörü ile ilişkilendirilebilmektedir (von Hippel, 1954):

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \epsilon' \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.6)$$

Bu eşitlikte  $\lambda_0$  serbest uzaydaki dalga boyunu göstermektedir.

Malzeme yüzeyinden içeri nüfuz eden dalganın gücünün  $1/e$ 'ye (Euler sayısı,  $e \approx 2.718$ ) düştüğü uzaklığa nüfuz derinliği adı verilmekte ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir (Metaxas ve Meredith, 1988; Tang, 2005):

$$d_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (8.7)$$

Eşitlik (8.6) ve (8.7)'den de görüldüğü gibi mikrodalganın frekansı arttıkça azalma faktörü de artmakta ve dolayısıyla nüfuz derinliği azalmaktadır. Ayrıca malzemenin bağlı dielektrik kayıp faktörünün değeri arttıkça penetrasyon derinliği de azalmaktadır.

#### 8.4. Malzemelerin mikrodalga ile ısınması

Mikrodalga enerjinin ısıya çevrilmesi temel olarak iki mekanizma ile açıklanmaktadır:

1. Sürekli dipol momente sahip olan moleküller çok hızlı bir şekilde yön değiştiren elektrik alan içinde dönme hareketi yaparlar. Elektrik alan saniyede milyonlarca kez yön değiştirdiği için moleküller de elektrik alanı takip etmeye çalışırlar. Fakat pratikte komşu moleküllerin elektrik alanlarından kaynaklanan sürtünmeden dolayı moleküllerin osilasyon<sup>12</sup> hareketinde gecikme olur ve bu da ısının açığa çıkmasını sağlar. Dolayısıyla çok düşük frekanslı bir elektrik alanda moleküller alanın yön değiştirmesini takip edebileceği için ısı açığa çıkmaz; benzer şekilde, çok yüksek frekansta (100 GHz'den büyük) ise moleküller alanı hiçbir şekilde takip edemeyeceği için ısı açığa çıkması mümkün olmamaktadır (Nijhuis ve ark., 1998; Ehlerman, 2002).

<sup>12</sup> Herhangi bir ölçülebilenin, merkezi bir değere (genelde bir denge noktasına) göre veya iki ya da daha fazla durum arasında genellikle zamana göre tekrarlanan değişikliklere verilen addır.

2. Yükler elektrik alanın yön değiştirmesinden dolayı hareket ederler (iyonik iletim) ve bu hareketleri sırasında birbirlerine bilardo topu misali çarptıkları için ısı açığa çıkar (Nijhuis ve ark., 1998).

Gıda maddeleri elektrik alana maruz kaldığında ortaya çıkan ısı enerjisi gıda maddesinin dielektrik kayıp faktörü ile orantılıdır. Isı transferi mekanizmalarını göz önüne almaksızın sıcaklıktaki artış miktarı (8.8) nolu eşitlik ile hesaplanabilmektedir (Nelson, 1996):

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f \cdot E^2 \cdot \epsilon'' \quad (8.8)$$

Eşitlik (8.8)'de C (J/kg°C) ısıtılan malzemenin özgül ısı miktarını,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) yoğunluğunu, E (V/m) elektrik alan şiddetini, f (Hz) frekansı,  $\Delta t$  (s) geçen süreyi, ve  $\Delta T$  (°C) sıcaklıktaki artış miktarını göstermektedir. Eşitlik (8.8)'in sol tarafındaki ifade hacimsel ısı artış miktarını ve sağ tarafındaki ifade ise mikrodalga enerjinin ısı enerjisine çevrilme oranını gösterdiği not edilmelidir. Eşitlik (8.8) sadece duyulur ısı miktarını göz önüne alırken, ısı transfer mekanizmalarını ihmal etmektedir. Datta (2001) tarafından önerilen ve enerji korunum mekanizması üzerine kurulmuş olan (8.9) no'lu tek boyutlu eşitlikte ise mikrodalga ısıtma, enerji üretim terimi olarak ele alınmıştır.

$$\underbrace{\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{enerji birikme oranı}} + \underbrace{\rho \cdot C \cdot u \cdot \frac{\partial T}{\partial x}}_{\text{konvektif enerji akışı}} = \underbrace{k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}_{\text{difüzyon enerjisi}} + \underbrace{\dot{Q}}_{\text{mikrodalga enerji üretimi}} - \underbrace{m_w \cdot h_{fg}}_{\text{buharlaşma sırasında kullanılan enerji}} \quad (8.9)$$

Eşitlik (8.9)'de Q (W/m<sup>3</sup>) hacimsel ısı üretimi, T sıcaklığı, u (m/s) hızı ve k (W/m·°C) ise ısı iletkenliği göstermektedir.

Gıdaların mikrodalga fırın içinde ısınmasını etkileyen faktörler Zhang ve Datta (2001) tarafından aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

1. Gıda maddesinin konduğu noktadaki elektromanyetik alan dağılım ve şiddeti,
2. Gıdanın geometrisi ve özelliklerine bağlı olarak elektromanyetik dalgaların gıdadan yansması,
3. Gıdanın geometrisi ve özelliklerine bağlı olarak elektromanyetik dalganın gıda maddesi içinde ilerlemesi.

Mikrodalga ısınmayı etkileyen faktörler malzemelerin özellikleri açısından bakıldığında Srikiatden ve Roberts (2006) üç önemli parametreyi belirtmektedir:

1. Dielektrik kayıp faktörünü etkileyen en önemli parametre nem miktarıdır. Daha fazla nem içeren malzemelerin dielektrik kayıp faktörü daha yüksek olacağından mikrodalga ile daha iyi ısınırlar (Tong, 1988). Fakat (8.8) no'lu eşitlik incelendiğinde özgül ısı miktarı düşük olan malzemelerin sıcaklık artışının daha fazla olacağı görülmektedir: Bundan dolayı mikrodalga enerji ile etkin bir şekilde ısıtılabilirler.
2. Malzemenin sıcaklığı dielektrik özelliklerini etkilemektedir. 2000-2800 MHz arasında malzemenin dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik sabiti sıcaklıktaki artış ile yavaş bir azalma gösterebilir.
3. Malzemenin dielektrik sabiti yoğunluk ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Gözenekli malzemelerde olduğu gibi hava boşluklarının fazla olduğu malzemelere mikrodalga enerji

derin bir şekilde penetre edebilir. Dolayısıyla, gözenekli malzemeler mikrodalga ile daha homojen ısınabilirler (Schiffmann, 1986).

Biyolojik malzemelerin mikrodalga ile işlenmesi sırasında her yeni teknolojiye olduğu gibi mikrodalğanın da dezavantajlarının olduğu unutulmamalıdır. Nijhuis ve ark. (1998) bu dezavantajları aşağıdaki şekilde listelemektedir:

1. Gıda maddesinin sıvı uçlarında veya köşelerindeki sıcaklık artışı diğer bölgelere göre daha yüksek olabilmektedir; dolayısıyla, bu bölgelerde kuruma veya yanma meydana gelebilir.
2. Hızlı kütle transferinden kaynaklanabilecek yapı bozulmaları olabileceğinden sisteme verilen mikrodalga enerji kontrol edilmelidir.
3. Mikrodalga ısıtma ve işlemenin gıda sanayinde yaygınlaşabilmesi ve arzulanan ısıtma şablonlarının elde edilebilmesi için mikrodalga ve gıda maddeleri arasındaki etkileşimin iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir (Tang ve ark., 2002).

#### **8.5. Biyolojik malzemelerin mikrodalga-yardımlı kurutulması**

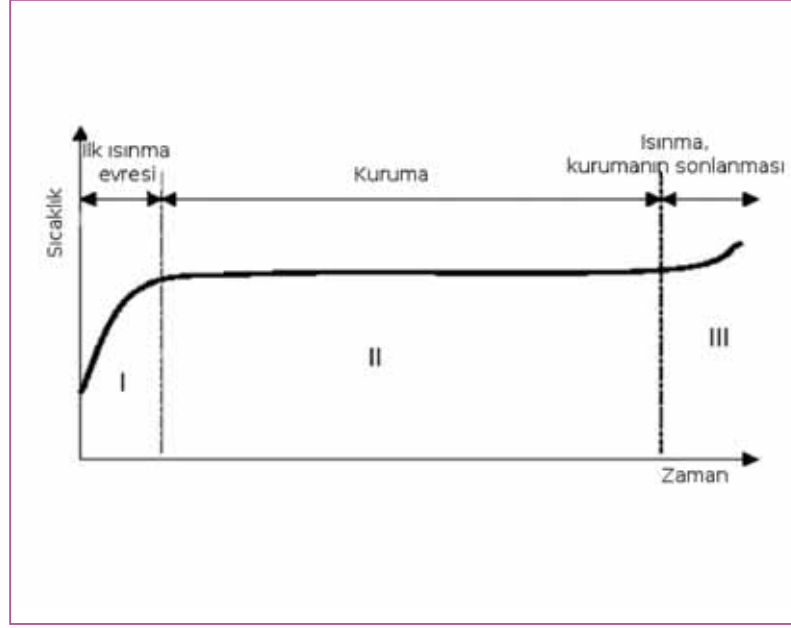
Meyve ve sebzelerin mikrodalga-yardımlı olarak kurutulması, yüksek kütle transferi katsayıları ve genel olarak daha iyi son ürün eldesinden dolayı büyük ilgi görmüştür. Bu kitabın yazımı sırasında Google ve Yahoo gibi popüler arama motorlarında "microwave drying" anahtar sözcüğü girildiğinde sırasıyla 1,440,000 ve 2,850,000 sonuç elde edilmiştir. Aynı anahtar sözcük için Scholar Google, Science Direct ve Blackwell Synergy sitelerinde yapılan bilimsel kaynaklı arama ise sırasıyla 111,000, 11,535 ve 223 tarama döndürmüştür. Bu kadar çalışmaya rağmen, mikrodalğanın tek kurtarıcı olmadığı, ancak gerektiği yerde kullanıldığında çok önemli bir yardımcı olduğu not edilmelidir.

##### **8.5.1. Biyolojik malzemelerin kuruma esnasındaki ısınma şablonları**

Geleneksel ısı transferinin aksine mikrodalga ısınma bir yüzeyden ısının iletimi prensibine dayanmamaktadır. Nemli malzemenin içine nüfuz edebilen mikrodalgalar hacimsel ısıtma meydana getirerek kurumanın fiziksel mekanizmasını değiştirmektedirler.

Şekil 8.3'de görülen ısıtma profili için Perkin (1979) ve Zhang ve ark. (2006) radyo frekansı ve mikrodalga kurutmayı üç ana kategoride incelemiştir:

1. Birinci evrede mikrodalga enerjisi nem içeriği bağlı olarak yüksek olan gıda içerisinde ısı enerjisi çevrilir ve ürünün sıcaklığı zamanla artmaya başlar. Katı malzeme içinde bulunan sıvı, kaynama noktasına hızlı bir şekilde ısıtılır. Ürün içerisindeki nemin buhar basıncı, bulunduğu ortamın buhar basıncından daha yüksek olduğu zaman, ürün nem kaybetmeye başlar. Sıcaklığa hassas olmayan malzemelerin ön ısıtması için uygulanabilmektedir.
2. İkinci evre hızlı kuruma bölgesidir. Mikrodalga vasıtasıyla kazanılan ısı enerjisi, buharlaşma enerjisini karşılama kullanılır. Katı içinde bulunan sıvının kaynama sıcaklığına erişilmediği zaman, kurutma boyunca sıcaklık artışı gözlemlenebilir.
3. Üçüncü evre azalan kuruma bölgesidir. Buharlaşma için gerekli olan enerji, mikrodalga ile kazanılan ısı enerjiden daha az miktarda olduğundan ürün içerisindeki nemin sıcaklığı kaynama sıcaklığının üzerine çıkabilmektedir. Isıya duyarlı olmayan malzemeler için kullanılabilir (Metaxas ve Meredith, 1988).



Şekil 8.3. Yüksek Frekanslı Kurutma Sırasındaki Isı Artışı

Boldor ve ark. (2005) sıvının basınç farkından dolayı buharlaştığı sabit kuruma periyodunun, Şekil 8.3'de ikinci bölge olduğunu varsayımlardır. Üçüncü evrede çok az miktarda su kaldığı için malzemenin sıcaklığı hızlı bir şekilde artabilmekte ve dolayısıyla yanma meydana gelebilmektedir. Ürünün son sıcaklığının hiçbir zaman hava sıcaklığının üzerine çıkmadığı sıcak hava ile kurutmanın aksine, ürünün son sıcaklığını kontrol etmek mikrodalga kurutmada daha zordur (Zhang ve ark., 2006).

#### 8.5.2. Mikrodalga kurutmanın avantajları ve kullanımını kısıtlayabilen faktörler

**Kısıtlayıcı faktörler:** Mikrodalga enerjisinin kurutmada tek başına kullanımını birçok faktör kısıtlamaktadır. Mikrodalga enerjisi gıdanın nemli kısımlarını kolay bir şekilde ısıtmaya başlamasına rağmen, bazı durumlarda mikrodalga fırın içerisindeki enerjinin tekdüze olmamasından dolayı homojen olmayan ısınma profilleri elde edilebilmektedir. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için mikrodalga fırınlara dalga kılavuzları ve/veya döner karıştırıcılar eklenebilmektedir. Ayrıca kurutmanın son aşamalarında, ürün az miktarda nem içerdiğinden sıcaklığı çok hızlı bir şekilde artabilmektedir. Mikrodalga frekansının endüstriyel uygulamada 915 MHz olarak seçilmesi penetrasyon derinliği açısından 2450 MHz'e göre avantaj sağlayabilmektedir. Buna rağmen, 10-300 MHz band seviyesinde yer alan radyo frekansı teknolojisi ile kıyaslandığı zaman mikrodalga nüfuz derinliği büyük boyutlardaki ürünler için küçük kalmaktadır.

Mikrodalga enerjisinin kurutmada tek başına kullanımından kaynaklanabilecek kısıtlamaların üstesinden gelmek için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir:

1. Mikrodalga kurutmayı diğer kurutma yöntemleri ile birleştirmek,
2. Kurutma işleminin sonlarına doğru suyun uzaklaştırılması difüzyon kontrollü olduğundan, mikrodalga enerjisi bu fazlarda darbeli ("pulsed") olarak kullanmak.

Ayrıca mikrodalga enerjisinin nem olan bölgeleri seçici olarak ısıtması, geometriye bağlı olarak enerjinin iç kısımlarda yoğunlaşabilmesi, malzeme içinde mikrodalga enerjinin ısı enerjisine hızlı bir şekilde dönüşmesi, vakum ile beraber uygulandığında düşük ürün sıcaklığında kurutmaya

olanak sağlayabilmesi ve azalan kuruma periyodunda daha etkin olması nedeniyle diğer kurutma yöntemlerindeki bazı kısıtlamaları da ortadan kaldırmaktadır (Zhang ve ark., 2006).

### 8.5.3. Mikrodalga enerjisinin birleşik kullanımı

Mikrodalga enerjisinin farklı kurutma yöntemleri ile birleşik kullanılması, ürün içerisindeki sıcaklık dağılımının homojenliğini arttırmakta, nem transferi üzerinde daha fazla kontrol sağlamakta ve aynı zamanda da kurutma hızını arttırmaktadır (Datta ve ark., 2005). Mikrodalga enerjisinin özellikle infrared (kızılötesi), sıcak hava ve nadiren de vakum ile olmak üzere literatürde üç farklı birleşik kullanımı görülmektedir. Schiffmann (2001) mikrodalga enerjisini kurutmada üç farklı şekilde kullanmayı önermiştir:

1. *Gıdanın ısı iletkenliğinin azaldığı ve kuruma süresinin uzun olduğu azalan kuruma periyodunda mikrodalga enerjisinin kullanımı:* Nem oranı azaldıkça mikrodalga enerjisinin nüfuz derinliği artacağı için (Datta ve Ni, 2002) kurutmanın son aşamalarında mikrodalga kullanımı, mevcut nem ile mikrodalga etkileşimini kolaylaştıracaktır. Maskan (2000) yaptığı çalışmada, muzun ilk olarak 1.25 (kg H<sub>2</sub>O/kg katı madde) nem oranına kadar hava ile kurutmuş daha sonra arzulan nem oranına 350 W mikrodalga güç uygulayarak indirmiştir. Araştırmacı kuruma süresinin %64.3 oranında azaldığını rapor etmiştir.

