

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KIZILCIĞIN İNFRARED ISISI İLE KURUTULMASINDA
KÜTLE TRANSFER KATSAYILARININ VE VİTAMİN
KAYIPLARININ İNCELENMESİ

AYŞEGÜL BANI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EYLÜL 2014

Tez Başlığı : Kızılıcığın İnfrared Isısı ile Kurutulmasında Kütle Transfer Katsayılarının ve Vitamin Kayıplarının İncelenmesi

Tezi Hazırlayan : Ayşegül BANI

Sınav Tarihi : 26.09.2014

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hüseyin KARACA
İnönü Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ PAÇACI
İnönü Üniversitesi
(Danışman)

.....

Doç. Dr. Mehmet YÜCEER
İnönü Üniversitesi

.....

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Kızılıcığın İnfrared Isısı ile Kurutulmasında Kütle Transfer Katsayılarının ve Vitamin kayıplarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmamın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ayşegül BANI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KIZILCIĞIN INFRARED ISISI İLE KURUTULMASINDA KÜTLE TRANSFER KATSAYILARININ VE VİTAMİN KAYIPLARININ İNCELENMESİ

Ayşegül Banı

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

90+xii sayfa

2014

Danışman: Prof. Dr. Ayşe Sarımeşeli Paçacı

Bu çalışmada infrared ısısı ile kızılciğın kurutulması prosesinde, infrared çıkış gücünün; örneklerin kuruma zamanı, kuruma hızı ve kinetiği, kütle transfer parametreleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kütle transfer mekanizmasının anlaşılması için modelleme çalışmaları kütle transferine karşı dış direncin ihmal edildiği ve edilmediği durumlar olmak üzere iki ayrı metotla incelenmiştir. Ayrıca C vitamini kayıpları, rehidrasyon kapasitesi ve renk değişimi gibi bazı kalite parametrelerinin infrared gücü ile değişimi araştırılmıştır. Tüm deneysel ve teorik hesaplamalar 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600 W infrared kurutma güçlerinde yapılmıştır. Bu şartlar altında, tüm örneklerin son nem içerikleri %10 (± 1) değerine kadar başarı ile düşürülebilmiş ve kuruma sürelerinin sırasıyla 275, 235, 185, 135, 105, 85, 67 ve 50 dk arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Kuruma hızının infrared gücü ile arttığı tespit edilmiştir. Kurutma prosesi esnasında çok kısa süreli bir ısınma evresinden sonra sabit kuruma evresini takip eden azalan kurutma hızı periyodu kaydedilmiştir. Sabit

evrenin gerçekleştiği aralık infrared gücünün artması ile azalmıştır. Dış direncin ihmal edildiği, başka bir ifadeyle kütle transferine karşı sadece i direncin olduğu varsayımına dayanarak yapılan çalışmalarda etkin difüzivite değerlerinin infrared gücünün artması ile arttığı ve 250-600 W aralığında sırasıyla $9.93 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.98 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.01 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $5.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında değiştiği bulunmuştur. Deneysel sonuçların, literatürde sıklıkla kullanılan 10 farklı model ile kıyaslanarak en düşük χ^2 , RMSE ve en yüksek R^2 değerleri ile $MR = \exp(-kt^n)$ ifadesine göre tanımlanan Page modeline uyduğu bulunmuştur. Öte yandan kütle transferine karşı dış direncin de etkili olabileceğinin düşünüldüğü 2. durum için ise Biot sayısı-kurutma katsayısı (Bi-S) modeli kullanılmıştır. Kütle transferinde direnci tanımlayan önemli bir boyutsuz parametre olan Biot sayısının değerlerine bakıldığında ve kuruma hızında sabit evrenin varlığı dikkate alındığında, kızılıcığın infrared ısısı ile kurutulmasında 250-400 W aralığında sadece dış direncin etkili olduğu, 450-600 W aralığında ise hem i hem de dış direncin geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışmaların yapıldığı aralıkta Biot sayılarının 0.073, 0.078, 0.084, 0.093, 0.102, 0.114, 0.0119, 0.0130, D_{eff} değerlerinin ise $9.59 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.37 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.64 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.13 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.68 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.57 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $4.76 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında değiştiği bulunmuştur. İnfrared gücünün artmasıyla kurutulmuş kızılıcık örneklerinin renk parametrelerinde düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Kızılıcık rneklerinin rehidrasyon kapasitesinin infrared gücünün artması ile arttığı bulunmuştur. Kurutulmuş kızılıcık rneklerinin C vitamini değerlerinin taze örneklerle kıyasla daha düşük olduğu ve infrared gücünün C vitamini kayıpları üzerinde önemli rol oynadığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnfrared kurutma, kuruma kinetiği, kinetik model, etkin nem difüzivitesi, rehidrasyon kapasitesi, renk değerimi, C vitamini, Biot sayısı, ktle transferi

ABSTRACT

MSc Thesis

EXAMINING OF MASS TRANSFER FACTORS AND THE VITAMIN LOSES DURING DRYING OF THE CORNELIAN CHERRY WITH THE INFRARED HEATH

Ayşegül Banı

Inönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Chemical Engineering

90+xii pages

2014

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe Sarımeşeli Paçacı

In this work, during the drying proses of the cornelian cherries, effect of infrared output power on drying time, drying kinetics and mass transfer parameters are examined. In order to understand the mass transfer mechanisms, the modeling studies were carried out using two separate methods for the both cases in which the external resistance against the mass transfer is neglected and not neglected. Furthermore, the variation of some quality parameters such as Vitamin C loses, rehydration capacities and the color changes with infrared power output was investigated. All the experimental and theoretical calculations are carried out at 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600 W infrared powers. Under these conditions, final moisture contents of all the samples were successfully reduced to the value of 10 % (± 1) and it was noted that drying times varied within the range of 275, 235, 185, 135, 105, 85, 67 and 50 minutes respectively. Drying rate increased with increasing infrared power. After a very short period of heating stage, it was recorded that a constant drying rate followed by falling rate period was observed. The range that

constant rate occurred decreased with increasing power output. In the studied based on the assumption that the external resistance against mass transfer is neglected, in other words only the internal resistance was the dominant mechanism, it was found that the effective diffusivities increased with the infrared power output and that their values changed between $9.93 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.98 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.01 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $5.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ respectively. Experimental results were in very good comparison with the Page model defined by $MR = \exp(-kt^n)$ amongst the most widely used 10 different models in literature with the lowest χ^2 , RMSE and the highest R^2 parameters. On the other hand, for the second situation in which the external resistance against the mass transfer is also effective, Biot number-drying coefficient (Bi-S) model was used. Because the Biot number is the most important non-dimensional parameter expressing resistance against the mass transfer and also the existence of constant drying rate period was taken into consideration, within the range of 250-400 W, only the external resistance is dominant, however, for the range of 450-600 W infrared power outputs, both external and internal resistances are available. In the range of the experimental studies were carried out, it was recorded that the Biot numbers had the values of 0.073, 0.078, 0.084, 0.093, 0.102, 0.114, 0.0119, 0.0130, and D_{eff} had the values of $9.59 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.37 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.64 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.13 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.68 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.57 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $4.76 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ respectively. With the increase in the infrared heat, some decrease in the color parameters of dried Cornelian Cherrys samples was observed. It was found that rehydration capacities decreased with the increase of infrared power output. Finally, it was determined that Vitamin C values of dried Cornelian Cherry samples were lower compared to those of the fresh samples, and infrared power output played a very important role on the losses of Vitamin C values.

Key Words: Infrared drying, drying kinetics, kinetic model, effective moisture, rehydration capacity, color change, vitamin C, Biot numbers, transfer of mass.

TEŞEKKÜR

Meslek hayatımın ara kademelerinden biri olan Yüksek Lisans eğitimimin sonuna gelmiş bulunuyorum. Mesleğimin ayrıntılarını öğrenmek ve başarılı adımlar atabilmek için önümde aşmam gereken birçok engel olduğunun farkında olarak;

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, bu çalışmayı birlikte yürüttüğüm için onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli danışman hocam Prof. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ PAÇACI' ya,

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimimi yaptığım Kimya Mühendisliği bölümümüzün tüm saygıdeğer öğretim üyelerine,

Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen annem Zöhre BANI ve babam İsa BANI' ya,

Hayatım boyunca yanımda olan her sıkıntılı anımda destekleriyle bana güç veren sevgili ve kıymetli ablalarım Esra YENİCELİ ve Vildan YANGIRHEP' e,

Bu çalışmamda desteklerini esirgemeyen saygıdeğer eniştem Mansur YANGIRHEP' e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. GIDALARIN KURUTULMASI	8
3.1. Gıdaların Kurutularak Saklanması Tarihçesi	8
3.2. Kurutma Prensibi	8
3.3. Kurutma Yöntemleri ve Kurutucular	9
3.3.1. Doğal kurutma.....	9
3.3.2. Yapay kurutma	10
3.3.2.1. Konveksiyon tipi kurutucular.....	10
3.3.2.2. Kondüksiyon tipi kurutucular	12
3.3.2.3. Radyasyon tip kurutucular	13
3.4. İnfrared Kurutma.....	13
3.4.1. İnfrared ışıınım	13
3.4.2. İnfrared kurutma mekanizması	17
3.4.3. İnfrared kurutmanın avantajları.....	18
3.5. Kurumanın Temel Aşamaları	18
3.6. Difüzyon.....	22
3.7. Katıların Nem İçeriğine Göre Sınıflandırılması.....	22
3.8. Katılarda Nemin Bağlanış Şekilleri	22
3.9. Denge Nemi ve Su Aktivitesi.....	23
3.10. Kuruma Hızını Etkileyen Genel Faktörler	23
3.10.1. Sıcaklık.....	24
3.10.2. Ürünün Boyutu.....	24
3.10.3. Havanın Nemi	24
3.10.4. Ürünün Kimyasal Bileşimi.....	24
3.11. Gıdaların Kurutulmasında Meydana Gelen Değişiklikler	25
3.11.1. Çözünür madde geçişi	25
3.11.2. Kabuk oluşumu	26
3.11.3. Çekme	26
3.11.4. Rehidrasyon kapasitesi.....	26
3.11.5. Renk değişimleri	27
3.11.6. Esmerleşme reaksiyonları	27
3.11.7. Lipid oksidasyonu	28
3.11.8. Vitamin kayıpları	28
3.11.9. Protein kayıpları	29
3.11.10. Mikroorganizmaların inaktivasyonu	30
4. KIZILCIK HAKKINDA GENEL BİLGİ	31
5. MATERYAL VE YÖNTEM	34