2. *Mikrodalga enerjisinin tüm kurutma boyunca düşük enerji seviyelerinde kullanılması:* Ren ve Chen (1998) Amerikan Ginseng köklerini mikrodalga yardımcı sıcak hava ile kurutmuş ve köklerin boyutlarına bağlı olarak küçük köklerde %28.7 ve daha büyük köklerde ise %55.2 oranında kuruma süresinin, sıcak havayla kıyaslandığında, azaldığını bildirmişlerdir.

3. *Ürünü kurutma sıcaklığına ısıtmak için mikrodalga enerjisini kurutmadan önce kullanılması:* Wang ve Sastry (2000) silindirik havuç, patates ve tatlı patates örneklerini 50° ve 80°C'ye mikrodalga kullanarak ısıtmış ve daha sonra sıcak hava ile kuruma süresinin azaldığını rapor etmişlerdir.

Schiffman'ın (2001) ikinci önerisine ek olarak, mikrodalga enerji kurutma boyunca kesikli olarak da kullanılabilir. Chua ve Chou (2005) patates ve havuç örneklerinin mikrodalga ve kızılötesi enerjisi kullanarak kurutulmuşlardır. Mikrodalga enerjisini "enerjinin verildiği toplam süre / tüm kurutma süresi" olmak üzere 1/9 ve 1/5 oranına kesikli olarak uygulamışlardır. Sıcak hava ile kurutma ile kıyaslandığında patates örnekleri için %42 ve havuç örnekleri için ise %31 oranında kuruma süresinin kısaldığı araştırmacılar tarafından gözlenmiştir. Ayrıca üründe yanma olmadığı ve renk değişiminin ise azaldığı rapor edilmiştir.

Chua ve Chou'nun (2005) aksine Wang ve Xi (2005) havuçlar için iki basamaklı mikrodalga yardımcı konvektif kurutma sistemi önermişlerdir. Havuçların mikrodalga yardımcı konvektif kurutulmasında iki azalan kuruma periyodu tespit edilmiştir. Araştırmacılar ilk basamakta uygulanan güç seviyesinin havuçların rehidrasyon oranını etkilediğini buna karşın ikinci basamakta uygulanan güç seviyesinin ise hem rehidrasyon oranını hem de havuçların  $\beta$ -karoten miktarını etkilediği tespit edilmiştir.

Infrared kurutma yüzeye büyük miktarda ısı akışı sağlar ve biyolojik malzemelerin kurutulmasında tek başına kullanılabilir (Datta ve ark., 2005). Wang ve Sheng (2006) yaptıkları çalışmada şeftalilerin aynı güç seviyelerinde kuruma hızının mikrodalga ile kızılötesinden daha fazla olduğu gözlenmiştir. Aynı ortam içinde mikrodalga ile kızılötesine oranla çok daha fazladır. Mikrodalga ve kızılötesinin beraber kullanımı ile yüzeyde meydana gelen ıslaklık önlenmekte ve arzulan esmerleşme iyileştirilebilmektedir (Datta ve ark., 2005). Sumnu ve ark. (2005) havuç dilimlerini halojen lamba ve mikrodalga yardımcı kurutulmasının sadece mikrodalga kullanılarak kurutulmasından daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir. Fakat yapılan karşılaştırmada halojen lamba ve mikrodalga kurutmada uygulanan toplam güç miktarı 706

W iken (toplam gücün 280 W'ı mikrodalga), sadece mikrodalga kullanılarak gerçekleştirilen kurutmada uygulanan güç miktarı 560 W'dır.

Geleneksel kurutma yöntemlerinde ısı ve kütle transferi zıt yönlerde iken mikrodalga yardımcı vakum kurutmada ikisi de aynı yönde olduğundan kütle transferinde büyük iyileştirmeler yapılabilmektedir (Hu ve ark., 2005). Kurutulacak malzeme direk olarak mikrodalga fırın içine konulabileceği gibi (Hu ve ark., 2005), cam gibi mikrodalgayı geçirebilen ve bir vakum pompasına bağlanabilen bir düzenek içine de konulabilmektedir (Giri ve Prasad, 2007). Basıncın azaltılmasından dolayı suyun doyma sıcaklığı da azalacağından ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için oldukça uygun bir yöntemdir. Ayrıca kurutma sırasında ortamda hava olmayacağı için oksidatif reaksiyonlar engellenerek ürünün renk ve besin içeriği de muhafaza edilebilmektedir. Giri ve Prasad (2007) sistem içindeki vakum miktarının artırılmasının ürünün kuruma hızını etkilemediğini fakat ürünün rehidrasyon özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Benzer bulgular havuç dilimleri için Cui ve ark. (2004) tarafından da rapor edilmiştir.



## 9. BİYOLOJİK MALZEMELERİN INFRARED (KIZILÖTESİ) IŞINIMI İLE İŞLENMESİ

### 9. BİYOLOJİK MALZEMELERİN INFRARED (KIZILÖTESİ) IŞINIMI İLE İŞLENMESİ

Gıda endüstrisinde iletim ve taşınım ısı transfer mekanizmaları ısı işlemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Isıl işlemlerde güneş enerjisi ve kısa dalga boyuna sahip kızılötesi enerjisi ile de ışınım ısı transferi mekanizmasından faydalanılmaktadır. Ticari uzun dalgaboylu kızılötesi ısıtıcılardaki gelişmelere paralel olarak son zamanlarda ilgi uzun dalga boylu kızılötesi (FIR "Far Infrared Radiation") ışınımında yoğunlaşmıştır.

Uzun dalga boylu kızılötesi ışınımı, FIR ısıtıcılardan gıdaya elektromanyetik dalga olarak gönderilmektedir. Gıda ve ısıtıcı arasındaki ısı transferi her iki malzemenin sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak gerçekleşmektedir. Mikrodalga enerjisine benzer olarak FIR da gıda maddeleri tarafından emilmekte ve daha sonra ısıya çevrilmektedir. FIR'la ısıtma geleneksel yöntemlerle ısıtmaya göre, maliyet ve son ürün kalitesi üzerinde etkili olmaktadır. İnfrared ısıtmanın gıda işleme açısından avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Gıdaya etkin olarak ısının transfer edilebilmesi ile işlem süresi ve maliyetler azalmaktadır.
2. Ekipman içerisindeki hava ısıtılmadığından ortam havası normal sıcaklıklarda tutulabilmektedir.
3. Daha iyi kontrol edilebilir, güvenilir ve küçük boyutlardaki ekipmanların tasarlanması mümkün olabilmektedir (Sakai ve Mao, 2006).

#### 9.1. Kızılötesi Isıtmanın Temel Prensipleri

Kızılötesi enerji, elektromanyetik enerji formundadır ve dalga olarak iletilir. Elektromanyetik spektrumda kızılötesi ışınımı görünür ışınım (0.38 ile 0.78  $\mu\text{m}$ ) ve mikrodalga (1 ile 1000 mm) arasında yer almaktadır. Elektromanyetik spektrumda kızılötesi ışınım bölgesi, dalga boyuna göre kendi içinde de üçe ayrılmaktadır: kısa dalga boylu kızılötesi (NIR) (0.78 ile 1.4  $\mu\text{m}$ ), orta dalga boylu infrared (MIR) (1.4 ile 2.5-3.0  $\mu\text{m}$ ) ve uzun dalga boylu kızılötesi (FIR) (2.5 ile 30  $\mu\text{m}$ ) (Sakai ve Mao, 2006). Orta ve kısa dalga boylu kızılötesi ışınımının gıdalarla etkileşimi sonucu moleküllerin titreşim enerji seviyelerinde değişim meydana gelirken, uzun dalga boylu kızılötesi ışınımı ile etkileşimde moleküllerin dönme enerjisinde değişim meydana gelir. Belirtilen üç farklı kızılötesi ışınım bölgesinden gıda endüstrisinde farklı şekillerde yararlanılmaktadır:

1. Isıl işlemler,
2. Gıdaların kimyasal kompozisyonunun spektroskopik analizleri,
3. Temassız olarak gıdaların sıcaklığının ölçümü (Datta ve Almeida, 2005).

Rosenthal (1992) gıdalar için uygun olan emilim dalgaboylarını Tablo 9.1'de verildiği gibi sınıflandırmıştır:

Kimyasal Grubu	Emilim Dalgaboyu ( $\mu\text{m}$ )	Uygun Gıda Bileşiği
Hidroksil Grup (O-H)	2.7 ile 3.3 arası	Su, karbonhidratlar
Alifatik karbon-hidrojen bağı	3.25 ile 3.7 arası	Yağlar, karbonhidratlar ve proteinler
Karbonil Grubu (C=O) (ester)	5.71 ile 5.76 arası	Yağlar
Karbonil Grubu (C=O) (amid)	5.92	Proteinler
Hidrojen-Hidrojen Grubu (-NH-)	2.83 ile 3.33 arası	Proteinler
Karbon-karbon çift bağı (C=C)	4.44 ile 4.76 arası	Doymamış yağlar

Tablo 9.1. Gıdalar için Kızılötesi Emilim Bandları

## 9.2. Kızılötesi Isıtıcılar

Kızılötesi ısıtıcıların sıcaklığı arttıkça gıdaya aktarılan ısı miktarı artmakta fakat maksimum ışınım enerjisinin elde edildiği dalga boyu ise kısalmaktadır. Genellikle seramikten imal edilen FIR ısıtıcıların sıcaklığı 600 ile 950 K, dalga boyu ise 3 ile 5  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Buna karşın NIR ısıtıcıların sıcaklığı 2400 ile 2500 K arasında değişirken, dalga boyları ise 1.1 ile 1.3  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Maksimum enerjinin elde edildiği dalga boyu ile sıcaklık arasındaki ilişki Wien Deplasman Kanunu ile aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (9.1)$$

Eşitlikte  $\lambda_{max}$  ( $\mu\text{m}$ ) maksimum enerjinin elde edildiği dalga boyunu tanımlarken, T (K) ise mutlak sıcaklığı göstermektedir. Eşitlikten de görüldüğü gibi sıcaklık ve dalga boyu birbirleri ile ters orantılıdır.

Mutlak sıcaklığı sıfırdan farklı olan her cisim ışınım ile enerji yaymaktadır. Kızılötesi ısıtıcının veya gıda maddesinin tüm dalga boylarında yaymış olduğu toplam enerji Stefan-Boltzman Kanunu ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (9.2)$$

Eşitlik (9.2)'de  $\varepsilon$  yayılım katsayısı, gıda maddesi veya kızılötesi ısıtıcının fiziksel özelliklerine bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişen bir değer alırken,  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabiti  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ) sabit değerini almaktadır.

Mikrodalga enerji gibi kızılötesi enerjisinin de gıda maddesine nüfuzu, gıda maddesinin sıcaklık profili üzerinde etkili olmaktadır. Gıda maddesi üzerine gelen kızılötesi ışınlarının bir kısmı yansıtılıp bir kısmı geçirilirken, diğer bir kısmı da gıda tarafından emilmektedir. Gıda maddesi ve kızılötesi enerjisinin özelliklerine göre değişebilen azalma faktörü, kızılötesi enerjisinin gıda maddesi içindeki nüfuz derinliği üzerinde etkilidir. Gıda tarafından emilen enerji aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 0} \cdot \exp(-\alpha_{\lambda} x) \quad (9.3)$$

Eşitlik (9.3)'de  $I_{\lambda}$ ,  $\lambda$  dalga boyundaki enerji akısını,  $\alpha_{\lambda}$  ise spektral azalma faktörünü göstermektedir. Örneğin su için azalma faktörü kızılötesi ışınının dalga boyu ile önemli miktarda değişim göstermektedir. Dalga boyu 1, 3 ve 5  $\mu\text{m}$ 'ye karşılık gelen spektral azalma faktörleri sırasıyla 0.355, 1800 ve 2138  $\text{cm}^{-1}$  değerlerini almaktadır. . Kızılötesi enerjisinin azalma faktörü veya başka bir deyişle nüfuz derinliği aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Datta ve Almeida, 2005):

1. Gıdanın kimyasal bileşimi,

2. Kızılötesi enerjisi ile ısıtılacak ürünün fizikokimyasal durumu; gıdanın katı, sıvı veya toz halinde olması; donmuş veya çözünmüş halde olması; dispersiyon, emülsiyon veya çözelti halinde bulunması,
3. Ürünün su içeriği, yoğunluğu veya gözenekliliği gibi fiziksel özellikleri.

Tablo 9.2.'de farklı ürünlerin farklı  $\lambda_{max}$  ( $\mu\text{m}$ ) dalga boylarındaki nüfuz derinliği verilmiştir:

Ürün	Nüfuz Derinliği (mm)	$\lambda_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )
Elma	1.8	1.16
	2.6	1.65
	3.2	2.35
Çavdar ekmeği	3.0	0.88
Buğday ekmeği	4.8-5.2	1
Kuru ekmek	1.7	1
	5.2	0.88
Kuru patates	6.5-7.8	0.88
Ham patates	2.6	1
Salça (%85 nemli)	0.4	1

**Tablo 9.2.** Bazı Ürünlerin Nüfuz Derinliği (Ginzberg,1969)

Mikrodalga ile karşılaştırıldığında, kızılötesi enerjisinin penetrasyon derinliği çok küçük mertebelerde kalmaktadır. Dolayısıyla birçok durumda kızılötesi enerjisi yüzey ısıtmasında kullanılmaktadır.

### 9.3. Kızılötesi Kurutma

Kızılötesi ışınımı sebze ve deniz ürünlerinin kurutulmasında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Sebze kurutma esnasında kuruma etkinliğinin yanı sıra rengin ve besin içeriğinin korunmasına dikkat edilmedilir. Kuruma esnasında ısı ve oksidasyondan kaynaklanan klorofil ve karotenoid bozulması meydana gelebilmektedir.

Hebbar ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada kızılötesi kurutma sistemi geliştirilmiştir. Gıda maddeleri 2.5-3.0  $\mu\text{m}$  dalga boyunda maksimum absorpsiyon gerçekleştirebildiğinden, yazarlar çalışmalarında 2.4-3.0  $\mu\text{m}$  dalga boyunda ışınım yapabilen ve yaklaşık 5000 saat ömre sahip olan ve %80 civarında verime sahip olan quartz malzemesinden imal edilmiş kızılötesi ısıtıcı kullanmışlardır. Infrared ısıtma ve hava ile kurutmayı birleştirebilmek amacıyla kurutma sistemine dakikada 156 m<sup>3</sup> hava üfleyebilen santrifüj üfleyici ve ısıtıcı da eklemişlerdir. Yalnız kızılötesi ve sıcak hava ve ayrıca kızılötesi ve sıcak havanın beraber kullanıldığı kurutma yöntemlerinin enerji tüketimi aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Kurutma Operasyonu	Patates	Havuç
Sıcak Hava	17.17	16.15
Kızılötesi	7.60	7.15
Kızılötesi ve Sıcak Hava	6.43	6.04

**Tablo 9.3.** Patates ve Havuçun Farklı Yöntemler ile Kurutulması Sırasında 1 kg Suyun Buharlaştırılması için Harcanması Gereken Enerji Miktarı (MJ) (Hebbar ve ark., 2004).

Tablo 9.3'den de görüldüğü gibi kızılötesi enerjisinin sıcak hava ile birleştirilmesi sadece sıcak hava kullanımına göre %63 oranında enerji kazandırmıştır. Ayrıca son ürünün renk ve yüzey sertleşmesi açısından da kalitesi sıcak havaya göre daha iyi olduğu araştırmacılar tarafından gözlenmiştir.

Timoumi ve ark. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada ise ortalama %86 neme sahip olan elmalar kızılötesi nem analizleyicisinde (Sartorius MA 40) 40°, 60° ve 70°C sıcaklıkta kurutulmuşlardır. Askorbik asit kaybı miktarı 350 dakika sonunda 40°C'de 3-log, 60°C'de 3.5-log ve 70°C'de ise 5-log civarında gerçekleşmiştir.

Shih ve ark. (2008) tarafından yürütülen bir çalışmada ise taze çilekler 4.1 mm kalınlıkta dilimlenmiş ve kızılötesi ile 3000 ve 5000 (W/m<sup>2</sup>) sabit ısı akısı altında ön kurutmaya tabi tutulmuşlardır. Araştırmacılar 3000 (W/m<sup>2</sup>) ile yapılan ön kurutmada çileğin 80°C'ye kadar ısınmasının 19.5 dakika sürdüğünü buna karşın 5000 (W/m<sup>2</sup>) ile 2.5 dakika sürdüğünü gözlemişlerdir. Buradan da açıkça görüleceği gibi son ürünün kalite kriterleri de göz önüne alınarak optimize edilmiş işlem parametrelerinin seçilmesi zaman ve enerji kazanımı açısından kritik rol oynamaktadır.

Sonuç olarak kızılötesi ışınımı yüzey ısıtması için oldukça etkili bir yöntemdir. Gıda işleme sanayiinde verimli bir şekilde kullanılabilmesi için, kızılötesi ışınımının mikrodalga ve diğer genel iletim veya taşınım ısı aktarım yöntemleri ile birleştirilmesi gerekmektedir. Son 30 yıldır kızılötesi ışınımı üzerine birçok araştırma yapılmasına karşın, aşağıdaki yöntemler için araştırmaya halen ihtiyaç duyulmaktadır:

1. *Seçici ısıtma*: Kızılötesi ışınımı uygun optik bant filtreleri kullanılarak belli bir dalga boyundaki ışınımın seçici olarak ürün üzerine gönderilmesi sağlanabilmektedir. Ürünün emilim bandı ile kızılötesi ışınımının emisyon bandı aynı olduğu zaman üründen maksimum optik cevap alınabilmektedir. Infrared ışınımı üzerinde yapılan bu tip manipülasyonlar çok kullanışlı olabilmektedir.

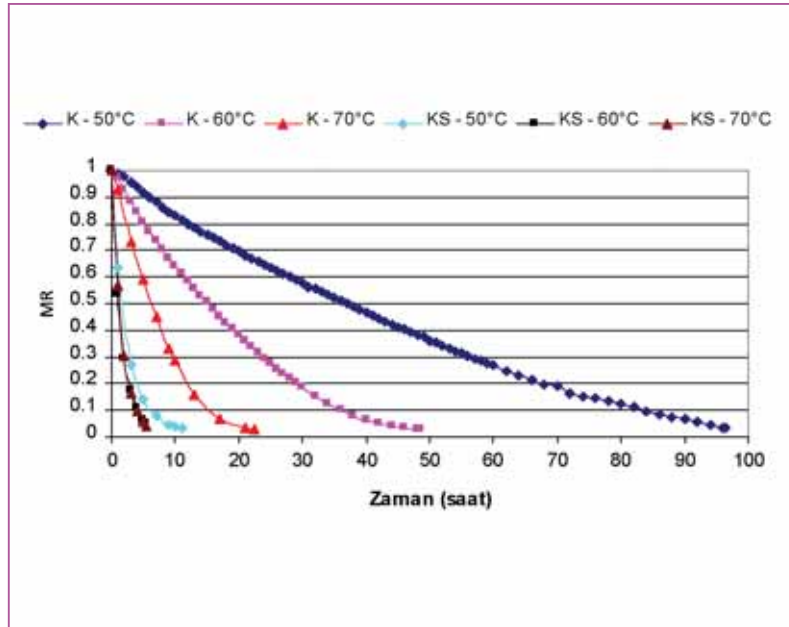
2. *Katalitik Kızılötesi Isıcıların Kullanımı (CIR)*: Katalist üzerinden geçirilen propan veya doğal gazın katalitik reaksiyonu sonucunda kızılötesi ışınımı elde edilmektedir. Reaksiyon, gazların yanma sıcaklığı altında meydana geldiği için herhangi bir alev üretilmemektedir. CIR ile üretilen kızılötesi ışınımının dalga boyu orta dalga boyu ile uzun dalga boyu arasında değişmektedir ve sıvı suyun 3 farklı absorpsiyon dalga boyu ile eşleştiğinden kurutma sırasında suyun hızlı bir şekilde uzaklaşmasına olanak vermektedir. Özellikle doğal gazdan elektrik enerjisi üreten bölgelerde, CIR'lar doğal gazı kızılötesi enerjisine direkt dönüştürdüğünden, elektriği kızılötesi enerjisine dönüştüren sistemlerden daha verimli çalışmaktadırlar.

3. *Ürünlerin üç boyutlu modellenmesi*: Ürünlerin kızılötesi ile ısıtılması sırasında modellenmesi literatürde çoğunlukla tek veya iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Üç boyutlu gerçek modelleme daha ileri seviyede bilgi elde edilmesini sağlayabilmektedir (Krishnamurthy ve ark., 2008).

## 10. ÖRNEK ÇALIŞMA

### 10. ÖRNEK ÇALIŞMA

İTÜ Gıda Mühendisliği Bölümü'nde 2008 yılında, "Farklı Önışlemlerin Thompson Çekirdeksiz Üzümlerinin Mikrodalga Yardımlı Konvektif ve Yalnız Konvektif Kurutulması Sırasında Kurutma ve Renk Kinetiği Üzerine Olan Etkilerinin İncelenmesi" adıyla tamamlanan doktora çalışmasında, üzümlerin kuruma hızının artırılarak kuruma zamanının kısaltılması ve son ürünün renk ve görünüm kalitesinin geliştirilmesi amacıyla farklı önışleme yöntemleri denenmiştir. Uygulamada üzümler, parlak sarı renkte son ürün elde edebilmek amacıyla, kurutulmadan önce 900 ppm konsantrasyonundaki sülfite işleme tabi tutulmaktadırlar (Tulasidas ve ark., 1995). Kükürtlenmiş üzümler daha sonra kabuktaki mumsu yapının uzaklaştırılarak su geçirgenliğinin artırılması amacıyla kimyasal çözeltilere daldırılmaktadırlar. Kimyasal çözelti olarak etil oleat ve potasyum karbonat karışımı kullanılabilceği gibi alkali çözeltiler ve hatta McLellan ve ark. (1995) tarafından rapor edildiği gibi bal çözeltileri de kullanılabilir. Üzümler daha sonra direk güneşte ya da sıcak hava ile kurutulmaktadırlar. Üzüm ve erik kurutulması esnasında hava sıcaklığının 74°C'yi geçmemesi önerilmektedir (Petrucci ve Clary, 2002). Şekil 10.1'de kabuğu soyulmuş ve hiç önışlem görmemiş (kontrol) üzümlerin güvenli sıcaklık aralığındaki kurutma kinetikleri gösterilmiştir.



Şekil 10.1. Farklı Hava Sıcaklıklarında Kontrol (K) ve Kabuğu Soyulmuş (KS) Üzümlerin Kurutma Kinetikleri

Şekil 10.1'den de görüldüğü gibi 50°C hava sıcaklığında dahi kabuğu çıkarılmış üzümler, 70°C hava sıcaklığında önışlem görmeden kurutulmuş üzümlerden daha yüksek kuruma hızına sahiptirler. Hava sıcaklığındaki artışın kuruma hızını arttırdığı gözlenmiştir. Hava sıcaklığındaki 10°C'lik bir artış, kontrol üzümlerinin kuruma süresini yarıya indirirken, aynı etki kabuğu soyulmuş üzümlerde gözlenmemiştir. Kabuğu soyulmuş üzümlerin 50°, 60° ve 70°C hava sıcaklığındaki kuruma hızı, hiç önışlem görmemiş üzümlerden sırasıyla 8, 9 ve 4 kat daha hızlıdır.

Renk tüketicinin ürün beğenisini etkileyen en önemli faktörler arasındadır (Maskan, 2001). Rengin insanlar tarafından algılanmasında ortam ışığının çok önemli etkisi vardır. Dolayısıyla 1931 yılında CIE (Commission Internationale d'Eclairage) üç tip standart aydınlatıcıyı onaylamıştır: A tipi aydınlatıcılar enkandansen lambadan gelen ışığı, B tipi aydınlatıcılar direk güneş ışığını ve C tipi aydınlatıcılar ise gökyüzünden gelen ortalama gün ışığını temsil etmektedir.

CIE, 1966 yılında gün ışığını daha iyi temsil eden D tipi aydınlatıcıları önermiştir (Francis, 2005). Günümüzde genel olarak D65 tipi aydınlatıcılar kullanılmaktadır. Aydınlatıcılar gerçek fiziksel ışık kaynağı olmayıp, cihazlar tarafından algılanan renk verisinin matematiksel hesaplanmasında kullanılmaktadırlar (Hunterlab, 2000).

$L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  CIE tarafından kabul edilen uluslararası renk uzayıdır. Bu uzayda  $L^*$  lüminisans veya parlaklığı temsil etmekte ve 0 (siyah) ile 100 (beyaz) arasında değişen değerler alabilmektedir.  $a^*$  ve  $b^*$  bileşenleri ise negatif değerler için yeşil ve maviyi, pozitif değerler için ise kırmızı ve sarıyı temsil etmektedirler.  $L^*a^*b^*$  uzayında  $a^*$  ve  $b^*$  eksenleri kullanılarak matematiksel olarak hesaplanabilen Hue açısı ise  $0^\circ$  ile  $360^\circ$  arasında değişmekte olup,  $0^\circ$  kırmızı-mor,  $90^\circ$  sarı,  $180^\circ$  mavimsi-yeşil ve  $270^\circ$  ise mavi rengi temsil etmektedir. Literatürde CIE'nin önermiş olduğu  $L^*a^*b^*$  uzayı veya HunterLab tarafından önerilen Lab uzayı gıdaların rengini temsil etmek için kullanılmaktadır. Örneğin Nisha ve ark. (2004) yılında yaptıkları çalışmada HunterLab uzayını kullanarak ıspanağın renginde meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Benzer şekilde Pedreschi ve ark. (2005) yılında yaptıkları çalışmada haşlanmış ve haşlanmamış patates cipslerinin kızartma sırasındaki kararım reaksiyonlarını  $L^*a^*b^*$  uzayını kullanarak araştırmışlardır.

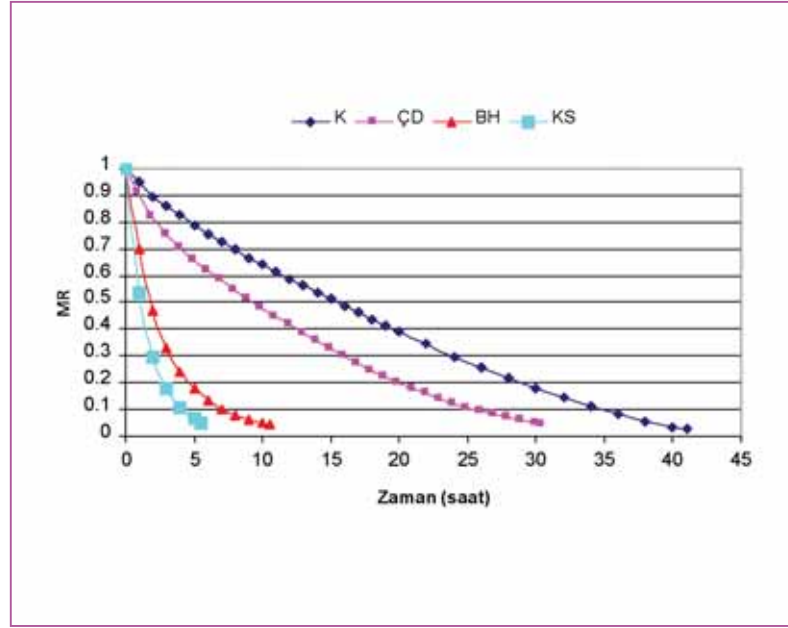
Yapılan bu örnek çalışmada ise kontrol ve kabuğu çıkarılmış üzümün kuruma sonrasındaki renk değerleri Tablo 10.1'de verilmiştir.

		$50^\circ C$	$60^\circ C$	$70^\circ C$
<b>Kontrol</b>	$L^*$	28.57	29.80	31.57
	$a^*$	5.03	9.16	9.67
	$b^*$	12.33	18.10	20.12
	Hue $^\circ$	67.78	63.16	64.341
<b>Kabuğu Çıkarılmış</b>	$L^*$	49.87	48.62	45.20
	$a^*$	0.01	-0.52	0.78
	$b^*$	31.52	31.00	27.14
	Hue $^\circ$	89.97	90.95	88.36

**Tablo 10.1.** Kontrol ve Kabuğu Soyulmuş Üzümlerin Farklı Sıcaklıklardaki  $L^*a^*b^*$  Değerleri ve Hue Açıları

Tablo 10.1'den görüldüğü üzere kabuğu soyulmuş üzümün Hue açıları yaklaşık  $90^\circ$  ve  $L^*$ -değerleri 48'dir ki bu da hafif açık sarı rengi temsil etmektedir. Buna karşın önışlem görmeyen üzümün Hue açıları yaklaşık  $64^\circ$  ve  $L^*$ -değerleri ise 28'dir ve bu da koyu portakalimsi rengi temsil etmekte fakat insanlar tarafından kahverengi olarak algılanmaktadır (Bartleson, 1976).  $60^\circ$  ve  $70^\circ C$  hava sıcaklığında kurutulan üzümün  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  değerleri birbirine yakın olmasına karşın,  $60^\circ C$  hava sıcaklığında kurutulan üzüm daha iyi renk ve yapı özelliklerine sahip oldukları gözlenmiştir.

Kimyasal çözeltilere daldırma veya buharla haşlama üzümün kabuğu üzerindeki mumsu yapıyı uzaklaştırıp kurumayı hızlandırmasına karşın, kabuk soyma işlemi ile kabuk üzümün tamamen uzaklaştırıldığı için, önışleme tabi tutulan üzümün kuruma hızları kontrol üzümünden yüksek fakat kabuğu soyulmuş üzümün düşük olmalıdır. Şekil 10.2'de kabuğu çıkarılan üzümün en yüksek kuruma hızına sahipken, önışlem görmeyen üzümün en düşük kuruma hızına sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 10.2.** Kontrol (K), çözeltiliye daldırılmış (ÇD) (40°C'de 3 dakika), Buharla Haşlanmış (BH) (90°C) ve Kabuğu Soyulmuş (KS) Üzümlerin 60°C Hava Sıcaklığındaki Kuruma Hızları

Şekil 10.2'den buharla haşlanmış üzümlerin kuruma hızının kabuğu çıkarılmış üzümlere yakın olduğu ve 40°C sıcaklığındaki çözeltiliye 3 dakika süreyle daldırılan üzümlerin kuruma hızının ise kontrolden hafifce yüksek olduğu görülmektedir.

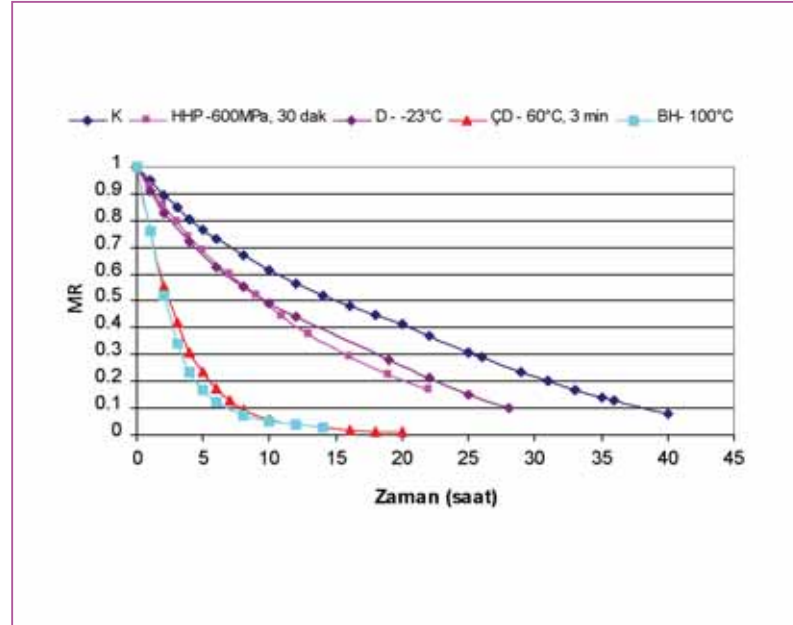
Kontrol, çözeltiliye daldırılmış (40°C'de 3 dakika), buharla haşlanmış (90°C) ve kabuğu soyulmuş üzümlerin 60°C hava sıcaklığında kurumaları sonucundaki renk değerleri Tablo 10.2'de verilmiştir.