5.1. Araştırmada Kullanılan Materyaller	34
5.2. Kullanılan Cihazlar	34
5.2.1. İnfrared Kurutucu.....	34
5.2.2. Renk ölçüm cihazı.....	37
5.2.3. Su banyosu	38
5.3. Deneylerin Yapılışı	39
5.3.1. Materyalin hazırlanması.....	39
5.3.2. Materyalin başlangıç içeriğinin belirlenmesi	39
5.3.3. Kuruma zamanı ve kuruma hızlarının belirlenmesi	39
5.3.4. Renk değişimlerinin belirlenmesi	40
5.3.5. Rehidrasyon kapasitesinin belirlenmesi	40
5.3.6. Kurutulmuş kıızılcık örneklerindeki C vitamini (askorbik asit) miktarlarının belirlenmesi.....	40
5.4. Deneysel Hesaplamalar	41
5.4.1. Nem içeriklerinin hesaplanması	41
5.4.2. Kuruma hızlarının hesaplanması.....	42
5.4.3. Nem oranlarının hesaplanması	42
5.4.4. Rehidrasyon kapasitesinin hesaplanması	42
5.4.5. C Vitamini (Askorbik asit) miktarının belirlenmesi	43
5.5. Teorik Hesaplar	43
5.5.1. Dış direncin ihmal edildiği hal (Difüzyon teorisi)	44
5.5.1.1. Kinetik modeller.....	46
5.5.1.2. Regresyon analizleri.....	49
5.5.2. Dış direncin dahil edildiği hal	50
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	53
6.1. Kuruma Süresi.....	53
6.2. Nem Oranı Değişimi	53
6.3. Kuruma Hızındaki Değişimler	54
6.4. Teorik Hesaplamalar	56
6.4.1. Difüzyon teorisi.....	56
6.4.1.1. Etkin difüzivite katsayıları	56
6.4.1.2. Kinetik modeller.....	58
6.4.2. Bi-S korelasyonu.....	64
6.5. Kıızılcığın Renk Değişimi Üzerine İnfrared Gücün Etkileri	65
6.6. İnfrared Gücünün Kıızılcığın Rehidrasyon Kapasitesi Üzerindeki Etkisi	66
6.7. İnfrared Gücünün Kıızılcık Materyallerinin C vitamini Kayıpları Üzerindeki Etkisi	67
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
EKLER.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kurutma prosesinde eş zamanlı ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi	9
Şekil 3.2. Elektromanyetik Spektrum.	14
Şekil 3.3. Kuruma eğrilerinin temel özellikleri.	19
Şekil 3.4. Ürünün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi.....	19
Şekil 3.5. Kuruma hızının ürün nem içeriğiyle değişimi.	20
Şekil 3.6. Kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi.....	21
Şekil 3.7. Gıdaların kurutulması sırasında meydana gelen C vitamini oksidasyonu.	29
Şekil 4.1. Kızılçık genel görünümü.	31
Şekil 5.1. İnfrared kurutma düzeneği.....	35
Şekil 5.2. İnfrared kurutucunun genel görünümü	36
Şekil 5.3.Konica Minolta CR-400 cihazı genel görünümü.....	37
Şekil 5.4. Nüve NB 9 su banyosu genel görünümü	38
Şekil 6. 1. Kızılçığın farklı infrared çıkış güçlerinde boyutsuz nem oranının kuruma zamanı ile değişimi	54
Şekil 6.2. Kızılçığın farklı kurutma güçlerinde nem içeriği ile kuruma hızının değişimi	55
Şekil 6. 3. Farklı infrared çıkış güçlerinde kızılçık örneğine ait $\ln(MR)$ değerlerinin kuruma zamanı ile değişimi.....	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çeşitli infrared-mikrodalga kombinasyon tekniği kullanım koşullarında ve çeşitli ısıtma türlerinde ısıtma sürelerinin konvansiyonel ısıtmaya göre oranları	16
Çizelge 4.1. Kızılçık meyvesinin kimyasal özellikleri	32
Çizelge 5.1. Konica Minolta CR-400 cihazı teknik özellikleri.....	37
Çizelge 6.1. Kızılçığın farklı infrared güçlerinde hesaplanan etkin difüzivite değerleri	57
Çizelge 6.2. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Page kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	58
Çizelge 6.3. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Logaritmik kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	59
Çizelge 6.4. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Midilli ve ark. kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	59
Çizelge 6.5. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Newton kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	60
Çizelge 6.6. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Wang-Singh kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	60
Çizelge 6.7. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Henderson and Pabis kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	61
Çizelge 6.8. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin İki terimli kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	61
Çizelge 6.9. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılçık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Verma kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	62

Çizelge 6.10. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılcık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Modifiye Page kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.....	62
Çizelge 6.11. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılcık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Difüzyon yaklaşımı kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi.	63
Çizelge 6.12. Bi-S kurutma katsayısı korelasyonuna ait veriler	64
Çizelge 6.13. Kızılcığın kurutulmasında infrared ısıtma gücünün renk değişimi üzerine etkisi.....	65
Çizelge 6.14. Kızılcığın kurutulmasında infrared ısıtma gücünün rehidrasyon kapasitesi üzerine etkisi	66
Çizelge 6.15. Taze ve farklı infrared güçleri ile %10 nem içeriğine kadar kurutulmuş kızılcık örneklerinde C vitamini değişimi	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

m_t	Ölçüm anındaki örneğin ağırlığı
m_d	Örneğin içerdiği kuru madde miktarı
M_t	t anındaki nem içeriği
DR	Kuruma hızı
M_{t+dt}	t+dt anındaki nem içeriği
dt	Zaman aralığı
MR	Nem oranı
M_0	Numunenin başlangıçtaki nem içeriği
M_e	Denge nem miktarı
RK	Rehidrasyon kapasitesi
m_{rehid}	Rehidrasyon sonrası ürünün ağırlığı
D_{eff}	Etkin difüzyon katsayısı
R_1	Materyalin iç yarıçapı
R_2	Materyalin dış yarıçapı
L	Katıda difüzyonun olduğu boyutun yarı kalınlığı
t	Kuruma zamanı
k	Kinetik sabit (Page, Logaritmik, Midilli ve ark., Newton, Henderson and Pabis, Verma, Modifiye Page ve difüzyon yaklaşımı modellerinde kullanılan)
n	Katsayı (Page ve Modifiye Page modellerinde kullanılan)
a	Katsayı (Logaritmik, Midilli ve ark., Wang- Singh, Henderson and Pabis, Verma ve difüzyon yaklaşımı modellerinde kullanılan)
b	Katsayı (Logaritmik ve Midilli ve ark., Wang-Singh ve difüzyon yaklaşımı modellerinde kullanılan)
a_1, a_2	İki terimli modele ait katsayılar
k_0, k_1	Kinetik sabit (İki terimli modele ait)
RMSE	Tahminin standart hatası
χ^2	Ki-kare
R^2	Belirleme katsayısı
MR_{den}	Deneysel nem oranı değeri
MR_{tah}	Tahmin edilen nem oranı değeri

N	Deneysel veri sayısı
P	Parametre sayısı (Page, Logaritmik, Midilli ve ark. ve Newton modellerinde kullanılan)
Bi	Biot sayısı
G	Lag faktörü
S	Kuruma katsayısı
a	Katsayı (Bi sayısı- kuruma katsayısı korelasyonunda kullanılan)
b	Katsayı (Bi sayısı- kuruma katsayısı korelasyonunda kullanılan)
Y	Yarıçap
L	Parlaklık (Renk ölçüm cihazında okunan parametreler)
a	(+) kırmızılık, (-) yeşillik
b	Sarılık

1. GİRİŞ

Kurutma, bir katı içinde bulunan sıvının uzaklaştırılmasıdır. Teknik kurutmada, kuruma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem değişik metotlarla alınır. Bu nedenle kurutma, kuruyacak katının neminin istenilen kuruluk değerlerine belli bir süreçte indirgenmesi olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün arzu edilen kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) ünitelerin bütününe de kurutma sistemi denir. Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin bir çok dalında (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak uygulanmaktadır [1].

Gıda maddeleri, biyolojik, kimyasal ve fiziksel etmenler gibi çeşitli sebeplerden dolayı bozulabilmektedir. Bozulmaya sebep olan etmenleri ortadan kaldırmaya yönelik olarak kurutma, ısıtma işlemi, fermantasyon, tuzlama, dumanlama, konserveleme, dondurma, soğukta muhafaza, kimyasal maddelerle muamele gibi çeşitli gıda muhafaza yöntemleri geliştirilmiştir [1]. Tarımsal ürünlerin tüketilme anına kadar geçen süre içerisinde besleyici özelliklerini kaybetmeden ekonomik ömürlerinin uzatılmasına yönelik olan bu işlemlerin başında kurutma gelmektedir.

Günümüzde pek çok alanda kurutma kaçınılmaz olarak yapılması gerekli bir uygulama olarak karşımıza çıkar. Bazı katılar bünyelerinde barındırdıkları nem miktarlarının belirli seviyelere indirilmesinden sonra satılabilir. Bazı katılar ise saklanma kolaylığı ve nakli esnasında soğutucu ekipmanlara gerek duyulmaması için kurutulurlar.

Kurutmanın yararları:

- Kurutma ile ürün içinde bulunan su, ürünün bozulmasına imkân vermeyecek bir düzeye kadar azaltıldığı için kesin bir muhafaza imkanı oluşmaktadır.
- Gıda hacmi küçülür, ağırlık azalır. Buna bağlı olarak ambalaj maliyeti azalır, taşınması kolay olur.
- Kuru gıdalar, konserve gıdalara göre daha az maliyetlidir.
- Kurutulmuş gıdalar, diğer yöntemlerle muhafaza edilenlerden farklı olarak, besin öğeleri açısından yoğunlaştırılmış nitelik kazanmaktadır [2].

Ülkelerin tarımsal kalkınması ve ekonomisinde önemli yer tutan kuru ve kurutulacak gıdaların, dünya pazarlarındaki yeri de oldukça önemlidir. Buna göre mevcut pazarların elde tutulması ve ayrıca yeni pazarlar elde edilebilmesi için; kaliteli, homojen ve hijyenik koşullarda kurutma sektörünün geliştirilmesine gerekli önem ve önceliğin verilmesi gerekir [2].

Kurutma, karmaşık yapısıyla birçok bilim insanının uzun yıllardır ilgisini çekmiş ve hala da çekmeye devam etmektedir. Kurutma işleminde uzun yıllardan beri süregelen temel araştırma alanı kurutma havası koşulları, kurutucu tipleri, enerji maliyeti ve kuru madde kalitesini etkileyen parametrelerin belirlenmesi olmuştur [3].

Bu çalışmada, kızılciğin infrared ısısı ile kurutulmasında kütle transfer katsayılarının, vitamin kayıplarının ve bazı kalite parametrelerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 2’de literatürde bulunan gıdaların kurutulması ile ilgili bazı çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3’de gıdaların kurutularak saklanması tarihçesi, kurutma prensibi, kurutma yöntemleri ve kurutucular, infrared kurutma, kurumanın temel aşamaları, difüzyon, katıların sınıflandırılması, katılarda nemin bağlanış şekilleri, denge nemi ve su aktivitesi, kuruma hızını etkileyen genel faktörler ve gıdaların kurutulması sırasında meydana gelen değişiklikler hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’de kızılciğ hakkında genel bilgi verilmiştir. Bölüm 5’ de araştırmada kullanılan materyaller, kurutma ve deneyler için kullanılan cihazlar, deneylerin yapılışı ve hesaplamalar anlatılmıştır. Bölüm 6’da araştırma bulgularına yer verilmiştir. Bölüm 7’ de ise deneysel çalışmalardan bulunan sonuçlar ve bu sonuçlara bağlı olarak öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, farklı kurutma teknikleri, kurutucular ve infrared kurutma ile kurutulan bazı gıdalar ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Dikbasan [4], 2000 yılında yapmış olduğu çalışmada küp şeklinde kesilmiş elma örneklerini bir tünel kurutucuda çeşitli sıcaklıklarda (40.1-65.3 °C) farklı hava hızları (1.1-2.5 m/s) ve farklı bağıl nem değerlerinde (%4.6-20.5) kurutmuştur. Araştırmacı deneysel verilerini literatürde bulunan on dört farklı kurutuma modeline uydurmuş ve verilere en uygun modelin Midilli ve Küçük tarafından geliştirilen model olduğunu belirlemiştir. Kurutma hızının, kurutma hız eğrilerine göre azalan kuruma hızı periyodunda gerçekleştiğini belirtmiştir. Etkin difüzivite katsayılarının 0.486×10^{-9} - 5.630×10^{-9} m²/s arasında değiştiğini bulmuştur. Renk parametreleri, kuruma zamanı ve rehidrasyon süresi bakımından kurutmanın en iyi 53.5-65.3 °C sıcaklık aralığında ve %20.5 bağıl nem ve 2.5 m/s hava hızında gerçekleştiğini belirtmiştir.