	<i>Kontrol</i>	<i>Çözeltiliye Daldırılmış</i>	<i>Buharla Haşlanmış</i>	<i>Kabuğu Soyulmuş</i>
$L^*$	29.80	26.67	40.15	48.62
$a^*$	9.16	7.02	5.83	-0.52
$b^*$	18.10	15.51	24.47	31.00
$Hue^\circ$	63.16	65.64	76.60	90.95

**Tablo 10.2:** Farklı Metodlarla Önişlenmiş ve 60°C Hava Sıcaklığında Kurutulmuş Üzümlerin  $L^*a^*b^*$  Değerleri ve Hue Açılımları

Tablo 10.2 ve Şekil 10.2'den görüldüğü üzere önişleme yöntemleriyle kuruma hızı artırılan üzümlerin Hue açılarının arttığı ve  $a^*$ -değerlerinin azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla önişleme yönteminin üzüm kabuğu üzerindeki etkinliği arttıkça kararmanın azaldığı ve üzümün sarımsı renginin arttığı sonucuna varılabilmektedir.

Kimyasal çözeltiliye daldırma veya buharla haşlama gibi önişlemler üzüm kabuğu üzerindeki mumsu tabakayı çözdüğünden veya kabuk üzerinde çatlaklar oluşturduğundan "*Harici Etkili Önişleme Yöntemi*" olarak adlandırılabilir. Basınçla sıkıştırma, elektrik alan darbeleri veya dondurma gibi önişlemler ise üzüm hücrelerinde tersinir olmayan geçirgenliğe neden olduklarından "*Dahili Etkili Önişleme Yöntemi*" olarak adlandırılabilirler. Şekil 10.3'de harici ve dahili etkili önişleme yöntemlerinin kuruma hızı üzerindeki etkisi görülmektedir.

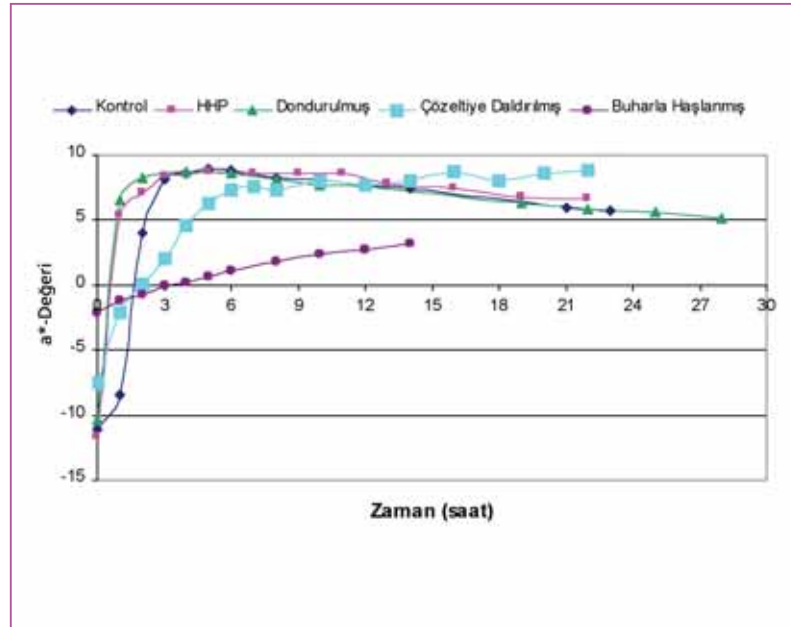


**Şekil 10.3.** Dahili ve Harici Önışleme Yöntemlerinin Üzümün Kuruma Hızı Üzerindeki Etkisi  
**K:** Kontrol, **HHP:** Yüksek Hidrostatik Basınç, **D:** Dondurulmuş, **ÇD:** Çözeltiye Daldırılmış,  
**BH:** Buharla Haşlanmış

Şekil 10.3'den hem harici hem de dahili etkiye sahip önışleme yöntemlerinin üzümün kuruma hızı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 10.3'den harici önışleme yöntemlerinin (çözeltiye daldırma, buharla haşlama) üzümün kuruma hızı üzerinde dahili önışleme yöntemlerinden (dondurma, yüksek hidrostatik basınç altında sıkıştırma-HHP) daha etkili olduğu görülebilmektedir.

Üzümlerin  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  değerleri uygulanan önışleme yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Üzümlerin ilk haldeki  $a^*$  değeri negatif olup yeşilimsiliği göstermekteyken, Şekil 10.4'den önışleme yöntemleri sonucunda kurutulan üzümün  $a^*$  değerlerinin negatiften pozitif (yeşil renkten kırmızı renge-kırmızı renk kararma belirtisidir) geçtiği görülmektedir.

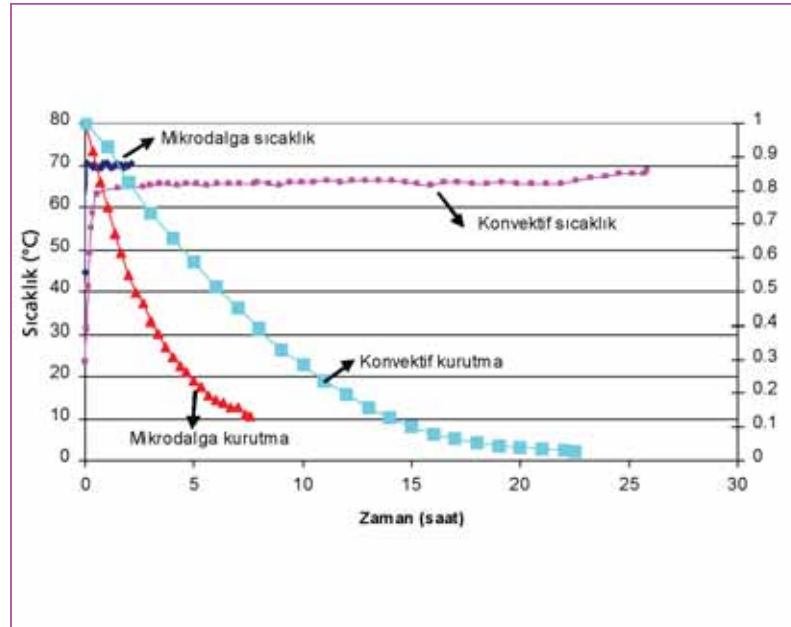




Şekil 10.4. Kontrol ve Önişlenmiş Üzümlerin Kuruma Esnasında a\*-Değerlerindeki Değişim

Şekil 10.4'den görüldüğü gibi basınçla sıkıştırılmış ve dondurulmuş üzümlerin a\* değerleri sıcak hava ile kurutmanın ilk saatinde negatiften pozitive geçerken, kontrol ve çözeltiye daldırılmış üzümler pozitif a\* değerine 2 saatlik kurutma sonucunda sahip olmuşlardır. En yavaş değişimin ise buharla haşlanmış üzümlerde olduğu görülmektedir ki bu üzümler kurutma işlemi sonucunda açık sarımsı renge sahip olmuşlardır. Basınç altında sıkıştırma ve dondurma gibi dahili önleme yöntemleri üzümde inaktif halde bulunan Polifenol Oksidaz enzimini aktive ederek kararmayı hızlandırmışlardır.

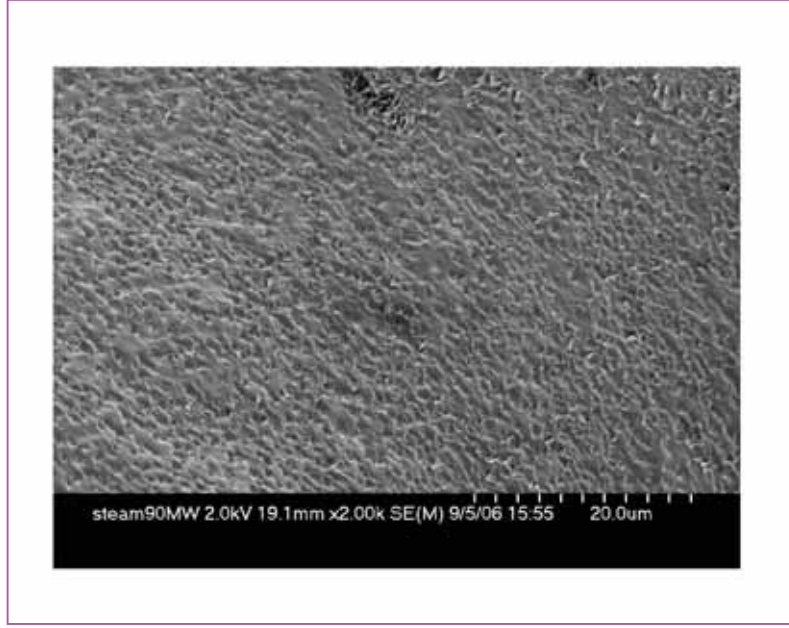
Kalın malzemelerin geleneksel olarak kurutma yönteminde, ısının malzemenin dıştaki tabakalarından iç tabakalarına difüzyonu yavaştır. Yüksek frekanslı elektromanyetik enerji, ısı difüzyona kıyasla çok daha yüksek penetrasyon hızına sahip olduğundan malzemedeki suyun buharlaşma oranını artırarak kurumayı hızlandırmaktadır (Metaxas ve Meredith, 1988). Şekil 10.5'de geleneksel ve mikrodalga yöntemlerinin kuruma hızı üzerindeki etkisi ve üzüm içindeki sıcaklık değişimine etkileri görülmektedir.



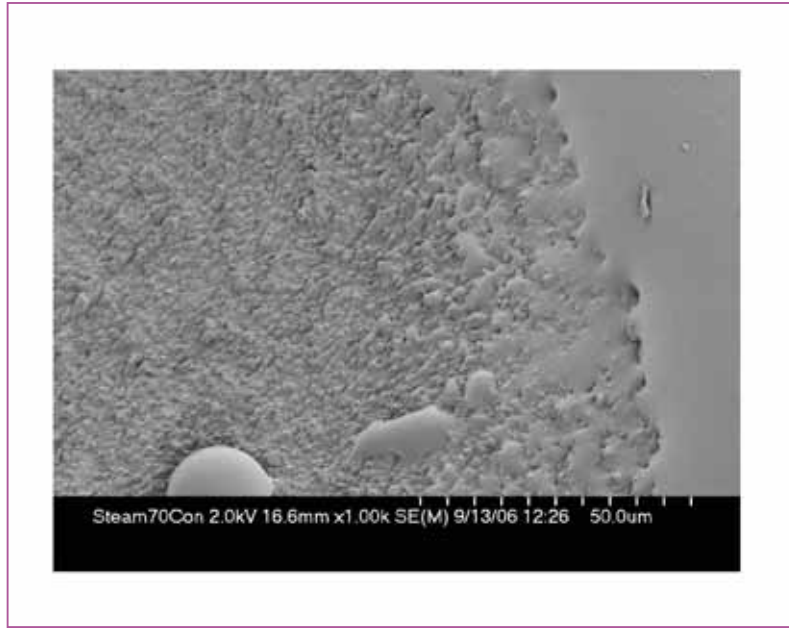
**Şekil 10.5.** Mikrodalga ve Konvektif Isıtma Profilleri (Birincil Eksen) ve Üzümlerin Kuruma Eğrileri (İkincil Eksen)

Şekil 10.5'den de görüldüğü gibi mikrodalga ile ısıtılan üzümler 70°C sıcaklığa 10 dakika sonra ulaşırken, sıcak hava ile ısıtılan üzümler 70°C sıcaklığına yakın sıcaklığa (65°C) 2 saat sonra ve 69°C'ye ise 25 saat sonra ulaşabilmişlerdir. Ayrıca Şekil 10.5'den mikrodalga yardımcı konvektif kurutulan üzümlerin sadece konvektif (sıcak hava) kurutulan üzümlerden yaklaşık 2 kat daha hızlı kurudukları görülebilmektedir. Her iki yöntemde de sıcaklık 70°C olarak hedeflendiği halde kuruma hızlarındaki farkın temel nedeni mikrodalga yardımcı konvektif kurutmada üzümlerin sıcaklığının hedeflenen 70°C sıcaklığa çok daha kısa sürede ulaşması ve ortalama sıcaklığının sadece konvektif kurutulan üzümlerinkine kıyasla 4.8°C daha yüksek olmasıdır. Ayrıca mikrodalga yardımcı konvektif kurutma esnasında üzümün yapısı daha az büzülmemekte ve kabuğu daha az sertleşmektedir.

Şekil 10.6'den mikrodalga yardımcı konvektif kurutulan üzümlerin yapılarında daha fazla gözenek olduğu görülmekteyken taşınım ile kurutulan üzümlerin daha az gözenekli yapıya sahip olduğu görülmektedir. Daha az gözenek suyun difüzyonuna engel teşkil ederek kurumayı yavaşlatmaktadır.



(a)



(b)

**Şekil 10.6.** Buharla Haşlanmış Üzümlerin SEM Resimleri: (a) Mikrodalga yardımcı konvektif kurutma, (b) Konvektif Kurutma.



### 11. SONUÇ

Kurutma işleminin temel amacı kaliteli bir son ürün elde ederken, enerjiyi de mümkün olduğunca etkin bir şekilde kullanmaktır. Tek bir kurutma yönteminin tüm ürünler için hem ekonomik hem de kalite özellikleri açısından yeterli olması mümkün değildir. Bazı durumlarda ise kurutma işleminden önce çözeltiye daldırma veya buharla haşlama benzeri ön işlemler hem son ürün kalitesini arttırmakta hem de ürünün kuruma süresini kısaltabileceğinden işlem maliyetini düşürmektedir.

Ürünün hammadde kalitesi ve işlendikten sonra piyasa değerine uygun olarak seçilen kurutma yöntemi, firmaların rekabet ortamının yüksek olduğu pazarda tutunabilmesi ve varlıklarını sürdürebilmeleri için gereklidir. Uygun kurutma teknolojisinin sanayide seçimi sırasında teknolojinin ilk yatırım maliyetinin yanı sıra işletme maliyetlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak kurutma teknolojisinin yanı sıra gerekli durumlarda doğru seçilmiş ön işleme yöntemlerinin de son ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. İyi kalitede son ürün elde edebilmek ve enerjiyi mümkün olduğu kadar etkin bir şekilde kullanabilmek için hammadde ve son ürünün piyasa değerine uygun olarak seçilmiş olan ön işleme ve kurutma yönteminin, parametreleri de dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Bu aşamadaki temel değerlendirmeler için sözkonusu çalışmanın faydalı olacağı umulmaktadır.



### KAYNAKLAR

Agrawal, K.K. ve Rao, H.V. (1974). A computer model of psychrometric properties of air. *ASAE Transactions*, 17 (1), 67-69.

Anon., (2009a). URL: [www.niro.com](http://www.niro.com)

Anon., (2009b). URL: [www.spraydrys.com](http://www.spraydrys.com)

Anon., (2009c). URL: [www.foodsci.uoguelph.ca](http://www.foodsci.uoguelph.ca)

Anon., (2009d). URL: [www.foodproductdesign.com](http://www.foodproductdesign.com)

ASHRAE (1981a). *Fundamentals Handbook, Psychrometrics*, Chapter 5, 1-10.

ASHRAE (1981b). *Fundamentals Handbook, Psychrometric tables*, Chapter 6, 1-16.

Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W. ve Belghith, A., (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes, *Journal of Food Engineering*, 55, 323-330.

Babalıs, S.J., Papanicolau, E., Kyriakis, N. ve Belessiotis, V.G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), *Journal of Food Engineering*, 75(2), 205-214.

Barbosa-Canovas, G.V. ve Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of Foods*, Eds. Barbosa-Canovas, G.V, Chapman & Hall, NY.

Bartleson, C.J., (1976). *Brown. Color Research and Application*, 1(4), 181-191.

Boldor, D., Sanders, T.H., Swartzel, K.R. ve Farkas, B.E. (2005). A model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying, *Journal of Food Process Engineering*, 28, 68-87.