Dincer ve ark. [5], 2002 yılında yeni bir Biot sayısı- kuruma katsayısı korelasyonu (Bi-S) geliştirmek için çalışma yapmışlardır. Geliştirdikleri korelasyonu katıların kuruma prosesi ile ilgili nem transfer katsayısı ve nem transfer parametrelerini tanımlamak için kullanmışlardır. Bu korelasyonun geliştirilmesinde literatürde bulunan çeşitli kaynaklardan alınan çok sayıda deneysel veriler kullanmışlardır.

Akosman ve Kalender [6], 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada soya fasülyesini laboratuvar tipi bir tepsili kurutucu kullanarak 30-50 °C değişik sıcaklıklarda ve farklı hava hızlarında (0.5, 1.0 ve 1.5 m/s) kurutmuşlardır. Tüm örnekler için kuruma hızının, sıcaklık ve hava akış hızı ile arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda katı neminin denge nemine çok kısa sürede ulaştığını gözlemlemişlerdir.

Mrkic ve ark. [7], 2005 yılında yapmış oldukları çalışmada brokolinin kurumasında nem transfer parametrelerini tanımlamak için yeni bir Biot-Dinçer sayısı geliştirmişlerdir. Brokoli çiçeklerini tek tabakalı bir kurutucuda değişen hava hızları ve sıcaklıklarında kurutmuşlardır. Deneysel boyutsuz nem içeriği verilerini lag faktörü ve kurutma katsayıları yardımıyla hesaplamışlardır. Biot sayısı, etkin nem difüzivitesi ve kütle transfer katsayılarının sırasıyla 0.227-0.303, 3.578×10^{-6} -

$16.667 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ve 1.922×10^{-4} - $8.726 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ değerleri arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Yeni geliştirdikleri eşitlikle farklı literatür değerlerinden kuruma katsayıları ve lag faktörlerini birleştirerek etkin nem difüzivite değerlerini hesaplamışlardır. Deneysel ve tahmini nem iğeriği değerlerinin tüm kurutma şartlarında $\pm 1.26\%$ - $\pm 5.57\%$ arasında değişen hatalarla mükemmel bir uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Doymaz [8], 2005 yılında yaptığı ęalıřmada domatesin 55, 60, 65 ve 70 °C sıcaklıklarda ve 1.5 m/s hava akış hızında domatesin kuruma karakterleri incelemiştir. Kurutmadan önce domatesleri alkalın etil oleat (2% ethyl oleate + 4% potassium carbonate) solüsyonuna batırmasıyla ön işlemin kuruma prosesine etkisini araştırmıştır. Aynı zamanda ham domatesin de kurumasını kontrol altına almıştır. Deney sırasında domatesler %94.5 dan %11 (kuru baz) son nem iğeriğine kadar kurutulmuştur. Ön işlem ve hava sıcaklığının etkisinin kurutma hızının seyrini etkilediğini bulmuştur. Hava sıcaklığı 55 °C' den 70 °C' ye arttığında domateslerin kuruma hızının arttığını görmüştür. Deneysel verilerin, Henderson Pabis ve Page kuruma modellerine uyduğunu bulmuştur. Page modelinin domateslerin kuruma eğrisini en iyi tanımlayan model olduğunu belirtmiştir. Her bir sıcaklıkta etkin difüzivite ve nem transferini tanımlamak için bir difüzyon modeli belirlemiştir. Ön işlemlili ve ön işlemsiz etkin difüzivite değerlerini sırasıyla, $5.65\text{-}7.53 \times 10^{-10}$ ve $3.91\text{-}6.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulmuştur. Difüzyon katsayısının sıcaklığa bağımlılığını Arrhenius tipi bir bağıntı ile tanımlamıştır. Domatesin aktivasyon enerjisinin 17.40 - 32.94 kJ/mol arasında değiştiğini tespit etmiştir.

Soysal ve arkadaşları [9], 2006 yılında yapmış oldukları ęalıřmada maydanoz yapraklarını 900 W 2450 MHz mikrodalga ıkış gücünde kurutmuş, örnek miktarının kuruma zamanı, kuruma oranı, kurutma verimi ve enerji tüketimi üzerine etkisini değerlendirmişlerdir. Mikrodalga kurutma deneyinde farklı örnek kütlelerinde (64.30-128.57 g) 900 W ıkış gücünde tutulmuştur. Kuruma, sabit periyot ve azalan periyotta yer almıştır. Maydanoz yapraklarının kuruma oranlarının uyarlandığı 11 matematiksel model arasında Midilli ve ark. modeli en iyi veri noktalarını vermiştir. Kuruma katsayısı değeri olan k, örnek miktarının artmasıyla düşmüştür. Örnek miktarının artması ile enerji tüketiminde önemli bir düşüş, kurutma veriminde ise önemli bir artışın meydana geldiği bulunmuştur. Örnek miktarının 64.30 g' dan 128.57 g' a arttırılması ile kurutma veriminin % 9.5 civarında arttığı bununla birlikte enerji tüketiminin yaklaşık olarak % 18 oranında azaldığını belirlemişlerdir.

Toğrul ve Toğrul [10], 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada doğal şartlar altında meyvelerin kuruma davranışını tanımlamak amacıyla, kayısı, üzüm, şeftali, erik ve incir üzerinde açık hava deneyleri yapmışlardır. Bu meyvelerin kuruma eğrilerinin sabit hız periyodunu göstermediğini, azalan hız periyodu gösterdiğini belirtmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada seçilen meyvelerin Biot sayıları ve kütle transfer katsayılarını – nem difüzivitesi ve nem transfer katsayısı – lag faktörü (G) ve kuruma katsayısı (S) ile değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçların Biot sayısının 0.115-0.158 değerleri arasında değiştiğini ve kütle transferine karşı iç ve dış direncin varlığına işaret ettiğini belirtmişlerdir.

Dadalı ve arkadaşlarının [11], 2007 yılındaki yapmış oldukları çalışmada mikrodalga kurutma tekniğinin ıspanağın gözenekliliğine, kuruma hızına, kuruma zamanına ve etkin nem difüzivitesine etkisini araştırmışlardır. Mikrodalga çıkış güçlerinin artmasıyla (180-900 W) kuruma zamanın 18 dk' dan 3.5 dk' ya düştüğünü, numune miktarlarının 25 g' dan 100 g' a çıkarılması ile kuruma zamanının 7.7 dk' dan 25 dk' ya arttığı bulunmuştur. Kuruma hızı sabiti olan k değerinin, mikrodalga çıkış gücünün artmasıyla arttığı diğer taraftan numune kütlesinin artması ile düştüğü belirlenmiştir. 25 g sabit numune kütlesi için etkin nem difüzivitesi değerinin $1.99 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ' den $5.27 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ değerine arttığı diğer taraftan numune kütlesinin 25 g' dan 100 g' a arttırılması ile de etkin nem difüzivitesi değerinin 2.58×10^{-10} dan $7.61 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ değerine düştüğü bulunmuştur. Gözeneklilik çalışmalarında ise mikrodalga çıkış gücünün arttırılması veya numune kütlesinin azaltılması ile ürün içindeki buhar basıncının artmasıyla ıspanak yapraklarındaki gözenek sayısının arttığı belirlenmiştir.

Karaaslan ve Tuncer [12], 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada kırmızıbiberi fan destekli konveksiyonel fırın kombinasyonunda kurutmuşlardır. Kırmızı biberin kuruma zamanı, kuruma oranı değerleri üzerindeki mikrodalga, mikrodalga ve sıcak hava kombinasyonu sadece sıcak havayla kurutmanın etkilerini araştırmışlardır. Mikrodalga enerjisi ile yaptıkları kurutma denemelerinde 5 farklı güç seviyesi (180, 360, 540, 720, 900 W), sıcak hava kurutma denemelerinde 3 farklı sıcaklık (100, 180, 230 °C), mikrodalga ve sıcak hava kombinasyonunda ise 6 farklı güç seviyesi- sıcaklık değerleri (180W+100 °C, 180W+180 °C, 180W+230 °C, 540W+100 °C, 540W+180 °C, 540W+230 °C) kullanmışlardır. Örneklerin kuruma süresinin belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek için kullandıkları Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Pabis, Logaritmik, Wang ve Singh, Difüzyon

yaklaşımı, Verma, İki Terimli Exponansiyel, Basitleştirilmiş Fick Difüzyonu, Midilli ve ark. modelleri arasından Midilli ve ark.'nın ileri sürdüğü modelin ürünlerin kuruma davranışını daha iyi açıkladığını belirtmişlerdir.

Kocabıyık ve Tezer [13], 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada bir infrared kurutucuda havuç dilimlerini başlangıç nem içeriğinden (8.52 kg su/kg kuru madde), 0.11 kg su/kg kuru madde nem içeriğine kadar kurutmuşlardır. Kurutma işlemini çeşitli infrared güçleri (300-500 W) ve çeşitli hava hızlarında (1.0-2.0 m/s) gerçekleştirmişlerdir. Kuruma zamanını sırasıyla 252-277 dk, 205-236 dk, 145-155 dk arasında değiştiğini buna bağlı olarak kuruma hızının infrared gücünün artması ile kısaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca kurutma şartları ile rehidrasyon oranı ve renk parametrelerinin değiştiğini saptamışlardır.

Dadalı ve Özbek [14], 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada mikrodalga kurutma tekniği ile ıspanak ve bamya örneklerinde mikrodalga çıkış gücünün C vitamini kaybı üzerine etkisini incelemişlerdir. 2,6 dikoloroindofenol ile askorbik asit (C vitamini) arasındaki reaksiyon temel alınan bir yöntem izlenmiştir. Önerilen yöntem bamya ve ıspanak örneklerine uygulanmış ve örneklerin C vitamini içeriği belirlenmiştir. Mikrodalga çıkış gücünün artması veya örnek kütlesinin azalması ile C vitamininin bamya ve ıspanak için düştüğünü belirlemişlerdir.

Demirhan ve Özbek [15], 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada mikrodalga kurutmanın semizotu yaprakları kullanarak nem içeriğine, nem oranına, kuruma zamanına ve etkin difüziviteye etkisini araştırmışlardır. Mikrodalga çıkış gücünün artması ile (180-900 W) kuruma zamanı 45 dk' dan 12.5 dk' ya düşmüş, numune miktarının artması ile (25-100 g) kuruma zamanı 27 dk' dan, 54 dk' ya çıkmıştır. Mikrodalga çıkış gücünün artması ve numune miktarlarının azalması ile etkin nem difüzivitesi değerlerinin sırasıyla, 5.913×10^{-11} - 1.872×10^{-10} m²/s ve 9.889×10^{-11} - 3.292×10^{-11} m²/s arasında değiştiğini bulmuşlardır.

Darıcı ve Şen [16], 2011 yılında yaptıkları çalışmada 4 mm ve 6 mm kalınlığında kesilmiş kivi örneklerine 60 °C sıcaklığında kurutma havasında ve %10 bağıl neminde 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 m/s hızlarında değişen kurutma havası hızının kurumaya etkisini incelemişlerdir. Kurutma havası hızı 0.5 m/s' den 1.0 m/s' ye yükseltildiğinde kuruma süresi yaklaşık olarak yarı yarıya azalırken, kuruma hızının arttığını belirlemişlerdir. Kurutma havası hızının 1.0 m/s ye kadar olan değerlerinde kuruma süresinin artan hız ile azaldığı, 1.0 m/s' den daha büyük değerlerinde ise,

kuruma süresinde önemli bir değişimin olmadığını belirlemiş, bu nedenle yüksek hızlarda kurutma yapmanın ekonomik olmadığını söylemişlerdir.