Brennan, J. (1992) *Developments in drying*, in *Food Technology International Europe*. Eds. Turner, A. pp. 77-80, Sterling Publications International, London.

Busch, J.M. (1999). Enzymatic browning in potatoes: a simple assay for polyphenol oxidase catalyzed reaction, *Biochemical Education*, 27, 171-173.

Chua, K.J. ve Chou, S.K. (2005). A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts, *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 23-39.

Cohen, J.S. ve Yang, T.C.S. (1995). Progress in food dehydration, *Trends in Food Science and Technology*, 6, 20-25.

Cui, Z.W., Xu, S.Y. ve Sun, D.W. (2004). Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices, *Journal of Food Engineering*, 65, 157-164.

Ehlerman, D.A.E. (2002). Microwave processing, in *The Nutrition Handbook for Food Processors*, pp. 396-407, Eds. Henry, C.J.K., Chapman, C., CRC Press LLC.

Esper, A., Mühlbauer, W. (1998). Solar drying- an effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 15, 95-100.

Datta, A.K. ve Almeida, M. (2005). Properties Relevant to Infrared Heating of Foods, in *Engineering Properties of Foods*, pp. 209-238 Eds. Rao, M. A. Rizvi, S. S. H., Datta, A.K., Taylor & Francis Group, LLC., Florida

Datta, A.K., Geedipalli, S.S.R. ve Almeida, M.F. (2005). Microwave Combination Heating, *Food Technology*, 59, 36-40.

- Datta, A.K. ve George, J.P. (2002). Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices. *Journal of Food Engineering*, 52(1), 89-93.
- Datta, A.K., ve Ni, H. (2002). Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture, *Journal of Food Engineering*, 51, 355-364.
- Devres, Y.O. (1989). En küçük kareler yöntemi ile eğri yaklaştırılması (regresyon analizi) VAX paket bilgisayar programı, TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Merkezi, Soğuk Tekniği Araştırma Bölümü Yayınları No.121, 40s.
- Devres, Y.O. (1994). Psychrometric properties of humid air : calculation procedures, *Applied Energy*, 48 (1) 1-18.
- Dibben, D. (2001). Electromagnetics: Fundamental Aspects and Numerical Modelling, in *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, pp.1-28, Eds. Datta, A.K., Anantheswaran, R.C., Marcel Dekker Inc., New York.
- Doymaz, I. ve Pala, M. (2002). The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes, *Journal of Food Engineering*, 52, 413-417.
- Doymaz, I. (2004). Drying kinetic of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61, 341-346.
- Doymaz, I. (2006). Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *Journal of Food Engineering*, 76, 212-217.
- Ekechukwu, O.V. ve Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*, 40, 615-655.
- Ertekin, C. ve Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359.
- Evranuz, Ö. (1998). Gıda Mühendisliği Tasarımı Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü.
- Fellows, P. (2000). Dehydration, in *Food Processing Technology: Principles and Practice*, Second Edition, Midway Technology Limited, Cambridge, United Kingdom.
- Fortes, M. ve Okos, M.R. (1980). Drying Theories: Their Bases and Limitations as Applied to Foods and Grains, in *Advances in Drying Vol.1*, pp. 119-154, Eds. Mujumdar, A.S., McGraw-Hill, NY.
- Francis, F.J., 2005. Colorimetric properties of foods, in *Engineering Properties of Foods*, pp. 495-524, Eds. Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Taylor and Francis Group, Florida.
- Franzen, K.A. (1988). Nonenzymatic Browning of Skim Milk During Dehydration. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Geankoplis, C.J. (1993). *Transport Processes and Unit Operations*, 3rd Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ginzberg, A.S. (1969). *Application of Infrared Radiation in Food Processing*. Leonard Hill Books, London, UK.
- Giri, S.K. ve Prasad, S., (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78, 512-521.
- Glenn, G.M., Chiou, B.S., Imam, S.H., Wood, D.F. ve Orts, W.J. (2005). Role of cuticles in produce quality and preservation, in *Produce degradation: pathways and prevention*, pp. 19-53, Eds.



- Lamikanra, O., Imam, S.H., Ukuku, D.O., CRC Press. LLC.
- Gomez-Lopez, V.M. (2002). Some biochemical properties of polyphenol oxidase from two varieties of avocado, *Food Chemistry*, 77, 163-169.
- Grabowski, S. ve Marcotte, M. (2003). Pretreatment efficiency in osmotic dehydration of cranberries, in *Transport Phenomena in Food Processing*, pp.83-95, Eds. Weltri-Chanes, J., Velez-Ruiz, J.F., Barbosa-Canovas, G.V., CRC Press LLC, Florida.
- Grncarevic, M., (1963). Effect of various dipping treatments on the drying rate of grapes for raisins, *Am. J. Enol. Viticult*, 14, 230.
- Henderson, S. M. ve Pabis, S., (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient, *Journal of Agriculture Research Engineering*, 6, 169-174.
- Hebbar, H.U., Vishwanathan, K.H. ve Ramesh, M.N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65, 557-563.
- Hu, Q., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Xiao, G. ve Sun, J. (2006). Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination, *Journal of Food Engineering*, 4, 977-982.
- HunterLab, 2000. What is color and how is measured?, HunterLab Applications Note, 12(5), [http://www.hunterlab.com/appnotes/an05\\_00.pdf](http://www.hunterlab.com/appnotes/an05_00.pdf)
- Kalra, S.K. ve Bhardwaj, K.C. (1981). Use of simple solar dehydrator for drying fruit and vegetable products. *J. Food Sci. Technol. (India)*, 18, 23.
- Karel, M. (1975). Stability of low and intermediate moisture foods. In *Freeze drying and advanced food technology*, pp. 651-63, Eds. Goldblith, S.A., Rey, L. ve Rothmayr, W.W., Academic Press, New York.
- Karel, M., (1991). Physical structure and quality of dehydrated foods, In A.S. Mujumdar & I. Filkova, *Drying 91*, Amsterdam, Elsevier.
- Kim, M.J., Kim, C.Y. ve Park, I. (2005). Prevention of enzymatic browning of pear by onion extract, *Food Chemistry*, 89, 181-184.
- King, C.J., (1974). Understanding and conceiving chemical processes. *AIChE Monograph Series*, Am. Inst. Chem. Eng., New York, p. 70.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H.K., Jun, S., Irudayaraj, J. ve Demirci, A. (2008). Infrared Heating in Food Processing: An Overview. *Institute of Food Technologists, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Vol 7.
- Leblebici, F. ve Koxsel, H. (1999). Inactivation of Taylor & Francis Group, LLC., Floridasugar beet polyphenoloxidase by steam blanching, *Zuckerindustrie*, 124 (3), 213-216.
- Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials, *Industrial Engineering Chemistry*, 13, 427-443.
- Ma, Y.H. ve Arsem, H. (1982) Low pressure sublimation in combined radiant and microwave freeze drying. In *Drying'82*, Eds. Mujumdar, A. S., New York: McGraw-Hill.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana, *Journal of Food Engineering*, 44, 71-78.
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying, *Journal of Food Engineering*, 48, 169-175. Taylor & Francis Group, LLC., Florida

- Margaris, D. P., Ghiaus, A. G. (2007). Experimental study of hot air dehydration of Sultana grapes. *Journal of Food Engineering*, 79, 1115-1121.
- Martinez, M.V. ve Whitaker, J.R. (1995). The biochemistry and control of enzymatic browning, *Trends in Food Science & Technology*, 6, 195-200.
- Mazliak, P. (1970). Lipids, in *The Biochemistry of Fruits and Their Products*, pp. 209-221, Eds. Hulme, A.C., Elsevier, Amsterdam.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. ve Harriott, P. (1993). *Unit Operations of Chemical Engineering*, Fifth Edition, McGraw-Hill, Inc., USA.
- McLellan, M.R., Kime, R.W., Lee, C.Y. ve Long, T.M., (1995). Effect of honey as an antibrowning agent in light raisin processing, *Journal of Food Process Engineering*, 19, 1-8.
- Metaxas, A.C. ve Meredith, R.J. (1998). *Industrial microwave heating*, Eds Johns, A.T., Ratcliff, G., Platss, J.R., Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom.
- Midilli, A., Kucuk, H. ve Yapar, Z., (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Mishkin, M., Karel, M., ve Saguy, I. (1982). Applications of optimization in food dehydration. *Food Technology*, 36, 101-109.
- Mujumdar, A.S. ve Zhonghua, W. (2008). Thermal Drying Technologies- Cost-Effective Innovation Aided by Mathematical Modeling Approach. *Drying Technology*, 26, 145-153.
- Nelson, S.O., (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control, *Trans ASAE*, 39, 1475-1484.
- Nelson, S. O. ve Datta, A. K. (2001) Dielectric properties of food materials and electric field interactions, in *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, Eds. Datta, A. K., Anantheswaran, R. C., 69-114, Marcel Dekker, Inc. New York, USA.
- Nijhuis, H.H., Torringa, H.M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C. ve Kloek, W. (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables, *Trends in Food Science & Technology*, 9, 13-20.
- Nisha, P., Singhal, R.S. and Pandit, A.B., (2004). A study on the degradation kinetics of visual green color in spinach (*Spinacea oleracea* L.) and the effect of salt therein, *Journal of Food Engineering*, 64, 135-142.
- Nonhebel, M.A. ve Moss, A.H. (1971). *Drying of Solids in the Chemical Industry*, CRC Press, Ohio, USA.
- Page, G.E., (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers, M. Sc. Thesis, Purdue University.
- Palou, E., Lopez-Malo, A., Barbosa Canovas, G.V., Welti Chanes, J. ve Swanson, B.G. (1999). Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. *Journal of Food Science*, 64(1), 42-45.
- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. ve Sarsavadia, P.N. (1999). Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes, *Journal of Food Engineering*, 39, 211-216.
- Pedreschi, F., Moyano, P., Kaack, K. and Granby, K., (2005). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices, *Food Research International*, 38, 1-9.
- Perkin, R.M. (1979). Prospects of drying. *Journal of Separation Process Technology*, 1(2), 14.

Petrucci, V.E. ve Clary, C.D., (2002). A Treatise on Raisin Production, Processing and Marketing, Malcolm Media Press, Clovis, California, USA.

Piga, A., Poiana, M., Pinna, I., Agabbio, M. ve Mincione, A. (2004). Drying performance of five Italian apricot cultivars, *Sciences des Aliments*, 24(3), 247-259.

Ponting, J.D. ve McBean, D.M. (1970). Temperature and dipping treatment effects on drying rates and drying times of grapes, prunes and other waxy fruits, *Food Techn*, 24(12), 1403-1406.

Okos, M.R., Campanella, O., Narsimhan, G., SingTaylor & Francis Group, LLC., Florida, R.K. ve Weitnauer, A.C. (2007). Food Dehydration, in *Handbook of Food Engineering*, Eds. Valentas, K.J., Rotstein, R. ve Singh, R.P., pp. 601-744, Taylor and Francis Group, LLC, London, UK.

Ramaswamy, H.S. 2004. Thermal Processing of Fruits, in *Processing Fruits Science and Technology*, pp. 173-200, Eds. Barrett D.M., Somogyi, L., Ramaswamy, H.M., CRC Press LLC, Florida.

Ramaswamy, H.S. ve Marcott, M. (2006). Food Dehydration, in *Food Processing: Principles and Applications*, Eds. Ramaswamy, H.S. ve Marcott, M., Taylor & Francis Group, CRC Press, USA.

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review, *Journal of Food Engineering*, 49, 311-319.

Regier, M. ve Schubert, H. (2001). Microwave processing, in *Thermal Technologies in Food Processing*, Eds Richardson, P., Cambridge: Woodhead Publishing.

Regier, M. ve Schubert, H. (2005). Introducing microwave processing of food: principles and technologies, in *The microwave processing of foods*, pp. 3-21, Eds Schubert, H., Regier, M., CRC Press, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

Ren, G. ve Chen, F. (1998). Drying of American Ginseng (*Panax quinquefolium*) Roots by Microwave-Hot Air Combination, *Journal of Food Engineering*, 35, 433-443.

Robert, C., Richard-Forget, F., Rouch, C., Pabion, M. ve Cadet, F. (1996). A Kinetic Study of the Inhibition of Palmito Polyphenol Oxidase by L-cysteine, *Int. J. Biochem. Cell Biol.*, 28, 457-463.

Roberts, J. S., Kidd, D. R. ve Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grapes seeds. *Journal of Food Engineering*, 89, 460-465.

Rosenthal, I. (1992). *Electromagnetic Radiations in Food Science*, Springer Verlag, New York

Ryynanen, S. (2002). Microwave heating uniformity of multi-component prepared foods, PhD thesis, University of Helsinki, Finland.

Saguy, I. ve Karel, M. (1980). Modelling of quality deterioration during food processing and storage. *Food Technology*, 78, 84.

Sakai, N. ve Mao, N. (2006). Infrared Heating, in *Thermal Food Processing* pp. 493-524, Eds. Sun, D., Taylor & Francis Group, LLC., Florida

Saltiel, C. ve Datta, A.K. (1998). Heat and Mass Transfer in Microwave Processing, *Advances in Heat Transfer*, 32, 1-94.

Salunkhe, D.K., Bolin, H.R., ve Reddy, N.R. (1991). *Storage, Processing, and Nutritional Quality of Fruits and Vegetables*, 2nd ed., Vol. 1 and 2. CRC Press, Boca Raton, FL.

Saravacos, G.D. ve Marousis, S.N. (1988). Effect of ethyl oleate on the rate of air-drying of foods, *Journal of Food Engineering*, 7, 263-270.

Schiffmann, R.F. (1986). Food product development for microwave processing, *Food Technology*, 40(6), 94-98.

- Schiffmann, R.F. (2001). Microwave Processes for the Food Industry, in, Handbook of Microwave Technology for Food Applications pp. 299-337, Eds. Datta A.K. and Anantheswaran R.C., New York, Marcel Dekker, Inc.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., ve Hamdy, M. Y., (1979). Falling rate drying of fully exposed biological materials: A review of mathematical models, ASAE Paper, No. 79-6622, 1979 Winter Meeting of ASAE.
- Shih, C., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D. ve Hirschberg, E. (2008). Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries. American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 0001-2351.
- Srikiatden, J. ve Roberts, J.S. (2006). Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying, Journal of Food Engineering, 74, 143-152.
- Suarez, C., Loncin, M. ve Cherife, J.A. (1984). A preliminary study of the ethyl oleate dipping treatment on drying rate of grain corn, Journal of Food Science, 49, 236-238.
- Sumnu, G., Turabi, E. ve Oztop, M. (2005). Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens. LWT-Food Science and Technology, 38(5), 549-553.
- Tang, J., Hao, F. ve Lau, M. (2002). Microwave Heating in Food Processing, in Advances in Bioprocess Engineering (Advances in Agricultural Science and Technology), pp. 1-44, Eds Yang, H., Tang, J., World Scientific Publishing, London, United Kingdom.
- Tang, J. (2005). Dielectric properties of foods, in The microwave processing of foods, pp. 22-40, Eds Schubert, H., Regier, M., CRC Press, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- Tang, J. ve Yang, T. (2004). Dehydrated Vegetables: Principles and Systems, in Handbook of Vegetable Preservation and Processing, Eds. Hui, Y.H., Ghazala, S., Graham, D.M., Murrell, K.D. ve Nip, W. pp. 335-373, Mercel Dekker, New York.
- Tarhan, S., (2007). Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures. Journal of Food Engineering, 79, 255-260.
- Timoumi, S., Mihoubi, D. ve Zagrouba, F. (2007). S shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. LWT, 40, 1648-1654.
- Thomas, P.P. ve Gopalakrishnan, N. (1991). Green colour retention in enzyme inactivated dried pepper, Indian Spices, 28(1), 6-10.
- Tong, C.H., (1998). Microwave Heating of Bakes Dough Products With Simultaneous Heat and Moisture Transfer. Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison.
- Tulasidas, T., Raghavan, G.S.V. ve Norris, E.R., (1995). Effects of dipping and washing pre-treatments on microwave drying of grapes, Journal of Food Process Engineering, 19, 15-25.
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M. ve Barbosa- Canovas, G.V. (2001). Advances in dehydration of foods, Journal of Food Engineering, 49, 271-289.
- Von Hippel, A. (1954). Dielectrics and waves, Wiley, New York.
- Wang, W.C., ve Sastry, S.K. (2000). Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. J. Food Proc. Engr., 23(4),299-319.
- Wang, J. ve Sheng, K. (2006). Far-infrared and microwave drying of peach, LWT-Food Science and Technology, 39, 247-255.