Tripalo ve Jurendic [17], 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada, bir tünel kurutucu içinde tahıl bazlı üç farklı bebek maması karışımının kütle transfer katsayılarını Biot sayısı-lag faktörü (Bi-G) korelasyonunu kullanarak elde etmişlerdir. Tünel kurutma esnasında üç karışım için üç farklı hava hızları (0.5, 1.0 ve 1.5 m/s) ve hava sıcaklıklarında (60, 80 ve 100 °C) deneysel nem içeriği değerleri kaydedilmiştir. Etkin nem difüzyon katsayılarının 1.51×10^{-8} – 53.1×10^{-8} m²/s arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Sarımışeli [18], 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada bir mikrodalga kurutucuda 180-900 W arasında değişen mikrodalga çıkış güçlerinde kişniş yapraklarını kurutmuştur. Etkin nem difüzyonlarının 6.300×10^{-11} - 2.190×10^{-10} m²/s arasında değiştiğini bulmuştur. Deneysel verilere Midilli ve Küçük modelinin uygun olduğunu tespit etmiştir. Kurutulan yaprakların renk parametrelerinin mikrodalga çıkış gücünden pek fazla etkilenmediğini bulmuştur. Ayrıca kurutulan örneklerin rehidrasyon kapasitesinin en yüksek olduğu mikrodalga çıkış gücünün 180 W olduğunu belirtmiştir.

Onin [19], 2012 yılında yapmış olduğu çalışmada infrared ısıtma gücünün maydanoz, çilek, kırmızı biber ve yeşil biber örneklerinin kuruma karakteristikleri ve kuru ürünlerin kalite parametreleri üzerine etkisini incelemiştir. 300,400 ve 500 W infrared kurutma güçlerinde yapılan ön işlemsiz maydanoz, çilek, kırmızı biber ve yeşil biber örneklerinin kuruma sürelerinin sırasıyla 14-33 dk, 78-165 dk, 66-110 dk ve 61-118 dk arasında değiştiğini ve etkin difüzyonlarının sırasıyla 3.126×10^{-11} - 1.524×10^{-11} m²/s, 6.389×10^{-10} - 2.738×10^{-10} m²/s, 14.605×10^{-10} - 8.10×10^{-10} m²/s ve 12.424×10^{-10} - 6.212×10^{-10} m²/s arasında değiştiğini bulmuştur. Ön işlemsiz örneklerin kuruma süreleri ve etkin difüzyonunun infrared gücünün artmasıyla arttığını, ön işlemlili örneklerde ise kuruma sürelerinde herhangi bir değişiklik olmadığını belirtmiştir. Yapmış olduğu kurutma deneylerinde sabit hızda kuruma periyodu ve bunu takiben azalan hızda kuruma periyodu gözlemlemiştir. Rehidrasyon kapasitesinin infrared gücü ile arttığını belirlemiştir. Ön işlemsiz kuru örneklerin C vitamini değerlerinin taze örneklerin değerlerinden daha düşük olduğu ve infrared gücünün C vitamini kayıpları üzerinde önemli rol oynadığını saptamıştır.

3. GIDALARIN KURUTULMASI

3.1. Gıdaların Kurutularak Saklanması Tarihçesi

Gıdaların içerisinde bulunan nemin uzaklaştırılması kurutma olarak tanımlanır.

Milattan önceki yıllarda pek çok gıdanın kurutulduğu bilinmektedir. Yapılan kazılarda kümbetler içerisinde kurutulmuş buğdaylara rastlanılmıştır. Bunun yanı sıra Çinlilerin de eskilerden beri çay yapraklarını kuruttukları bilinmektedir. 15. ve 16. yy larda ise pek çok denizci uzun seyahatlere çıktıklarında yiyeceklerini kurutmuşlar ve böylece hem gıdalarını uzun süre saklayabilmişler hem de hastalıklardan korunabilmişlerdir [20].

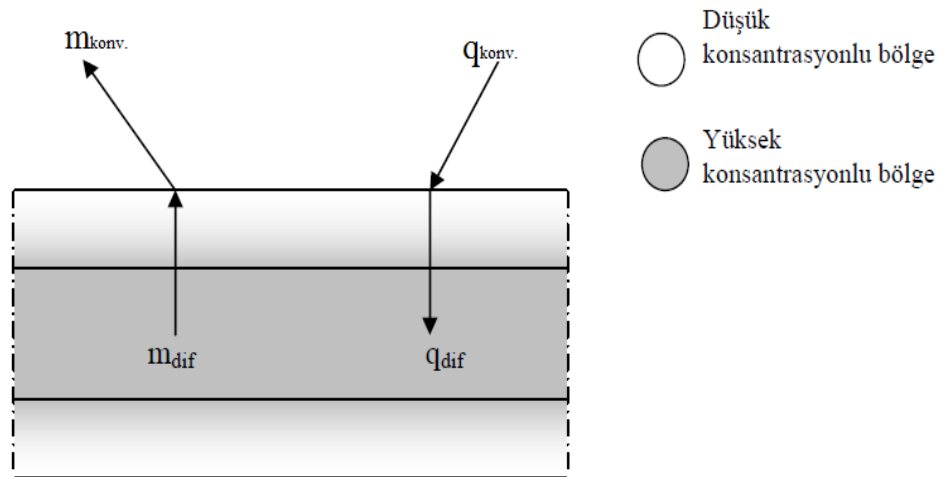
17. yy da ise savaş nedeniyle gıdaların uzun süre saklanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Fransızlar bu dönemde ilk fırın üretimini gerçekleştirerek kurutmanın endüstriyel alanda kullanılmasına olanak sağlayacak ilk adımı atmışlardır [20].

Savaşların devam etmesine bağlı olarak 18. yy'da da gıda saklama ihtiyacı devam etmiştir. Bununla birlikte kurutmacılık büyük bir gelişme göstermiştir. Örneğin, 1854-1856 yıllarında yapılan Crimea savaşında ülkelerinden süvarilere gönderilen kurutulmuş sebzeler ile süvariler beslenme ihtiyaçlarını karşılamışlardır. 1800'lü yılların sonları ve 1900'lü yılların başlarında ABD kurutma sanayinde çok büyük ilerlemeler kaydederek yapay kurutucular kullanmaya başlamıştır. Kurutma sistemlerinin gelişmesinde askeri amaçlı kullanımın etkisinin büyük olduğu görülmektedir [21].

3.2. Kurutma Prensipleri

Kurutma, eş zamanlı olarak gerçekleşen ısı transferi ve kütle transferi sayesinde suyun katılardan uzaklaşması prosesidir. Şekil 3.1' de kurutma prosesinde meydana gelen ısı ve kütle transferi gösterilmiştir. Kurutma havasından kurutulan ürün yüzeyine taşınım ile ısı transferi gerçekleşirken (q_{konv}), ürünün iç kısmına ise difüzyonla ısı transferi (q_{dif}) gerçekleşir. Nem transferi ise, ısı transferinin tam tersi bir yol izler. Nem iç kısımdan ürün yüzeyine difüzyonla (m_{dif}), ürün yüzeyinden

kurutma havasına taşınım (m_{konv}) transfer olur. Nem, ürün merkezinden yüzeye doğru ya sıvı difüzyonu ya da kılcal kuvvetlerin etkisiyle hareket eder. Genel olarak kılcal kuvvetlerin etkisi gözenekli maddelerde, sıvı difüzyonu ise gözenekli olmayan maddelerde meydana gelir [3].



Şekil 3.1. Kurutma prosesinde eş zamanlı ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi

3.3. Kurutma Yöntemleri ve Kurutucular

Kurutma yöntemleri genel olarak doğal ve yapay kurutma şeklinde ikiye ayrılır.

3.3.1. Doğal kurutma

Güneş enerjisinden yararlanılarak ürünün yapısındaki su oranının azaltılması için uygulanan yöntemdir [22]. Ancak her ürünün güneşte kurutulma olanağı yoktur ve bazı ürünlerde bu yöntemin uygulanması doğru da değildir. Gıda son ürün kalitesi açısından incelendiğinde; kurutulan ürünün açık alanda tozlanması, böcek, kuş ve benzeri çeşitli hayvanların gıdaya verecekleri zararlar, önemli dezavantajlardır. Gıdaların doğal kurutulması için geniş alanlara gereksinim vardır. Kurutma işlemi çok yavaş gerçekleştiğinden kuruma süresi uzundur. Genellikle %15 su oranından

daha aşağıya inilemez. Bu olumsuz yönleriyle doğal kurutma birçok gıda için uygun ve yeterli bir yöntem değildir [20].

3.3.2. Yapay kurutma

Kurutma işleminin kapalı alanlarda ve kontrollü koşullar altında yapılmasına yapay kurutma denir [22].

Ülkemizde katıların büyük bir kısmı doğal kurutma işlemiyle kurutulmaktadır. Doğal kurutma işlemleriyle kurutulan bu katılarda ekonomik açıdan i  ve dış pazarda kalite ve değer kaybı gibi sorunlarla karşılaşılmaktadır. Aynı zamanda açık hava koşullarında yapılan doğal kurutma işlemleri sonucu kuru katının elde edilmesinde uzun s relere gereksinim vardır [12].

Bu nedenle kurutma işleminin özel amaçlı yapay kurutucular ile yapılması, hem kuruma süresini kısaltmakta, hem de uzun raf ömrüne sahip daha kaliteli ve temiz ürün elde edilmesini sağlamaktadır [16].

Yapay kurutucular, kurutma prosesi için gerekli olan ısıyı ortama sağlama şekline göre; kondüksiyon, konvektif ve radyasyonlu kurutma yöntemleri olmak üzere   e ayrılır.

3.3.2.1. Konveksiyon tipi kurutucular

Bu tip kurutucularda gerekli olan ısı hava veya gaz aracılığıyla ürün üzerine taşınarak gerekli kurutma sağlanır. Zaman zaman direkt tip kurutucular olarak da isimlendirilebilir.    n  buharlaşmayı sağlayan akışkan genellikle hava veya sıcak gazlar, kurutulacak malzeme üzerine doğrudan çarptırılır veya temas ettirilir ve buharlaşan nem ortamdan bu hava veya gaz akımı yoluyla uzaklaştırılır [23]. Bu tip kurutucular;

— Kabin tipi kurutucular veya tepsili kurutucular: Sürekli veya yarı sürekli olarak çalıştırılan tünel kurutucu modifiye edilmiş kompartıman kurutucudur.

Kurutma ortamı olarak kullanılan sıcak hava yanma gazları fan yardımı ile sistemde dolaştırılır. Gıdalar raf veya bantlar üzerinde kurutulur. Hava akımı, gıda ile paralel, zıt akışlı veya her ikisinin birlikte uygulaması olarak sistemden geçirilir.

Kurutucuda havanın tekrar ısıtılması veya tekrar dolanım ile sistemden çıkmadan önce daha fazla nem alması sağlanabilir.

Tünel kurutucularda değişik hava hız ve yönü, sıcaklık, nem uygulamaları mümkündür. Giriş ve çıkışta sıcak hava kayıplarını önlemek için gereken tedbirler alınmalıdır [24].

— Bantlı kurutucular: Bantlı kurutucularda gıda maddesi delikli veya düz bir bant üzerine yayılır. Bandın üzerinden veya arasından sıcak hava geçer. Bant çoğunlukla hareketlidir. Ancak bazı tiplerde sabit olabilir ve bunlarda bant üzerindeki gıda maddesi hareketli kazıyıcılar tarafından taşınır [25].

— 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 [26].

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 L akışkan, 12 milyar parçacık halinde püskürtülerek, yaklaşık 30 m² yüzey alanında kurutma işlemi gerçekleşir. Püskürtme 100 mikronluk ortalama parçacık boyutunda yapıldığında 1 kg'lık üründe yaklaşık 3000 m², 20 mikron boyutunda ise yaklaşık 15000 m² 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 topaklardan oluşabilir. Bu ayırım beslemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, kurutucu tasarımı ve çalışma koşullarına bağlı olarak gerçekleşebilir [26].

— Tünel kurutucular: Bu tip kurutucular, bantlı kurutuculara benzerdir, fakat burada kurutulacak malzeme bir taşıyıcı üzerine istiflenir ve kurutma tüneli boyunca hareket ettirilir. Bir araba üzerinde malzeme kuruduğunda kurutucudan itilmek suretiyle dışarıya alınır [23].

— Döner kurutucular: Bu tip kurutucular silindirik metal bir gövdeye sahiptir. Bir motorla hareket ettirilen silindirik gövde, yatayla belli bir açı yapacak şekilde kendi eksenini etrafında döner. Kurutulacak olan ürün kurutucunun yüksekte olan ucundan kurutucuya verilir. Kurutucunun dönme hareketinden dolayı ürün yavaş yavaş kurutucunun alçakta olan ucuna doğru ilerler ve buradan kurumuş ürün

dışarıya alınır. Bu kurutucularda ısıtma, kurutucu içerisinde dolaşan sıcak hava ile yapılmaktadır. Kurutulacak ürünün kurutucu içerisinde ilerlemesini, karışmasını ve sıcak hava ile iyi bir şekilde temasa geçmesini silindirik gövdenin iç yüzeyinde bulunan raf kanatlar sağlamaktadır [19].

— Sprey kurutucular: Kurutulacak olan sıvı veya karışım sıcak gazların dolaştığı bir oda içerisine atomize edilerek sıcak hava ile teması sağlanır [23].

— Hava süpürmeli döner değirmenler: Kurutulacak ürün değirmenler sayesinde pulverize edilerek sıcak hava temasıyla kurutma sağlanır [23].

— Pnömatik veya flaş tipi kurutucular: Kurutma havası bir ısıtıcıda ısıtıldıktan sonra kurutucu tabanından kurutucuya girerek pnömatik etkisiyle ürünün kurutularak dışarı atılmasını sağlar [23].

— Akışkan yataklı kurutucular: Akışkan yataklı kurutucuda kurutulacak gıda maddesi aşağıdan yukarı doğru çıkan sıcak hava akımı içerisinde, ağırlığı karşılanarak asılı bir şekilde duracak şekilde tutulur. Gıda maddesini kurutucu boyunca taşımak için yatay bir hava akımı da bulunabilir [25].

3.3.2.2. Kondüksiyon tipi kurutucular

Kondüksiyon (Isı İletimi) : Kurutulacak olan cismin ısı üreten ısı kaynağına temas edilerek ürün bünyesindeki nemin buharlaştırılması için gerekli ısı ürüne taşınarak kurutma sağlanır [23]. Bunlar;

— Silindir kurutucular: Silindir kurutucularda kıvamlı yapıya sahip gıda maddesi iç kısımdan ısıtılan ve yavaş dönen metal bir silindirin bir kısım yüzeyi üzerine yayılır. Silindir belirli hızla döner ve dönüş süresinin çoğu kısmında gıda maddesi silindirin yüzeyinde kalır. Bu süre içerisinde kurutma tamamlanır ve kurumuş ürün kurutucunun özel kazıyıcısı ile kazınarak silindir üzerinden alınır [25].

— Vakum kurutucular: Ürün dış atmosfere kapalı sızdırmazlığı sağlanmış bir kabin içerisine konularak vakum pompaları aracılığıyla ürün bünyesindeki su buharı alınmaktadır [23].

— Dondurarak kurutma: Dondurarak kurutucularda kurutulacak gıda maddesi yüksek vakum altındaki bir bölmede bulunan raflara yerleştirilir. Gıda maddesi kurutucuya yerleştirilmeden önce çoğunlukla donmuş durumdadır. Gıda maddesine ısı iletimi kondüksiyon yoluyla veya radyasyon yoluyla olur. Dondurarak

kurutucularda yalnızca 0.1 mm - 2.0 mm arasında basınç bulunur. Gıda maddesinden süblimasyonla oluşan buhar vakum pompası ile uzaklaştırılır ve yoğunlaştırılır. "Hızlandırılmış dondurarak kurutma" olarak bilinen işlemde ise gıda maddesine ısı kondüksiyon yolu ile verilir. Bu işlemde ısı iletimini ve oluşan su buharının uzaklaştırılmasını hızlandırmak için gıda maddesi ile ısıtılmış plakalar arasına ince metal levhalar yerleştirilir. İyi bir ısı iletimi sağlayabilmek için gıda maddesi bu levhalarla ve ısıtılmış plakalarla mümkün olduğu kadar geniş bir yüzeyle temas edecek şekilde yerleştirilmelidir. Gıda maddesinden süblimasyonla meydana gelen buharların yoğunlaştırılması için soğutucu kullanılabilir [24].

3.3.2.3. Radyasyon tip kurutucular

Kurutulacak olan ürünün bünyesindeki nemin atılması için gerekli olan ısı elektromanyetik radyasyon tarafından, termal radyasyonlu kurutma sistemlerinde ise infrared lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar ve elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanarak kurutma gerçekleştirilir. Radyasyon yöntemi ile birim yüzeye transfer edilen ısı yükü konveksiyon yöntemi ile yapılan ısı transfer yükünden fazladır. Bu tür kurutucularda ürün yükleme ve alma yöntemleri yapısal olarak konveksiyon ve temas tip kurutuculara benzemektedir [23].

3.4. İnfrared Kurutma

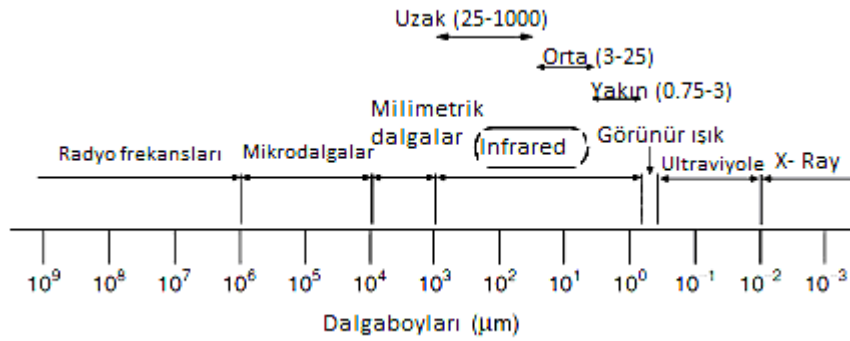
3.4.1. İnfrared ışıınım

Evrende bulunan bütün maddeler moleküllerden moleküller ise atomlardan oluşmaktadır. Atomların merkezinde bir çekirdek bulunur ve bu çekirdeğin yörüngesinde dönen farklı sayılarda elektronlar mevcuttur. Kararlı durumda bir atomda bulunan bu elektronlar düzenli olarak döner. Fakat çeşitli dış etkilere dolayısıyla bu düzen bozulduğu zaman elektron üst yörüngeye çıkar ve doğasını korumak için tekrar eski seviyesine iner. Bu iki enerji seviyesinin arasındaki fark kadar bir enerji açığa çıkar ve böylece bir foton enerjisi oluşur. Bu foton elektromanyetik

spektrumda bulunan ışımalardan birisidir. Atomun özelliğine göre bu foton bir dalga boyuna ve bir ışıma enerjisine sahiptir. Bu ışıyan foton 0.75-1000 mikrometre aralığında bulunan bir dalga boyuna sahip ise infraredi temsil eder. Kızılötesi ışınlar olarak da bilinir [19].

İnfrared (kızılötesi) ışıınım, dalga boyu görünür ışıktan uzun ve mikrodalgalarından daha kısa olan elektromanyetik ışıınımdır. Teknolojide kabul edilen ismi olan infrared Latince’ de aşağı anlamına gelen infra ve İngilizce kırmızı anlamına gelen red kelimelerinden oluşmaktadır ve kırmızı altı anlamına gelir [27].

Şekil 3.2’de verilen elektromanyetik spektrumda gösterildiği gibi infrared ışıınım yakın (0.75–3 μm), orta (3–25 μm) ve uzak (25–1000 μm) infrared olarak sınıflandırılmıştır [28].



Şekil 3.2. Elektromanyetik Spektrum [27].

Elektromanyetik spektrum uzun dalga boyundan (düşük frekans, düşük enerjili radyo dalgaları) kısa dalga boyuna (yüksek frekans, yüksek enerjili gama ışınları) uzanan bir aralığı içermektedir. Elektromanyetik spektrum radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışıma, görünür ışık, mor ötesi ışınlar, x ışınları ve gama ışınları bölgesine ayrılır [19].

İnfrared (IR) 1800’ lü yıllarda Sir William Herschel tarafından keşfedilmiştir. IR ışıının tıp, plastik, kağıt endüstrisi gibi birçok alanda uygulaması vardır. Ancak IR ışıının gıda endüstrisinde kullanımı yakın zamana dayanmaktadır. 1950’ lerde IR’ nin kurutma alanında, 1960’ lı yıllarda ise IR ışıının çeşitli endüstri alanlarında uygulanmasına ilişkin çalışmalar yürütülmüştür. Son zamanlarda infrared ışıınım, gıda endüstrisinde yaygın olarak kurutma, pişirme, çözündürme, pastörizasyon ve sterilizasyon gibi ısı işlemlerde kullanılmaktadır [27,28].

İnfrared ışıının ile pişirme çalışmalarında infared ışıının ile pişirilen bisküviler görünüş, boyut ve yeme özellikleri bakımından konvektif pişiricilerle karşılaştırıldığında belirtilen parametrelerinde farklılık olmadığı saptanmıştır. Ayrıca infrared ışıının ile pişirme süresinin %50 azaldığı belirtilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada ise infrared ışıının ile pişirilen ekmeklerin daha ince kabuğa ve daha az iç sertliğe sahip olduğu belirtilmiştir [28].

Çizelge 3.1’ de infrared ışıının- mikrodalga kombinasyonu ısıtmanın çeşitli kullanım alanları ile konvansiyonel ısıtmanın karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çeşitli infrared- mikrodalga kombinasyon tekniği kullanım koşullarında ve çeşitli ısıtma türlerinde ısıtma sürelerinin konvansiyonel ısıtmaya göre oranları.(H: halojen lamba gücü (%), M: Mikrodalga gücü (%), t: süre (dk), T: sıcaklık (°C).

Yapılan işlem	Gıda çeşidi	İnfrared ışınlım- mikrodalga kombinasyonu ile ısıtma	Konvansiyonel ısıtma	Konvansiyonel ısıtmaya göre azalan süre (%)	Kaynak
Piştirme	Bisküvi	H: %80 M: %20 t: 5.5	T: 205 t: 11	%50	[29]
Piştirme	Kek	H: %70 M:%30 t: 5	T: 175 t: 24	%79	[30]
Piştirme	Hamburger ekmeği	H: %50 M:%50 t: 5	T: 200 t: 13	%61.5	[31]
Piştirme	Glutensiz kek	H: %60 M: %40 t: 7	T: 175 t: 30	%77	[32]
Kurutma	Ekmek içi	H: %30 M: %70 t: 1.75	T: 75 t: 126	%98.6	[33]
Kurutma	Havuç	H: %50 M: %50 t: 2.6	T: 60 t: 128	%98	[34]
Kavurma	Fındık	H: %10 M: %90 t: 2.5	T: 150 t: 20	%88	[35]

Fırıncılık ürünlerinde piştirme işlemlerinde düşük mikrodalga gücü tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra infrared ışınlım-mikrodalga kombinasyonu ile (yüksek infrared gücü- düşük mikrodalga gücü) yüksek mikrodalga gücü kullanıldığında oluşabilecek kalite problemleri engellenebilmektedir. Halojen lambanın düşük nüfuz derinliği özelliğinden faydalanılarak yüksek infrared ışınlım kullanımı ile ısının yüzeyde yoğunlaşması ile renk ve kabuk oluşumu sağlanmaktadır [28].