- Wang, C. N. ve Singh, R. P., (1978). A single layer drying equation for rough rice, ASAE Paper, 78-3001.
- Wang, Y., Wig, T.D., Tang, J. ve Hallberg, L.M. (2003). Dielectric properties of foods relevant to radio frequency and microwave pasteurization and sterilization, *Journal of Food Engineering*, 57, 257-268.
- Wang, J. ve Xi, Y.S. (2005). Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process, *Journal of Food Engineering*, 68, 505-511.
- Warner, C.R., Diachenko, G.W. ve Bailey, C.J. (2000). Sulfites: An Important Food Safety Issue, Available: <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/fssulfite.html>
- Welti-Chanez, J., Bermudaz, D., Valdez-Fragoso, A., Mujica-Paz, H. ve Alzamora, S.M. (2004). Principles of Freeze-Concentration and Freeze-Drying, in *Handbook of Frozen Foods*, Eds. Hui, Y.H., Cornillon, P., Legarretta, I.G., Lim, M.H. ve Murrell, K.D., pp. 13-25, Marcel Dekker, New York.
- Yaldiz, O. ve Ertekin, C., (2001). Thin layer solar drying of some vegetables, *Drying Technology*, 19, 583-597.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. ve Uzun, H.I., (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy*, 26, 457-465.
- Yemencioglu, A., (2002). Control of polyphenol oxidase in whole potatoes by low temperature blanching, *European Food Research and Technology*, 214(4), 313-319.
- Zhang, H. ve Datta, A.K., (2001). Electromagnetics of Microwave Heating: Magnitude and Uniformity of Energy Absorption in an Oven, in *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, pp.33- 67, Eds Datta, A.K., Anantheswaran, R.C., Marcel Dekker, Inc., New York.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S. ve Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends in Food Science & Technology*, 17, 524-534.



# **EK A**

## **Nemli Havanın Özelliklerinin Hesaplanmasında Kullanılan Tablolar**

Eşit No	Elde Edilen	Bilinenler	Eşitlik	Açıklama
1	$p_{ws}$	T	$\alpha = A \cdot T^2 + B \cdot T + C + D \cdot T^{-1}$	$p_{ws} = 1000 \cdot \exp(\alpha)$ , T (K), $p_{ws}$ (Pa)
2	T	$p_{ws}$	$T = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K$	$\beta = \ln(p_{ws})$ , T (K), $p_{ws}$ (Pa)
3	$p_w$	$T_D$	$\alpha = A \cdot T_D^2 + B \cdot T_D + C + D \cdot T_D^{-1}$	$p_w = 1000 \cdot \exp(\alpha)$ , $T_D$ (K), $p_w$ (Pa)
4	$T_D$	$p_w$	$T_D = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K$	$\beta = \ln(p_w)$ , $T_D$ (K), $p_w$ (Pa)
5	$p_{ws}^*$	$T^*$	$\alpha = A \cdot T^{*2} + B \cdot T^* + C + D \cdot T^{*-1}$	$p_{ws}^* = 1000 \cdot \exp(\alpha)$ , $T^*$ (K), $p_{ws}^*$ (Pa)
6	h	T, W	$h = T + W \cdot (2501 + 1.805 \cdot T)$	T (°C), h (kJ/kg)
7	T	h, W	$T = \frac{h - 2501 \cdot W}{1 + 1.805 \cdot W}$	T (°C), h (kJ/kg)
8	W	h, T	$W = \frac{h - T}{2501 + 1.805 \cdot T}$	T (°C), h (kJ/kg)
9	W	P, $p_w$	$W = 0.62198 \cdot \frac{p_w}{P - p_w}$	P (Pa), $p_w$ (Pa)
10	P	$p_w$ , W	$P = 0.62198 \cdot \frac{p_w}{W} + p_w$	P (Pa), $p_w$ (Pa)
11	$p_w$	P, W	$p_w = \frac{P \cdot W}{W + 0.62198}$	P (Pa), $p_w$ (Pa)
12	$W_s$	P, $p_{ws}$	$W_s = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}}{P - p_{ws}}$	P (Pa), $p_{ws}$ (Pa)
13	P	$p_{ws}$ , $W_s$	$P = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}}{W_s} + p_{ws}$	P (Pa), $p_{ws}$ (Pa)
14	$p_{ws}$	P, $W_s$	$p_{ws} = 0.62198 \cdot \frac{P - W_s}{W_s + 0.62198}$	P (Pa), $p_{ws}$ (Pa)
15	$W_s^*$	P, $p_{ws}^*$	$W_s^* = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}^*}{P - p_{ws}^*}$	P (Pa), $p_{ws}^*$ (Pa)

Tablo A.1. Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Hesaplanması



16	P	$p_{ws}^*, W_s^*$	$P = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}^*}{W_s^*} + p_{ws}^*$	$P \text{ (Pa)}, P_{ws}^* \text{ (Pa)}$
17	$p_{ws}^*$	$p, W_s^*$	$p_{ws}^* = \frac{P \cdot W_s^*}{W_s^* + 0.62198}$	$P \text{ (Pa)}, P_{ws}^* \text{ (Pa)}$
18	$W_s^*$	$h, W, T$	$W_s^* = \frac{h_s^* - h}{h_w^*} + W$	$h_s^* = T^* + (2501 + 1.805 \cdot T^*) \cdot W_s^*$ $h_w^* = 4.186 \cdot T^*$ ; $h, h_s^*, h_w^*$ (kJ/kg), $T^*$ (°C)
19	W	$W_s^*, h, T^*$	$W = \frac{h - h_s^*}{h_w^*} + W_s^*$	$h_s^* = T^* + (2501 + 1.805 \cdot T^*) \cdot W_s^*$ $h_w^* = 4.186 \cdot T^*$ ; $h, h_s^*, h_w^*$ (kJ/kg), $T^*$ (°C)
20	W	$W_s^*, T$	$W = \frac{(2501 - 2.381 \cdot T^*) \cdot W_s^* - (T - T^*)}{2501 + 1.805 \cdot T - 4.186 \cdot T^*}$	$T \text{ (°C)}, T^* \text{ (°C)}$
21	T	$W_s^*, W, T$	$T^* = \frac{2501 \cdot (W_s^* - W) - T \cdot (1 + 1.805 \cdot W)}{2.381 \cdot W_s^* - 4.186 \cdot W - 1}$	$T \text{ (°C)}, T^* \text{ (°C)}$
22	$W_s^*$	$W, T, T^*$	$W_s^* = \frac{(2501 + 1.805 \cdot T - 2.381 \cdot T^*) \cdot W + (T - T^*)}{2501 - 2.381 \cdot T^*}$	$T \text{ (°C)}, T^* \text{ (°C)}$
23	T	$W_s^*, W, T^*$	$T = \frac{(2501 - 2.381 \cdot T^*) \cdot W_s^* - (2501 - 4.186 \cdot T^*) \cdot W + T^*}{1 + 1.805 \cdot W}$	$T \text{ (°C)}, T^* \text{ (°C)}$
24	$\phi$	$p_w, p_{ws}$	$\phi = P_w / P_{ws}$	$p_w \text{ (Pa)}, p_{ws} \text{ (Pa)}$
25	$p_w$	$\phi, p_{ws}$	$p_w = \phi \cdot p_{ws}$	$p_w \text{ (Pa)}, p_{ws} \text{ (Pa)}$
26	$p_{ws}$	$\phi, p_w$	$p_{ws} = p_w / \phi$	$p_w \text{ (Pa)}, p_{ws} \text{ (Pa)}$
27	$\mu$	$W, W_s$	$\mu = W / W_s$	
28	v	$T, P, W$	$v = R_a \cdot T \cdot (1 + 1.6078 \cdot W) / P R_a = 287.055 \text{ (J/kgK)}$	$v \text{ (m}^3\text{/kg)}, T \text{ (°C)}, P \text{ (Pa)}$

Tablo A.1. Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
1	T, T*, T <sub>D</sub>	1	p <sub>ws</sub>	1	
		2	p <sub>ws</sub> *	5	
		3	p <sub>w</sub>	3	
		4	P	9, 15, 18	Eşitlik 9 ve 15'i 18 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		5	W	9	
		6	W <sub>s</sub>	12	
		7	W <sub>s</sub> *	15	
		8	h	6	
		9	Φ	24	
2	T, T <sub>D</sub> , P	1	p <sub>ws</sub>	1	
		2	p <sub>w</sub>	3	
		3	W	9	
		4	W <sub>s</sub>	12	
		5	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		6	p <sub>ws</sub> *	5	
		7	W <sub>s</sub> *	15	
		8	h	6	
		9	Φ	24	
3	T, W, P	1	p <sub>ws</sub>	1	
		2	p <sub>w</sub>	11	
		3	T <sub>D</sub>	4	
		4	W <sub>s</sub>	12	
		5	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		6	p <sub>ws</sub> *	5	
		7	W <sub>s</sub> *	15	
		8	h	6	
		9	Φ	24	
4	T, W, Φ	1	p <sub>ws</sub>	1	
		2	p <sub>w</sub>	25	
		3	P	10	
		4	T <sub>D</sub>	4	
		5	W <sub>s</sub>	12	
		6	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	p <sub>ws</sub> *	5	
		8	W <sub>s</sub> *	15	
		9	h	6	
5	T, Φ, h	1	p <sub>ws</sub>	1	
		2	p <sub>w</sub>	25	
		3	W	8	
		4	P	10	
		5	T <sub>D</sub>	4	
		6	W <sub>s</sub>	12	
		7	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		8	p <sub>ws</sub> *	5	
		9	W <sub>s</sub> *	15	

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
6	T, T*, P	1	$p_{ws}$	1	
		2	$p_{ws}^*$	5	
		3	$W_s^*$	15	
		4	W	20	
		5	$W_s$	12	
		6	$p_w$	11	
		7	$T_D$	4	
		8	h	6	
		9	$\phi$	24	
7	T, T <sub>D</sub> , W	1	$p_{ws}$	1	
		2	$p_w$	3	
		3	P	10	
		4	$W_s$	12	
		5	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		6	$p_{ws}^*$	5	
		7	$W_s^*$	15	
		8	h	6	
		9	$\phi$	24	
8	T, $\phi$ , P	1	$p_{ws}$	1	
		2	$p_w$	25	
		3	W	9	
		4	$W_s$	12	
		5	$T_D$	4	
		6	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	h	6	
9	T, W, h				ÇÖZÜM YOK
10	T, T*, W	1	$p_{ws}$	1	
		2	$p_{ws}^*$	5	
		3	$W_s^*$	22	
		4	P	16	
		5	$W_s$	12	
		6	$p_w$	11	
		7	$T_D$	4	
		8	h	6	
		9	$\phi$	24	
11	T, T <sub>D</sub> , $\phi$				ÇÖZÜM YOK

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
12	T, h, P	1	$p_{ws}$	1	
		2	W	8	
		3	$p_w$	11	
		4	$T_D$	4	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$\phi$	24	
13	T, $T^*$ , $\phi$	1	$p_{ws}$	1	
		2	$p_w$	25	
		3	$T_D$	4	
		4	$p_{ws}^*$	5	
		5	P	9, 20	Eşitlik 9'u 20 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen ikinci dereceden denklemi çözün
		6	W	9	
		7	$W_s$	12	
		8	$W_s^*$	15	
		9	h	6	
14	T, h, $T_D$	1	$p_{ws}$	1	
		2	W	8	
		3	$p_w$	3	
		4	P	10	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$\phi$	24	
15	T, $T^*$ , h	1	$p_{ws}$	1	
		2	W	8	
		3	$p_{ws}^*$	5	
		4	$W_s^*$	22	
		5	P	16	
		6	$p_w$	11	
		7	$T_D$	4	
		8	$W_s$	12	
		9	$\phi$	24	
16	$T^*$ , $T_D$ , P	1	$p_w$	3	
		2	$p_{ws}^*$	5	
		3	$W_s^*$	15	
		4	W	9	
		5	T	23	
		6	$p_{ws}$	1	
		7	$W_s$	12	
		8	h	6	
		9	$\phi$	24	

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
17	T*, P, W	1	$p_w$	11	
		2	$T_D$	4	
		3	$p_{ws}^*$	5	
		4	$W_s^*$	15	
		5	T	23	
		6	$p_{ws}$	1	
		7	$W_s$	12	
		8	h	6	
		9	$\phi$	24	
18	T*, W, $\phi$	1	$p_{ws}^*$	5	
		2	T	1, 10, 20, 25	Eşitlik 25'i 10 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denk-lemi 1 ve 25 nolu eşitlikleri kullanarak sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		3	$p_{ws}$	1	
		4	P	10, 25	
		5	$W_s$	12	
		6	$W_s^*$	15	
		7	$p_w$	11	
		8	$T_D$	4	
		9	h	6	
19	T*, $\phi$ , h	1	$p_{ws}^*$	5	
		2	T	8, 9, 15, 18, 25	Eşitlik 9 ve 25'i 8 nolu eşitliğe yerleştirin ve P(T)'yi elde edin, daha sonra bu denklemi 18 nolu eşitliğe, 15 nolu eşitliği de kullanarak yerleştirin ve elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		3	P		İkinci adımda bulunan P(T)'den yararlanın
		4	$p_{ws}$	1	
		5	$W_s$	12	
		6	$p_w$	25	
		7	$T_D$	4	
		8	W	9	
		9	$W_s^*$	15	
20	T*, $T_D$ , W	1	$p_w$	3	
		2	P	10	
		3	$p_{ws}^*$	5	
		4	$W_s^*$	15	
		5	T	23	
		6	$p_{ws}$	1	
		7	$W_s$	12	
		8	h	6	
		9	$\phi$	24	
21	T*, $\phi$ , P	1	$p_{ws}^*$	5	
		2	$W_s^*$	15	
		3	T	9, 20, 25	Eşitlik 9 ve 25'i 20 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		4	$p_{ws}$	1	
		5	$W_s$	12	
		6	W	9	
		7	$p_w$	25	
		8	$T_D$	4	
		9	h	6	

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
22	T*, W, h	1	$p_{ws}^*$	5	
		2	T	7	
		3	$p_{ws}$	1	
		4	$W_s^*$	22	
		5	P	16	
		6	$p_w$	11	
		7	$T_D$	4	
		8	$W_s$	12	
		9	$\phi$	24	
23	T*, $T_D$ , $\phi$	1	$p_w$	3	
		2	$p_{ws}^*$	5	
		3	$p_{ws}$	26	
		4	T	2	
		5	P	9, 15, 20	Eşitlik 9 ve 15'i 20 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen ikinci dereceden denklemi çözün
		6	W	9	
		7	$W_s^*$	15	
		8	$W_s$	12	
		9	h	6	
24	T*, P, h	1	$p_{ws}^*$	5	
		2	$W_s^*$	15	
		3	W	19	
		4	$p_w$	11	
		5	$T_D$	4	
		6	T	7	
		7	$p_{ws}$	1	
		8	$W_s$	12	
		9	$\phi$	24	
25	T*, $T_D$ , h	1	$p_{ws}^*$	5	
		2	$p_w$	3	
		3	P	9, 15, 18	Eşitlik 9 ve 15'i 18 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen ikinci dereceden denklemi çözün
		4	W	9	
		5	T	7	
		6	$p_{ws}$	1	
		7	$W_s$	12	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$\phi$	24	
26	$T_D$ , P, W				ÇÖZÜM YOK
27	$T_D$ , W, $\phi$	1	$p_w$	3	
		2	$p_{ws}$	26	
		3	T	2	
		4	P	10	
		5	$W_s$	12	
		6	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	h	6	

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
28	$T_D, \phi, h$	1	$p_w$	3	
		2	$p_{ws}$	26	
		3	$T$	2	
		4	$W$	8	
		5	$P$	10	
		6	$W_s$	12	
		7	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		8	$p_{ws}^*$	5	
		9	$W_s^*$	15	
29	$T_D, P, \phi$	1	$p_w$	3	
		2	$p_{ws}$	26	
		3	$T$	2	
		4	$W$	9	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$h$	6	
30	$T_D, W, h$	1	$p_w$	3	
		2	$P$	10	
		3	$T$	7	
		4	$p_{ws}$	1	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$\phi$	24	
31	$T_D, P, h$	1	$p_w$	3	
		2	$W$	9	
		3	$T$	7	
		4	$p_{ws}$	1	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$\phi$	24	
32	$P, W, \phi$	1	$p_w$	11	
		2	$T_D$	4	
		3	$p_{ws}$	26	
		4	$T$	2	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$h$	6	

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
33	P, $\phi$ , h	1	T	6, 9, 25	Eşitlik 9 ve 25'i 6 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	$p_{ws}$	1	
		3	$W_s$	12	
		4	$p_w$	25	
		5	$T_D$	4	
		6	W	9	
		7	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		8	$p_{ws}^*$	5	
		9	$W_s^*$	15	
34	P, W, h	1	T	7	
		2	$p_{ws}$	1	
		3	$p_w$	11	
		4	$T_D$	4	
		5	$W_s$	12	
		6	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	$p_{ws}^*$	5	
		8	$W_s^*$	15	
		9	$\phi$	24	
35	W, $\phi$ , h	1	T	7	
		2	$p_{ws}$	1	
		3	$p_w$	25	
		4	$T_D$	4	
		5	P	10	
		6	$W_s$	12	
		7	$T^*$	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		8	$p_{ws}^*$	5	
		9	$W_s^*$	15	

**Tablo A.2.** Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tablo 2.4'de Verilen Değişik Kombinasyonlar İçin Hesaplanması (devam)



# **EK B**

## **Nemli Havanın Özelliklerinin Hesaplanması**

Nemli havanın özelliklerinin hesaplanması ile ilgili oluşturulan dört örnek aşağıda sunulmuştur.