İnfrared ışınlım ile ısıtmanın kullanıldığı bir işlem de çözdürme işlemidir. Çözdürme işlemi dondurulmuş gıdaların kalitesini etkileyen önemli bir parametredir.

Konvansiyonel ısıtma yöntemi ile çözdürülen gıdalarda çözdürme süresinin uzunluğu yanı sıra gıda kalitesinde istenmeyen değişiklikler ve ürün kaybı gibi olumsuz durumlar yaşanmaktadır. Su ve buzun benzer infrared ışıyım absorplama katsayısına sahip olması nedeniyle tek düze ısıtma sağlaması, infrared ışıyım ile çözdürmenin konvansiyonel ısıtma ile çözdürmeye göre daha az damla kaybına ve etlerde daha az renk değışimi sağlamaktadır [28].

İnfrared ışıyım ile ısıtmanın kullanıldığı diğler bir işlemler de pastörizasyon-sterilizasyon işlemleridir. Bu yöntem gıdalarda bakteri, maya, küf ve sporların inaktivasyonunda kullanılır. İnfrared ışıyım ile ısıtma inaktivasyon ile mikroorganizmanın DNA, RNA, ribozom, hücre zarfı ve proteinlerini tahrip edebilmektedir. İnfrared ışıyım ile hasar gören hücrelerin inhibitör ajanlara karşı daha duyarlı olmaktadır. Bu hasar kondüktif ısıtma ile de gerçekleşebildiği fakat infrared ışıyım ile ısıtmaya karşı mikroorganizmanın protein, RNA ve hücre duvarının daha savunmasız olduğu bilinmektedir [28].

İnfrared çıkış gücü, dalga boyu, gıda kalınlığı, gıda çeşidi, mikroorganizma çeşidi, mikroorganizmanın hangi fizyolojik evrede olduğu (büyüme evresi, durgun evre gibi) mikrobiyal inaktivasyon derecesini etkileyen parametrelerdir [28].

3.4.2. İnfrared kurutma mekanizması

İnfrared kurutmada; kurutma için gerekli ısı infrared enerjisinden elde edilir. İnfrared ışıyınları katı materyal üzerine düşürüldükten sonra oluşan ısı kondüksiyonla katı materyal içerisinde iletilir ve bu esnada eş zamanlı kurutma olayı gerçekleşir. Kuruma mekanizması genellikle radyant ısıtıcıdan katıya radyasyonla ısı transferi, katı içerisinde kondüksiyonla ısı transferi ve katıdan dış ortama nem transferi basamaklarını içerir. İzotermal kuruma şartlarında, kütle transferi katı materyalin iç kısımlarındaki nemin yüzeye ve buradan da dış ortama taşınımı şeklinde gerçekleşir. Katı bünyesindeki nem taşınımı katı içi difüzyonla gerçekleşir [36].

3.4.3. İnfrared kurutmanın avantajları

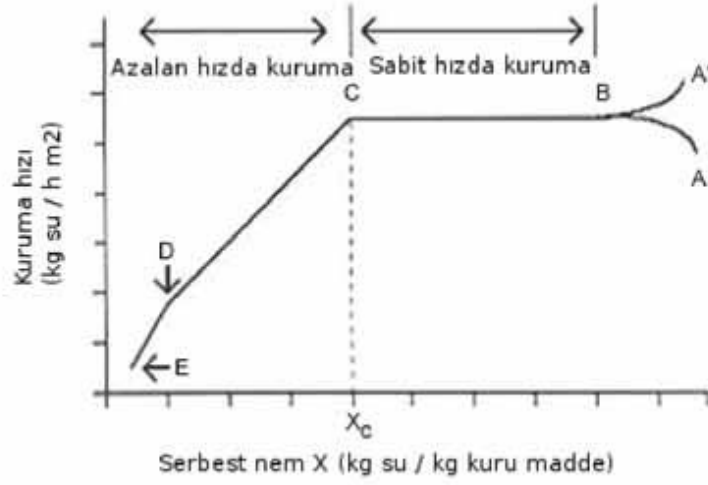
İnfrared ışınlarının diğer ışınlardan farkı ısıyı diğerlerinden daha fazla taşıyabilmesidir. İnfrared' in en büyük özelliği havayı ısıtmadan yani havayı aracı olarak kullanmadan doğrudan ürünü ısıtmasıdır. Diğer kurutma tekniklerinde ana enerji kaynağı olarak fosil yakıtları kullanıldığından doğrudan ürün üzerine verilmesi sakıncalı olacağından kurutma işlemi için gerekli olan ısı enerjisi birincil enerji kaynağından ikincil bir enerji kaynağına aktarılarak kurutma sağlanır. İkincil enerji kaynağının sürekli olarak kurutma sıcaklığında tutulması için ek bir enerji, zaman ve işçilik vb. girdilerle maliyet yükselmektedir. Fakat infrared ışın enerji kaynağı birincil enerji kaynağı durumundadır ve doğrudan ışın tarafından görülen yüzeylere ısı transferi olduğundan diğer ısıtma sistemlerine göre infrared ışını ile yapılan kurutmaya ekonomik üstünlük kazandırmaktadır [23].

Diğer avantajları ise kurutma süresinin kısalması, yüksek enerji verimliliğine sahip olması, kurutma sırasında ürün sıcaklığının düzgün dağılması, işlem parametrelerinin kolay kontrol edilebilir olması ve yer tasarrufu sağlaması şeklinde sıralanabilir [28].

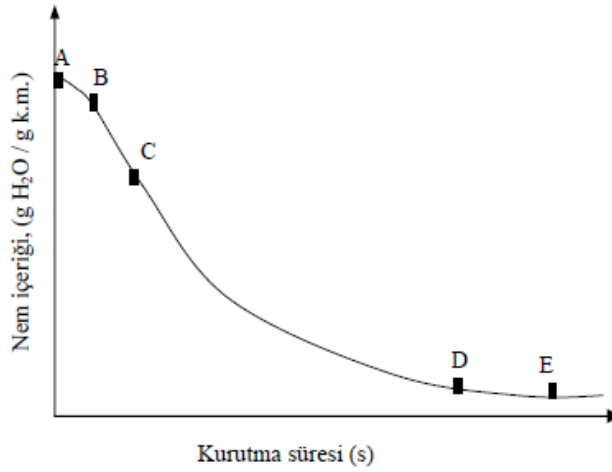
3.5. Kurumanın Temel Aşamaları

Kurutulan bir katının nem içeriği ile kurutma süresi arasındaki ilişkiyi kuruma eğrileri vermektedir.

Şekil 3.3' deki A' ve A noktaları sıcak veya soğuk bir katıyı temsil etmektedir. B noktası ise katı yüzeyinin denge noktasını göstermektedir. A (veya A') ile B noktası arasında geçen sürenin kısa olmasından dolayı kuruma süresinin analizi sırasında ihmal edilmektedir [26].

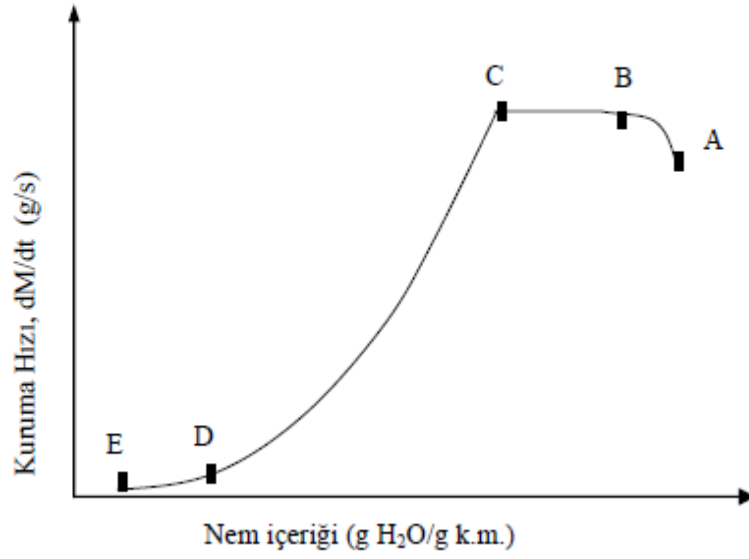


Şekil 3.3. Kuruma eğrilerinin temel özellikleri [26].



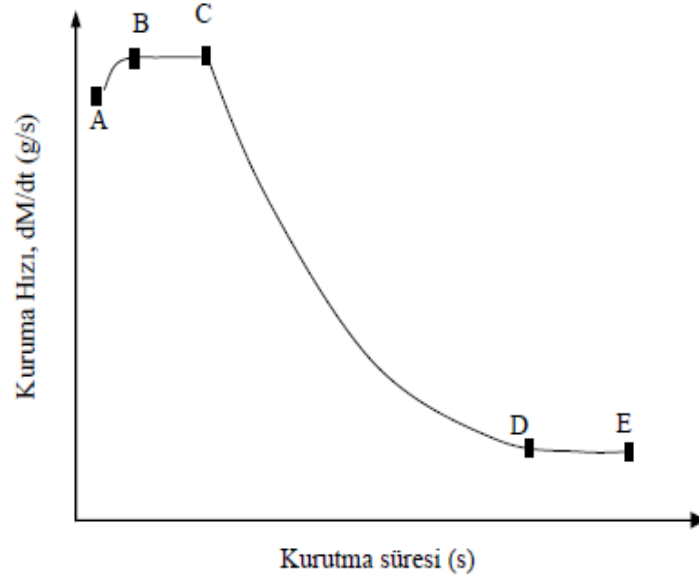
Şekil 3.4. Ürünün nem içeriğinin kurutma süresiyle değişimi [22].

Isınma Periyodu (A-B bölgesi): Şekil 3.4-3.6' da gösterilen A-B aralığında katının yüzey sıcaklığının, ortam sıcaklığıyla dengeye gelmesi söz konusudur. Genel olarak, bu bölümde kuruma hızında bir artış görülmekle birlikte tüm kuruma işleminin çok az bir bölümünü oluşturduğundan göz önüne alınmayabilir [22].



Şekil 3.5. Kuruma hızının ürün nem içeriğiyle değişimi [22].

Sabit Kuruma Periyodu (B-C bölgesi): Şekil 3.4-3.6’ da gösterilen B-C bölgesi sabit kuruma periyodu olarak isimlendirilir. Bu periyotta kuruyan katı yüzeyinin tamamıyla ıslak olduğu kabul edilir. Katının yüzeyi tamamen ıslak kaldığı sürece kuruma olayı, nemin katının iç kısımlarından yüzey tabakasına erişme mekanizmasına bağlı değildir. Bu periyotta katı yüzeyden hava akımı içine kütle transferi mevcut olup havadan maddeye ısı transferi, ıslak yüzeye kondüksiyon veya radyasyonla olan ısı transferi ihmal edilebilecek şekilde meydana gelir [22].



Şekil 3.6. Kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi [22].

1. Azalan hız periyodu (C-D bölgesi): Burada C noktası katının özelliklerine bağlı olarak değişen kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın oluştuğu duruma kritik nokta denir. Kritik nokta sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgeler. Kritik nem, her katı için farklı düzeyde olup, o katının bileşimiyle ilişkili bir değerdir. Kritik nem değerinden sonra yüzey sıcaklığı artar, yüzey kurumaya başlar ve kuruma hızı azalır. Bu periyot sonunda yüzey tamamıyla kurduğundan buharlaşma maddenin iç kısmında olur. Katı içerisindeki nemin sıvı difüzyonu yoluyla katı yüzeyine erişmesi ve yüzeye ulaşan nemin uzaklaştırılması şeklinde gerçekleşir. Yani difüzyon etkileri hakimdir [22, 26].