#### Örnek 1.

Kombinasyon No. 6 (bak Tablo A.2)

Bilinenler:  $T = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $T^* = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 90000 \text{ Pa}$

Adım 1: Tablo A.1, Eşitlik No 1,  $p_{ws} = 4246.15 \text{ Pa}$

Adım 2: Tablo A.1, Eşitlik No 5,  $p_{ws}^* = 3169.31 \text{ Pa}$

Adım 3: Tablo A.1, Eşitlik No 15,  $W_s^* = 2.27 \text{ g/kg KH}$

Adım 4: Tablo A.1, Eşitlik No 20,  $W = 2.06 \text{ g/kg KH}$

Adım 5: Tablo A.1, Eşitlik No 12,  $W_s = 3.08 \text{ g/kgKH}$

Adım 6: Tablo A.1, Eşitlik No 11,  $p_w = 2882.29 \text{ Pa}$

Adım 7: Tablo A.1, Eşitlik No 4,  $T_D = 23.42^{\circ}\text{C}$

Adım 8: Tablo A.1, Eşitlik No 6,  $h = 82.58 \text{ kJ/kg}$

Adım 9: Tablo A.1, Eşitlik No 24,  $\phi = \%67.88$

#### Örnek 2.

Kombinasyon No. 13 (bak Tablo A.2)

Bilinenler:  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $T^* = 19^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = \%53$

Adım 1: Tablo A.1, Eşitlik No 1,  $p_{ws} = 3169.31 \text{ Pa}$

Adım 2: Tablo A.1, Eşitlik No 25,  $p_w = 1679.74 \text{ Pa}$

Adım 3: Tablo A.1, Eşitlik No 4,  $T_D = 14.76^{\circ}\text{C}$

Adım 4: Tablo A.1, Eşitlik No 5,  $p_{ws}^* = 2197.87 \text{ Pa}$

Adım 5: Tablo A.1, Eşitlik No 9 ve 20,  $P = 133897.34 \text{ Pa}$

Adım 6: Tablo A.1, Eşitlik No 9,  $W = 7.90 \text{ g/kgKH}$

Adım 7: Tablo A.1, Eşitlik No 12,  $W_s = 1.51 \text{ g/kgKH}$

Adım 8: Tablo A.1, Eşitlik No 15,  $W_s^* = 0.01 \text{ g/kgKH}$

Adım 9: Tablo A.1, Eşitlik No 6,  $h = 45.12 \text{ kJ/kg}$

#### Örnek 3.

Kombinasyon No. 20 (bak Tablo A.2)

Bilinenler:  $T^* = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $T_D = 27^{\circ}\text{C}$ ,  $W = 20 \text{ g/kgKH}$

Adım 1: Tablo A.1, Eşitlik No 3,  $p_w = 3567.41 \text{ Pa}$

Adım 2: Tablo A.1, Eşitlik No 10,  $P = 114510.55 \text{ Pa}$

Adım 3: Tablo A.1, Eşitlik No 5,  $p_{ws}^* = 4246.15$  Pa

Adım 4: Tablo A.1, Eşitlik No 15,  $W_s^* = 2.39$  g/kgKH

Adım 5: Tablo A.1, Eşitlik No 23,  $T = 39.27^\circ\text{C}$

Adım 6: Tablo A.1, Eşitlik No 1,  $p_{ws} = 7099.75$  Pa

Adım 7: Tablo A.1, Eşitlik No 12,  $W_s = 4.11$  g/kgKH

Adım 8: Tablo A.1, Eşitlik No 6,  $h = 90.70$  kJ/kg

Adım 9: Tablo A.1, Eşitlik No 24,  $\phi = \%50.24$

Örnek 4.

Kombinasyon No. 31 (bak Tablo A.2)

Bilinenler:  $T_D = 32^\circ\text{C}$ ,  $P = 109000$  Pa,  $h = 110$  kJ/kg

Adım 1: Tablo A.1, Eşitlik No 3,  $p_w = 4758.67$  Pa

Adım 2: Tablo A.1, Eşitlik No 9,  $W = 28.39$  g/kgKH

Adım 3: Tablo A.1, Eşitlik No 7,  $T = 37.09^\circ\text{C}$

Adım 4: Tablo A.1, Eşitlik No 1,  $p_{ws} = 6310.88$  Pa

Adım 5: Tablo A.1, Eşitlik No 12,  $W_s = 3.82$  g/kgKH

Adım 6: Tablo A.1, Eşitlik No 15 ve 21,  $T^* = 33.09^\circ\text{C}$

Adım 7: Tablo A.1, Eşitlik No 5,  $p_{ws}^* = 5059.01$  Pa

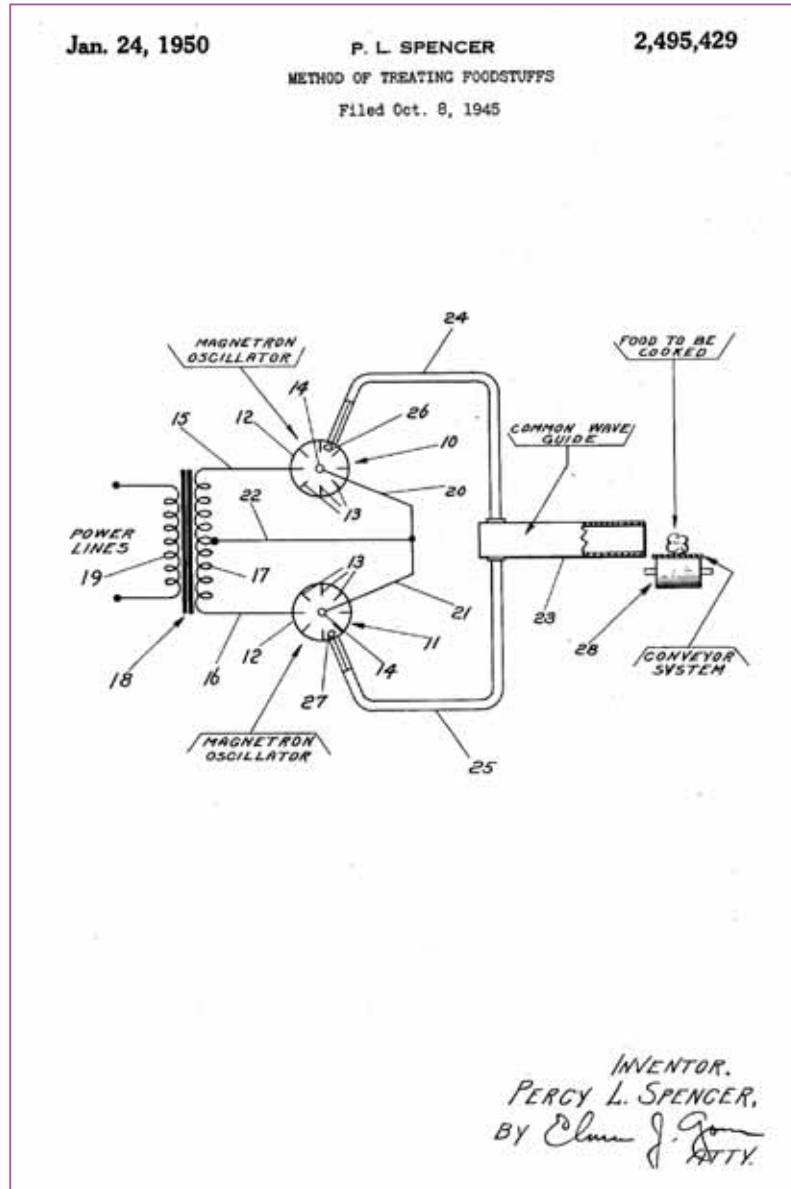
Adım 8: Tablo A.1, Eşitlik No 15,  $W_s^* = 0.03$  g/kgKH

Adım 9: Tablo A.1, Eşitlik No 24,  $\phi = \%75.40$



# EK C

## Percy Spencer'nin Mikrodalga Çalışması için Almış Olduğu Patentler



Şekil C.1. Mikrodalga Cihazın Teknik Çizimi

Patented Jan. 24, 1950

2,495,429

## UNITED STATES PATENT OFFICE

2,495,429

### METHOD OF TREATING FOODSTUFFS

Percy L. Spencer, West Newton, Mass., assignor to Raytheon Manufacturing Company, Newton, Mass., a corporation of Delaware

Application October 8, 1945, Serial No. 620,919

6 Claims. (Cl. 99-217)

**1**  
My present invention relates to the treatment of foodstuffs, and more particularly to the cooking thereof through the use of electromagnetic energy.

Such energy has been used before for this purpose, but the frequencies employed have been relatively low, for example, not over 50 megacycles. I have found that at frequencies of this order of magnitude, the energy necessarily expended in order to generate sufficient heat to satisfactorily cook the foodstuff is much too high to permit the practical use of the process. I have further found, however, that this disadvantage may be eliminated by employing wave lengths falling in the microwave region of the electromagnetic spectrum, for example, wave lengths of the order of 10 centimeters or less. By so doing, the wave length of the energy becomes comparable to the average dimension of the foodstuff to be cooked, and as a result, the heat generated in the foodstuff becomes intense, the energy expended becomes a minimum, and the entire process becomes efficient and commercially feasible.

It is, therefore, one of the objects of my present invention to provide an efficient method of employing electromagnetic energy for the cooking of foodstuff.

In the accompanying specification I shall describe, and in the annexed drawing show, an illustrative embodiment of the method and means for treating foodstuff of my present invention. It is, however, to be clearly understood that I do not wish to be limited to the details herein shown and described for purposes of illustration only, inasmuch as changes therein may be made without the exercise of invention and within the true spirit and scope of the claims hereinafter appended.

In said drawing, the single figure is a schematic arrangement of apparatus which may be utilized to carry out the method of my present invention.

Referring now more in detail to the aforesaid illustrative embodiment of my present invention, with particular reference to the drawing illustrating the same, the numerals 10 and 11 generally designate electron-discharge devices of the magnetron type, each including, for example, an evacuated envelope 12, made of highly conductive material, such as copper, and provided with a plurality of inwardly-directed, radially-disposed anode vanes 13. The arrangement is such that each pair of adjacent anode vanes 13 forms, together with that portion of the envelope 12

**2**  
lying therebetween, a cavity resonator whose natural resonant frequency is, as is well known to those skilled in the art, a function of the geometry of the physical elements making up the same. For the purposes of my present invention it is desirable that the dimensions of each such cavity resonator be such that the wave length of the electrical oscillations adapted to be generated therein is comparable to the average dimension of the foodstuff to be cooked, for example, of the order of 10 centimeters or less.

Centrally located in each envelope 12 is a highly electron-emissive cathode member 14, for example, of the well-known alkaline-earth metal oxide type, said cathode member being provided with conventional means (not shown) for raising the temperature thereof to a level sufficient for thermionic emission.

Each electron-discharge device 10 is completed by magnetic means (not shown) for establishing a magnetic field in a direction transverse of the electron path between the cathode and anode members thereof.

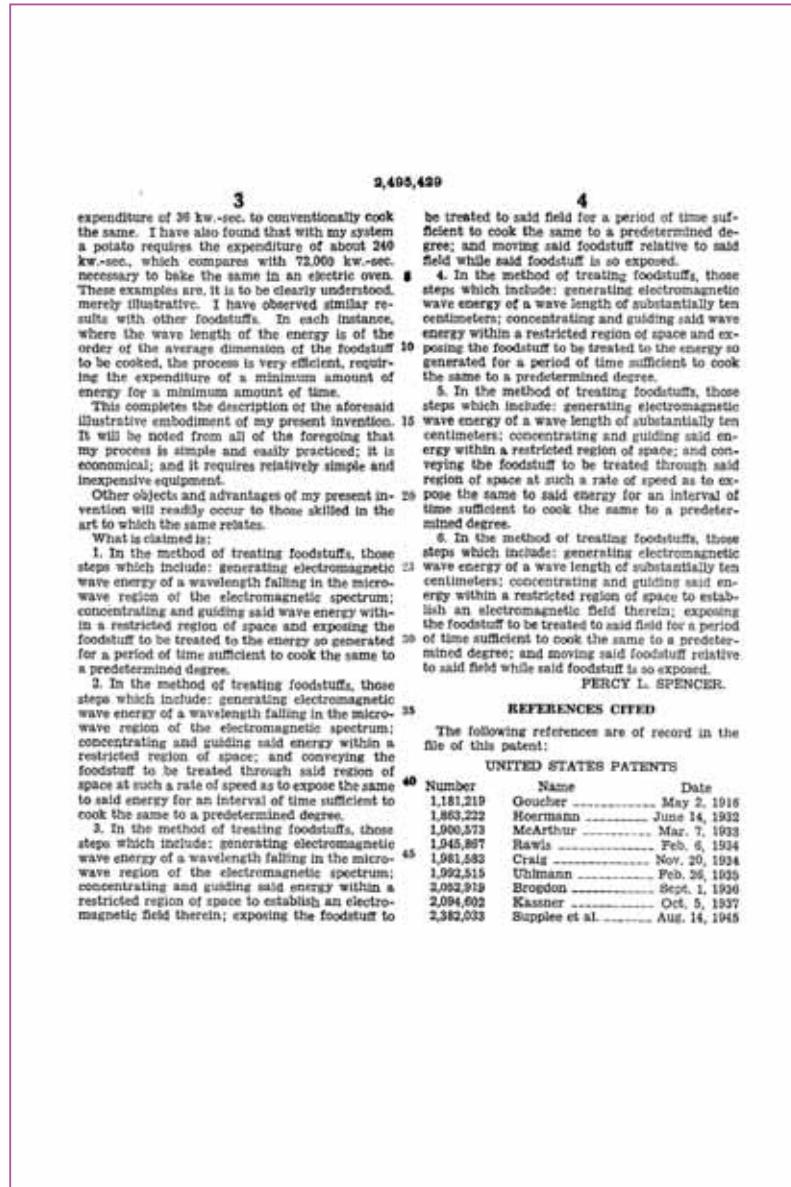
The conductive envelopes 12 of the electron-discharge devices 10 and 11 are connected, respectively, by conductors 15 and 16, to the opposite terminals of the secondary winding 17 of a transformer 18, the primary winding 19 of said transformer being connected to a source of raw A.-C., for example, the conventional 60-cycle power lines. The cathodes 14 of said electron-discharge devices 10 and 11 are tied together by conductors 20 and 21, which are, in turn, connected, by a conductor 22, to a center tap on the secondary winding 17 of the transformer 18.

Thus, the electron-discharge devices 10 and 11 are connected for push-pull operation, whereby said devices alternately deliver hyper-frequency energy to a common, hollow wave guide 23 through coaxial transmission lines 24 and 25 which are coupled to their respective oscillators, for example, by loops 26 and 27.

Adjacent the outlet end of the wave guide 23 I provide an appropriate, transversely-moving conveyor system 28 for carrying the foodstuff to be cooked into a region where it will be exposed to the energy emanating from said wave guide, the speed at which said conveyor system is operated being determined by the nature of the particular foodstuff to be cooked, and the time required for cooking the same.

With the system described, I have found that an egg may be rendered hardboiled with the expenditure of 2 kw.-sec. This compares with an

Şekil C.2. Gıdaların Mikrodalga ile Isıtılmasında Kullanılabilecek Yöntemler



Şekil C.2. Gıdaların Mikrodalga ile Isıtılmasında Kullanılabilecek Yöntemler (devam)



No	Patent no	İnceleme	Veriliş	Patent adı
1	2455957	9 Mayıs 1945	14 Aralık 1948	"Multielement electron discharge device"
2	2458802	30 Mart 1942	11 Ocak 1949	"Magnetron assembly and method"
3	2459195	3 Mart 1945	18 Ocak 1949	"Electron discharge device"
4	2459847	14 Haziran 1945	25 Ocak 1949	"Electric flash percussive welding"
5	2466059	3 Eylül 1943	5 Nisan 1949	"Laminated magnetron"
6	2466060	31 Mart 1945	5 Nisan 1949	"Electron discharge device"
7	2468129	20 Ağustos 1947	26 Nisan 1949	"Cathode support"
8	2468243	7 Mayıs 1945	26 Nisan 1949	"Electron discharge device"
9	2473399	27 Mart 1945	14 Haziran 1949	"Electron discharge device of the magnetron type"
10	2473550	19 Ağustos 1947	21 Haziran 1949	"Directly-heated cathodes"
11	2473827	5 Ekim 1943	21 Haziran 1949	"Electronic discharge device of the cavity resonator type"
12	2473828	15 Kasım 1943	21 Haziran 1949	"Electron discharge device of the magnetron type"
13	2475526	26 Eylül 1947	5 Haziran 1949	"Electron discharge device of the magnetron type"
14	2475646	22 Şubat 1945	12 Temmuz 1949	"Electron discharge device of the magnetron type"
15	2477013 <sup>13</sup>	18 Şubat 1946	26 Temmuz 1949	"Electric plug"
16	2477317	21 Mart 1945	26 Temmuz 1949	"Electron discharge device"
17	2480679	29 Mart 1947	30 Ağustos 1949	"Prepared food article and method of preparing " <sup>14</sup>
18	2481171	20 Ağustos 1945	6 Eylül 1949	"Electron discharge device"
19	2495429	8 Ekim 1945	24 Ocak 1950	"Method of treating foodstuffs"
20	2496500	18 Temmuz 1945	7 Şubat 1950	"Electron discharge device"
21	2498719	7 Haziran 1947	28 Şubat 1950	"High frequency protective circuits"
22	2500328	27 Mart 1945	14 Mart 1950	"Pulsed oscillator of the magnetron type"
23	2501196	20 Mart 1945	21 Mart 1950	"Electron discharge device"
24	2524000	17 Aralık 1945	26 Eylül 1950	"Vacuum condenser"
25	2524001	19 Mayıs 1948	26 Eylül 1950	"Compressed cathode support structure"
26	2528251	8 Mart 1947	31 Ekim 1950	"Receptable"
27	2539337	7 Mart 1945	23 Ocak 1951	"Electron discharge device of the magnetron type"
28	2540036	26 Mart 1948	30 Ocak 1951	"Food cooking"
29	2546952	27 Şubat 1946	27 Mart 1951	"Electrical system"
30	2550614	13 Kasım 1942	24 Nisan 1951	"High-efficiency magnetron"
31	2582174	22 Ekim 1949	8 Ocak 1952	"Electronic cooking"
32	2584509	22 Ocak 1949	5 Şubat 1952	"Radio object-locating system"
33	2593067	13 Şubat 1947	15 Nisan 1952	"High frequency apparatus"
34	2601067	24 Mart 1948	17 Haziran 1952	"Coffee brewing"
35	2601178	9 Haziran 1950	17 Haziran 1952	"Method for producing fluorescent screens"
36	2605383	8 Ekim 1945	29 Temmuz 1952	"Means for treating foodstuffs"

Tablo C.1 Percy L, Spencer, Raytheon Manufacturing Company, Newton, Massachustest

<sup>13</sup> Francis C. Grateyk ile birlikte.<sup>14</sup> Koçanı ile birlikte mikrodalgada mısır patlatma için

37	2612623	26 Ekim 1949	30 Eylül 1952	"Anode structure for electron discharge devices"
38	2620458	31 Mart 1949	2 Aralık 1952	"Microwave amplifier"
39	2626372	7 Ekim 1950	20 Ocak 1953	"Cavity resonator structure and tube employing the same"
40	2652475	7 Haziran 1950	15 Eylül 1953	"Microwave apparatus"
41	2679595	18 Kasım 1950	25 Mayıs 1954	"High-frequency protective circuits"
42	2784345	26 Haziran 1951	5 Mart 1957	"Electron-discharge devices"
43	2801367	26 Ocak 1955	30 Temmuz 1957	"Wide range tunable magnetrons"
44	2837694	16 Eylül 1954	3 Haziran 1958	"Electron discharge devices"
45	2840785	29 Haziran 1954	24 Haziran 1958	"Frequency modulated magnetrons"
46	3109123	15 Mart 1962	29 Ekim 1963	"Electron discharge devices with a sharp edged cathode"

**Tablo C.1** Percy L, Spencer, Raytheon Manufacturing Company, Newton, Massachusset (devam)

## İNDEKS

### A

Akışkan yatak kurutucular, 29  
Aplikatör, 38  
Atomizer, 27  
Ayrık eleman modeli, 18

### B

Bağıl geçirgenlik, 39  
Büzülme, 12

### C

CFD, 18  
CIE, 51

### D

Dalga kılavuzu, 38  
Dielektrik kayıp faktörü, 39  
Difüzyon  
    efektif, 16  
    gıda değerleri, 17  
    tanım, 16  
Dondurarak kurutma, 31

### E

Elektromanyetik  
    dalgalar, 35  
    spektrum, 35  
Etil oleat, 19, 51

### F

Fick kanunu, 16  
FIR, 47  
Frekans, 35

### G

Gözenek ağ modeli, 18

### H

Henderson ve Pabis, 16  
HunterLab, 51

### I

İnfrared. Bkz. Kızılötesi  
ISM, 36

### K

Katalist, 50  
Katalitik, 50  
Kızılötesi ışıma  
    ısıtıcılar, 48  
    ısıtma, 47  
    kurutma, 49  
    tanım, 47  
Kükürt, 20  
Kurutma  
    amacı, 1  
    azalan kuruma periyodu, 14  
    ince tabaka, 16  
    matematiksel model, 18  
    sabit kuruma periyodu, 14  
    tanım, 11  
    tarihi, 11  
Kurutma eğrileri  
    modellenmesi, 15  
    özellikleri, 14  
Kurutucular  
    akışkan yatak, 29  
    bantlı, 26  
    güneş enerjili, 23  
    kızılötesi, 49  
    liyofilizasyon, 31  
    mikrodalga, 43  
    püskürtmeli, 27  
    sıcak hava, 25  
    tünel tipi, 26

### L

L\*a\*b\* uzayı, 70  
Latis Boltzmann simülasyonu, 26  
Lewis, 22  
L-sistein, 30  
Lüminisans, 70

### M

Magnetron, 52  
Manyetik geçirgenlik, 18  
Mikrodalga  
sistemler, 16  
    tanım ve yasa, 20  
MIR, 52  
Mutlak nem, 5

**N****Nem**

- bağıl nem, 6
- doyma derecesi, 6
- doyma nem oranı, 6

**Nem oranı, 5****NIR, 47****O****Oksidasyon, 12****Önişlemler, 19**

- buharla haşlama, 20, 52
- çözeltiye daldırma, 19, 52
- haşlama, 20

**Ötektik nokta, 32****Özgül nem, 5****P****Page, 16****Penetrasyon derinliği, 41, 44, 49****Percy Spencer, 37, 83****Polarizasyon**

- Maxwell-Wagner, 38
- oryantasyon, 38

**Polifenol oksidaz, 20, 55****Potasyum karbonat, 19, 51****PPO. Bkz. Polifenol oksidaz****Psikrometri**

- bilgisayar programı, 10
- entalpi, 8
- hesaplama, 9
- mol oranı, 5
- mutlak nem, 5
- nem oranı, 5
- özgül nem, 5
- standart atmosfer, 3

**Püskürtmeli kurutucu, 27****R****Resorsinol, 20****S****SAR, 36****SEM, 57****Sıcaklık**

- çiylenme noktası, 6
- yaş termometre, 6

**Siklon, 28****Sonlu eleman analizi, 18****Stefan-Boltzman, 48****Su aktivitesi**

- formül, 13
- mikrobiyal gelişim, 13
- tanım, 13

**Süblimasyon, 31****Suyun Faz Diyagramı, 32****T****Tepsili kurutucu, 26****U****Üzüm, 40, 51, 52****V****Vakum, 43, 45****W****Wang and Singh, 16**

## ÖZGEÇMİŞ

### **Dr. Gökhan Bingöl**

Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı (USDA)  
Tarımsal Araştırma Servisi  
Batı Bölgesel Araştırma Merkezi  
İşlenmiş Ürün Araştırma Birimi  
Albany-California, ABD

Dr. Bingöl 1975 yılında Adıyaman'da doğmuştur. Orta ve lise eğitimini Özel Tercüman Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1995 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Gıda Mühendisliği Bölümü'nü kazanmıştır. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra 1999 yılında İTÜ Gıda Mühendisliği'nde yüksek lisans eğitimine devam etmiş ve "Termodinamik Eğitimin Etkileşimli Bilgisayar Ortamında Gerçek Zamanlı Java-Telnet Destekli Olarak Gerçekleştirilmesi" adlı yüksek lisans tezini tamamlayarak 2001 yılında yüksek mühendis ünvanını kazanmıştır. Yüksek lisansı takiben 2001 yılında ise doktora eğitimine başlamıştır. Doktora çalışmasında "Farklı Önışlemlerin Thompson Çekirdeksiz Üzümlerinin Mikrodalga Yardımlı Konvektif ve Yalnız Konvektif Kurutulması Sırasında Kurutma ve Renk Kinetiği Üzerine Olan Etkilerin İncelenmesi" başlıklı tezini Prof. Dr. Y. Onur Devres yönetiminde 2008 yılında tamamlamıştır. Çalışması İstanbul Sanayi Odası tarafından ödüllendirilmiştir. Dr. Bingöl şu anda Amerikan Tarım Bakanlığı'nın Kaliforniya Eyaleti'ndeki "Western Regional Research Center" adlı araştırma merkezinde bilimsel çalışmalarına devam etmektedir.

**Prof. Dr. Y. Onur Devres**

Istanbul Teknik Üniversitesi  
Gıda Mühendisliği Bölümü  
Maslak-İstanbul

Dr. Devres 1962 yılında İzmir'de doğmuştur. Müdafaa-i Hukuk İlkokulu, İzmir Özel Türk Lisesi'nde ki eğitimlerini takiben 1979 yılında Ege Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazanmıştır. 1982 yılında çıkan YÖK Kanunu ile Fakülte kapatılmış ve yeni kurulan Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden 1983 yılında mezun olmuştur. Yüksek Mühendis ünvanını 1985 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Enerji Anabilim Dalı'nda "Trombe duvarında tek boyutlu, zamana bağlı, homojen olmayan ısı iletimi probleminin integral transform tekniği kullanılarak çözümü" çalışması ile almıştır. Askerliğini takiben 1985 yılında TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Soğutma Teknolojileri Bölümü'nde araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. Yıldız Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Isı Proses Anabilim Dalı'nda 1990 yılında dondurulmuş gıdaların çözündürülmesi üzerine yaptığı çalışma (Dondurulmuş gıdaların çözündürme işlemlerinin modellenmesi ve çözündürme kayıplarının azaltılması) ile doktor ünvanını almıştır. Üniversite dışından başvurusu ile 1992 yılında Makine Mühendisliği, Termodinamik Bilim Dalı, Isı ve Kütle Transferi ve Uygulamaları Bilim Dalı'nda Doçent ünvanını kazanmıştır. TÜBİTAK Gıda ve Soğutma Teknolojileri Bölümü'nde çalıştığı 9 yıl içinde gıda işleme teknolojileri ile soğutma işlemleri ve modellemesi üzerinde çalışmalar yürütmüştür. İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü'ne 1994 yılında katılmış ve 1998 yılında Gıda Mühendisliği, Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı'nda Profesör ünvanını kazanmıştır. Gıda Mühendisliği'ndeki eğitim faaliyetlerine ek olarak İTÜ Bilişim ve Enerji Enstitü'lerinde eğitim faaliyetlerine katılmış, tezler yönetmiştir. Halen Gıda Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

## ABOUT THE AUTHORS

### **Gökhan Bingöl, PhD**

United States Department of Agriculture (USDA)  
Agricultural Research Service  
Western Regional Research Center  
Processed Foods Research  
Albany-California, USA

Dr. Bingöl was born in 1975 in Adiyaman, Turkey. He graduated from Private Tercuman Middle and High School. In 1995, he enrolled to Istanbul Technical University Food Engineering Department's undergraduate program. In 1999 he registered to Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, Food Engineering Program and was awarded with M.Sc. degree in 2001 after completing the thesis titled as "The Use of a Java-Telnet Supported Real Time Application for Interactive Education in Thermodynamics". His PhD dissertation received an award from Istanbul Chamber of Industry in 2007. He was awarded with the title of PhD in 2008 with the dissertation titled "The Effects of Different Pretreatments on Drying Rate and Color Kinetics of Convective and Microwave Assisted Convective Drying of Thompson Seedless Grapes" under supervision of Prof. Dr. Y. Onur Devres in the Food Engineering Department at Istanbul Technical University. Dr. Bingol is currently continuing scientific research in United States Department of Agriculture, Western Regional Research Center in California, USA.

**Y. Onur Devres, PhD**

Istanbul Technical University  
Food Engineering Department  
Maslak-Istanbul

Dr. Devres was born in 1962 in Izmir. Following his education in Müdafaa-i Hukuk primary school and Izmir Özel Türk Highschool, in 1979 he enrolled to Ege University, Faculty of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering department. In 1982, however, new university namely Dokuz Eylul was established by the Turkish Higher Education Council, and the Mechanical Engineering Faculty of the Ege University became the new university's faculty. Following his graduation in 1983, he enrolled to Dokuz Eylul University, School of Science, Mechanical Engineering, Department of Energy and was awarded with MSc degree in 1985 after completing the thesis titled as "Integral transform solution of one dimensional transient nonhomogenous heat conduction problem in the trombe wall". Following his military service, he worked as Research Technologist in the Department of Food and Refrigeration Technology, the Marmara Research Centre (MRC), the Scientific and Technical Research Council of Turkiye (TUBITAK) from 1985 to 1994. During meantime, he enrolled to Yildiz University, School of Science, Mechanical Engineering, Department of Thermodynamics in Istanbul for his PhD study. The title of PhD was awarded in 1990 after successfully completing the dissertation entitled as "Mathematical modelling of thawing processes of frozen foodstuffs and reduction of the thawing losses". The title of Doцент (Associate Professor) was awarded in consideration of post doctoral studies in topics concerning heat and mass transfer and their applications in Mechanical Engineering by the Turkish Higher Education Council (YOK) in October 1992. He joined the Istanbul Technical University, Food Engineering Department in 1994 and the title of Professor was awarded in consideration of studies in Food Technology in Food Engineering in October 1998. In addition to Food Engineering educational activities, he also joined several educational activities with Institute of Informatics and Institute of Energy and supervised several dissertations. Currently, Dr. Devres is member of Food Engineering Department at Istanbul Technical University.