2. Azalan hız periyodu (D-E bölgesi): D noktasından itibaren oluşan kuru noktalar çoğalmaya ve genişlemeye başlar ve en dışta kuru bir katman oluşur. Gerek ısı geçirgenliği az olan kuru katmanın oluşması, gerek yüzeye taşınacak sıvı katmanın difüzyon hızının azalması ile kuruma hızı D noktasından itibaren devamlı bir düşüş gösterir. Bu D noktasına *ikinci kritik nem içeriği noktası* denir. DE boyunca, buharlaşma hızı, İç katmanlardan yüzeye difüzlener nemin difüzyon hızına bağlıdır. E noktasına ulaşıldığında buharlaşma durmuştur. Çünkü kurutucu havanın içindeki nemin buhar basıncı ile katının içindeki nemin buhar basıncı eşit olunca kuruma sona erer [22].

3.6. Difüzyon

Difüzyonla kütle transferi, konsantrasyon farkından kaynaklanan moleküllerin gelişigüzel hareketidir. Kütle, konsantrasyonu yoğun olan bölgeden düşük olan bölgeye doğru hareket etmektedir. Kütle difüzyonuna basit bir örnek olarak, katı yüzeyindeki su buharının havada yayılması verilebilir. Burada, yüzeydeki su buharı konsantrasyonu ile havanın içindeki nem konsantrasyonu farklıdır [3].

3.7. Katıların Nem İçeriğine Göre Sınıflandırılması

Kurutma prosesindeki kütle transferi mekanizması, katıların doğasına bağlıdır. Bünyesinde barındırdığı nemin karakteristiğine göre katılar higroskopik ve higroskopik olmayan katılar olarak ikiye ayrılırlar.

Higroskopik olmayan katılar, kum, kil, cam, seramik, vb. gibi katılardır. Bu tür katılar bünyelerinde bağlı su içermediklerinden dolayı, hangi ortamda bulunurlarsa bulunsunlar nem alış verişinde bulunmazlar. Çünkü katı içindeki suyun kısmi basıncı ile serbest halde bulunan suyun buhar basıncı birbirine eşittir.

Higroskopik katılar ise bünyelerinde bağlı su içeren maddelerdir. Bu katılardaki serbest suyun kısmi basıncı, çevreleyen havanın su buharı basıncından farklı olduğu için, bulundukları ortamla nem alış verişinde bulunabilirler. Bu katılar ancak denge nem içeriğine erişinceye kadar kurutulabilirler [3].

3.8. Katılarda Nemin Bağlanış Şekilleri

Kurutma prosesinde transfer edilen nem, katıya farklı şekillerde bağlanabilir. Kurutma prosesinde, hangi periyotta (ısınma, sabit hız ve azalan hız) hangi tür nemin üründen transfer edilmekte olduğu bu tip bağlı nemlerden anlaşılabilir.

Yüzey nemi: Bu tip nem, katının dış yüzeyinde ince bir film tabakası şeklinde bulunur. Kurutma havası sıcaklığı ve bağlı neminin belli bir değerinde katıdan ayrılan ilk nemdir. Katıların kurutulmasında, bu şekilde bulunan nem, sabit hızda

kuruma periyodunda kısa sürede ürünü terk eder. Toplam kurutma süresinin yanında çok az bir zaman aldığı için teorik hesaplamalarda bu süre dikkate alınmamaktadır.

Bağlı nem: Su moleküllerinin katı moleküllerine çok sıkı bir şekilde bağlanmasıdır. Bütün gözenekli olamayan higroskopik katıların içyapısında bulunan nem türüdür. Bu tür nem, ancak kurutma havasının farklı koşullarında katıdan ayrılabilir.

Bağlı olmayan nem: Su moleküllerinin katı moleküllerine daha gevşek bağlanmasıdır. Higroskopik katılardaki bağlı olmayan nem, kurutulan katıda bulunan ve denge nem içeriğinden yüksek olan nemdir.

Serbest nem: Toplam nem içeriği ile verilen kurutma havası koşullarındaki denge nem içeriği arasındaki farka eşittir. Katıda serbest nem olduğu müddetçe kurutma işlemi sürdürülebilir [3].

3.9. Denge Nemi ve Su Aktivitesi

Nem içeriği bilinen bir katı, sıcaklığı ve bağıl nemi sabit bir ortamda yeterli süre bekletilirse, havadaki su buharı basıncıyla katıdaki suyun buhar basıncı dengeye erişinceye kadar nem alış verişinde bulunur. Denge halinde ise katı tarafından tutulan suyun buhar basıncı ile havadaki suyun buhar basıncı eşittir. Denge halinde bulunan katının içerdiği nem miktarına denge nemi, denge halindeki katıyı çevreleyen havanın bağıl nemine de denge bağıl nemi denir. Kurutma işlemi sırasında denge nemi, kurutma havası sıcaklığına ve kurutma havası bağıl nemine bağlı olarak, kuru katının içerebileceği en az nem miktarını gösterir [22].

Katılarda, çeşitli tipte kimyasal reaksiyonların başlaması, sporların çimlenmesi, mikroorganizmaların büyümesi için gerekli olan suyun bünyede bulunması, ürünlerdeki suyun buhar basıncına veya su aktivitesine bağlıdır [22].

3.10. Kuruma Hızını Etkileyen Genel Faktörler

Kurutma hızı, ısı ve kütle transferine etki eden faktörler tarafından kontrol edilir. Bu faktörlerin başlıcaları havanın sıcaklık ve nemi, havanın kurutucudaki hızı, kurutulacak materyallerin boyutları gibi fiziksel faktörlerle, kurutulan ürünlerin başta bileşimi olmak üzere, kendine özgü olan diğer özellikleridir [37].

3.10.1. Sıcaklık

Kurumanın ilk safhalarında kuruma hızına etki eden en önemli faktörlerden biri, kurutma havasının kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki farktır. Başlangıçta kuruma hızı ile ters orantılı olan yaş termometre sıcaklık farkı sonradan önemini kaybeder ve kurumanın son safhalarında etkisiz hale gelir. Hava hızının kuruma hızına etkisi azdır. Hava akımı türbülanslı olduğu müddetçe hava hızının kuruma hızına etkisi önemli miktarda olmamaktadır [38].

3.10.2. Ürünün Boyutu

Kuruma hızına etki eden diğer bir faktör de materyalin boyutudur. Parçacıkların yüzey alanı ile doğru, fakat kalınlıkları ile ters orantılı olarak değişir. Kurutulan parçacıklar küçüldükçe yüzey alanı büyür. Dolayısıyla kuruma hızı olumlu yönde etkilenir [39].

3.10.3. Havanın Nemi

Havanın nisbi nemi, kurutmanın hangi seviyeye kadar sürdürüleceğini belirtir. Kurutulan gıdayla hava nemi arasında bir denge meydana gelinceye kadar kurutma işlemine devam eder [39].

3.10.4. Ürünün Kimyasal Bileşimi

Kuruma süresince ürünün kimyasal bileşimi değişiklik gösterir.

Küçük moleküllü erimiş (tuz, şeker gibi) maddelerce zengin gıdalar, bu maddelerce daha fakir gıdalarla kuruma açısından kıyaslanırsa, çözülmüş maddelerin suyun buhar basıncını düşürerek suyun buharlaşmasını güçleştirdikleri için daha zor kurudukları görülür.

Ortamda yağ bulunması kuruma hızını olumsuz yönde etkiler. Yağın sürekli faz olduğu bir emülsiyonda, su damlacıkları yağ tarafından sarıldığı için, böyle bir sistemde suyun buharlaşarak uzaklaşması güçtür. Bunların dışında glikoz, nişasta ve pektince zengin olan maddelerin kurutulması oldukça güçtür [19].

3.11. Gıdaların Kurutulmasında Meydana Gelen Değişiklikler

Kurutma sırasında meydana gelen değişiklikler kurutulan gıdalarda kalite ve besin kaybına neden olabilir. Bu durum ise kurutma işlemleri esnasında istenmeyen bir durumdur. Kurutulan gıdanın kalitesini etkileyebilecek değişimler; çözünür madde geçişi, kabuk oluşumu, çekme, rehidrasyon kapasitesi, renk değişimleri, esmerleşme reaksiyonları, lipid oksidasyonu, vitamin kayıpları, protein kayıpları ve mikroorganizmaların inaktivasyonu olarak sıralanabilir.

3.11.1. Çözünür madde geçişi

Kurutma esnasında gerçekleşen nem hareketi sıvı akışına bağlı olarak gerçekleştiğinde çözünür maddeler su ile yüzeye taşınır. Fakat çözeltinin hücre duvarını aşmaması gereken hallerde kolloidal yapıda olanlar ile düşük molekül ağırlıklı olan maddeler birbirinden ayrılır. Yüzeye bu şekilde taşınan madde ile su ayrılınca yüzeyde kuru madde birikimi olur. Yüzeydeki konsantrasyon arttığında yüzeyden iç kısma çözünen madde difüzyonu gerçekleşmeye başlar. Konsantrasyon farkı azalınca kadar bu işlem gerçekleşmeye devam eder ve gıda içindeki sıvı faz ortadan kalktığında çözünür madde göçü de durur [27].

Çözünür madde göçüne neden olan diğer bir durum ise hücre sıvısının yüzeyden dışarı akmasıdır. Yüzey tabakasının kuruması ile çekme meydana gelir. Çekme, dilimin iç kısımları üzerinde basınca neden olarak gıdanın içindeki tüm maddeleri içeren suyun gözenek, çatlak ve kılcallar yolu ile yüzeye ve dışarıya taşınmasına neden olur. Böylece gıda yüzeyi yapışkan bir sıvı ile kaplanır. Genellikle bu tür çözünür madde göçünün olduğu gıdalar yumuşak dokulu gıdalarda meydana gelmektedir [27].

3.11.2. Kabuk oluşumu

Kurutma koşullarının hatalı seçilmesi sonucu gerçekleşen bir olaydır. Kurutmanın ilk aşamasında yüksek kurutma hızının kullanılması ile oluşur. Bu nedenle oluşan yüzeydeki kuru tabaka büzülerek, hala nemli olan alt tabakalara basınç yapar. Nemli olan alt tabaka basınca karşı direnç gösterir. Bu durumda kuruma sonucu üst tabakalar büzülme olanağı bulamazlar ve gerilip sert bir kabuk haline dönüşürler. Kabuk bağlama ile kuruma hızı da birden bire düşer [27].

3.11.3. Çekme

Kuruma sırasında görülen en önemli yapısal değişikliktir. Genellikle kurumanın başlangıç aşamalarında gıdada yapının çökmesi sonucunda meydana gelir. Çekmenin engellenmesi çok zordur ve kurutma esnasında yapısal çekme kaçınılmazdır. Dondurarak kurutma gibi çok düşük sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemleri ile çekme belli ölçülerde engellenebilir [27].

3.11.4. Rehidrasyon kapasitesi

Gıdaların kurutulmasında önemli bir ölçüt olan rehidrasyon kapasitesi kurutulan gıdanın kalitesini doğrudan etkilemektedir. Kurutulan gıdanın kullanılması sırasında gıdaya verilen su ile eski haline dönüşebilme düzeyidir. Yani kurutulan gıda suda bekletildiğinde taze halinde içerdiği kadar su alabiliyorsa rehidrasyon kapasitesi yüksek demektir. Sıvı halde kurutulup toz haline getirilen meyve tozları, domates tozu ve süt tozu gibi ürünler için de rehidrasyon kapasitesi önemli bir parametredir [39].

Kurutulan ürünün rehidrasyon kapasitesi, gıdanın suda belirli koşullarda ısıtılması sonucunda kazandığı su miktarı ile ölçülür. Suyun sıcaklığı, suda bekleme süresi rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkili koşullardır [39].

3.11.5. Renk değişimleri

Renk tüketicici seçiminde önemli bir görsel özelliktir. Gıdalara renklerini veren karoten pigmentleridir. Bu pigmentler kurutma sırasında ısı ile reaksiyona girerek okside olurlar. Uzun kurutma süreleri ve yüksek sıcaklıklar pigmentlerin daha çok bozunmasına yol açar. Bu bozunmalar ise renk değişikliklerine neden olurlar. Renk değişimlerini engellemek için gıdalar bazı ön işlemlerden (sülfürleme ve askorbik asit ile yıkama gibi) geçirilebilir [20].

3.11.6. Esmerleşme reaksiyonları

Esmerleşme reaksiyonları geri dönüşü olmayan yapısal değişikliklerdir. Gıdada renk ve tat değişiminin yanı sıra gıdanın besinsel değerini de azaltmaktadır. Esmerleşme reaksiyonlarının hızı nem oranlarına bağlıdır. Orta nem oranında esmerleşme reaksiyonu hızlanmakta çok düşük ve yüksek nem oranlarında ise yavaşlamaktadır [26].

Maillard reaksiyonları ve karamelizasyon olmak üzere iki adet enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonu vardır.

Maillard reaksiyonları Fransız bir bilim adamı tarafından keşfedilmiştir. Maillard reaksiyonu aminoasit ile indirgen şeker arasında ısı etkisi ile ortaya çıkan bir kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucu şeker, kahverengi bir renge sahip olan melanoidlere dönüşür. Gıda içindeki nem, sıcaklık, pH, zaman, su aktivitesi, inhibitörler gibi faktörler Maillard reaksiyonunu etkilerler [40].

Karamelizasyon ise gıdanın kurutulması esnasında gıdanın içerisindeki şekerin erime noktası üzerine çıkarak karamelize olmasıdır. Farklı tür yapıdaki şekerler için farklı karamelize sıcaklıkları vardır. Fruktöz 110 °C sıcaklıkta karamelize olurken, sakaroz ve glikoz 160 °C sıcaklıkta karamelize olmaktadır [40].

3.11.7. Lipid oksidasyonu

Lipid oksidasyonu kurutulan gıdada istenmeyen tat değişimlerine, yağda çözünen vitamin ve pigmentlerin kaybına neden olur. Oksidasyonu etkileyen faktörler:

- Ürün nem miktarı
- Yağ asitleri
- Enzim aktivitesi
- Reaksiyon uzunluğu
- Oksijen içeriği
- Sıcaklık
- Metallerin varlığı
- Doğal antioksidanların varlığı
- UV ışığı
- Protein
- Serbest aminoasit içeriğidir [26].

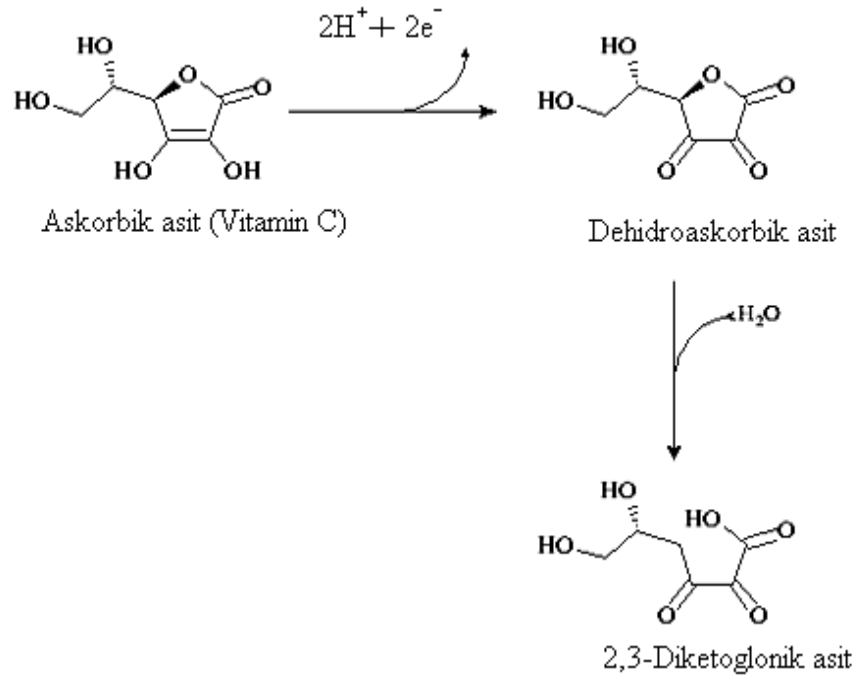
3.11.8. Vitamin kayıpları

Vitaminler gıdalarda farklı miktarlarda ve farklı dağılımlarda bulunurlar. Vitaminlerin gıdalarla eksik alınması, emilim bozuklukları ya da bazı metabolik bozukluklara neden olur. Vitamin eksiklikleri, hipovitaminoz denilen normal kabul edilen en düşük düzeyin altında vitamin alınması ile ortaya çıkan hastalığa neden olmaktadır. Örneğin; taze meyve ve sebze olmadan, kuru gıdalarla uzun süre idare etmek zorunda olan denizcilerde C vitamini eksikliğinden dolayı skorbüt hastalığı görölmekteydi [41].

Besin öğelerinin vücuda alınan miktarları ile vücutta kullanılan miktarları farklıdır. Bu durum herhangi bir besin öğesinin vücutta emilimi ve organizmada kullanılma düzeyi ile ilişkilidir. Bu ilişkiye biyoyararlılık denilmektedir. Vitaminlerin biyoyararlılıkları diğer besin öğeleri ile ne şekillerde etkileşim içinde olduğuna ve gıdaların işlenme şekillerine bağlı olarak değişim gösterir [41].

Kurutma işlemi sırasında oluşan oksidasyon ürünleri gıdaların yapılarında bulunan vitaminler ile reaksiyona girmeleri sonucunda gıdada vitamin kayıplarına neden olmaktadır. Bunların en önemlisi C vitaminindeki kayıplar olarak bilinmektedir [20]. Kurutma süresi, depolanmaları sırasındaki nem miktarı, sıcaklık ve oksijen seviyesi bu durumu etkileyen başlıca faktörlerdir. Bu faktörlerin düşük seviyede tutulması ile vitamin kayıplarının en aza indirgenmesi sağlanabilir [40].

Şekil 3.7’ de kurutulma sırasında Askorbik asit (C vitamini) bozunması ile oluşan kimyasal değişime bir örnek verilmiştir [40].



Şekil 3.7. Gıdaların kurutulması sırasında meydana gelen C vitamini oksidasyonu [40]

3.11.9. Protein kayıpları

Proteinler gıdaların kurutulması sırasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlerden etkilenirler. Kurutma yöntemi de protein değişimlerini etkileyen bir başka nedendir. Gıdaların kurutulması sırasında gıda bünyesindeki su içeriğinin azaltılması ile proteinlerin stabilitesi arttığından, proteinlerin biyolojik değeri ve sindirim özelliği kaybolmamaktadır [40].

3.11.10. Mikroorganizmaların inaktivasyonu

Mikroorganizmalar, yaşaması ve çoğalması için bulundukları ortamda suya ihtiyaç duyarlar. Çok eskilerden beri gıdalar kurutularak mikroorganizmaların bozunmaları sağlanmıştır. Kurutma yöntemi ile mikroorganizmaların yaşamaları için ihtiyaç duyduğu su gıdadan uzaklaştırıldığından kurutulmuş gıdalarda mikroorganizma üremesi gerçekleşmez [40].

4. KIZILCIK HAKKINDA GENEL BİLGİ

Kızılcık (*Cornus mas* L.), Umbelliflorae takımının Cornaceae familyasından, kışın yapraklarını döken, çalı veya 7-8 metreye kadar boylanabilen, gövde çapı 25-45 cm olan ekşimsi tada sahip yabani bir meyve türüdür [42, 43]. Kızılcığın genel görünümü Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kızılcık genel görünümü

Anadolu birçok meyve türlerinin olduğu gibi, kızılcığın da anavatanı ve en eski kültür alanlarından biridir. Sert çekirdekli bir meyve türü olan kızılcık, ülkemizin özellikle sahil bölgelerinde, dağlık, ormanlık alanlarında ve iklimi uygun vadi içlerinde yaygın olarak bulunmaktadır. Yaz sonu ile sonbahar başlarında olgunlaşan kızılcık, kırmızı renkli, iyi aromalı ve yaklaşık olarak zeytin büyüklüğündedir. Meyve rengi türlere bağlı olarak, kırmızı, sarı ve yeşildir [42, 44]. Kızılcığa ait bazı kimyasal özellikler Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kızılcık meyvesinin kimyasal özellikleri [45]

Su miktarı (%)	83.28
Suda çözünür kuru madde miktarı (%)	16.72
pH	3.81
Toplam asit (%) (malik asit cinsinden)	2.15
Kül miktarı (%)	0.51
Toplam şeker (%)	7.77
İndirgen şeker (%)	5.04
Askorbik asit (mg/100g)	45.34
P (mg/100g)	12.00
K (mg/100g)	287.00
Na (mg/100g)	20.24
Ca (mg/100g)	26.40
Mg (mg/100g)	9.50
Fe (ppm)	0.07
Cu (ppm)	0.06
Zn (ppm)	0.06
Mn (ppm)	0.20

Vitamin ve mineral kaynağı olması beslenme açısından meyveleri önemli kılmaktadır. Tür, toprak şartları, rakım ve iklime bağlı olarak değişiklik gösteren ve meyvelerde en fazla ve yaygın olarak bulunan vitamin askorbik asittir. Askorbik asit miktarınca zengin meyve türlerinden biri de kızılcıktır [45]. Kızılcık ayrıca potasyum, tanen ve organik asitler bakımından da zengin bir meyvedir [44]. Bununla birlikte önemli miktarda antioksidan ve anti-inflamatuar etkileri içerdiği bilinen antisianinler içermektedir [46].

Sağlık açısından değerlendirildiğinde kızılcık; kanın pıhtılaşmasını artırır ve ateş düşürücü ve güçlü bir ishal kesicidir. Kızılcık suyu, şerbeti veya kompostosu idrardaki asit miktarını arttırır. Böylece böbrek taşlarının tedavisinde kullanılır. Henüz keşfedilmeyi bekleyen bu meyve içerdiği besin öğelerine bakıldığında ilerleyen yıllarda besin ve besin destekleri pazarında adından söz ettirecektir. Son yıllarda meyvelerin insan sağlığı ve beslenmesi açısından öneminin artmıştır. Besin maddeleri ve vitamin bakımından meyvelerin mevcut potansiyeli değerlendirilmeye

başlanmıştır. Besin maddeleri ve vitamin bakımından yüksek potansiyele sahip meyvelerden biri de kıvılcıktır. Kıvılcık popölasyonlarının bulunduğu yörelerde yapılan çalışmalarda bu potansiyel belirlenmeye ve amaca uygun olan tipler değeriendirilmeye çalışılmaktadır [42, 46]

Ülkemizin toplam kıvılcık üretimi yaklaşık 12 000 tondur. Kıvılcık, ülkemizde ve dünyada taze olarak tüketildiğı gibi; meyve suyu, reçel, marmelat, şurup, alkollü içkiler yapılarak ya da kurutularak kullanılmaktadır. Son yıllarda bazı işletmeler tarafından sanayi amaçlı olarak da işlenmeye başlanmıştır. Ayrıca kırsal ağaçlandırılmasında özellikle şehir dışı zirai ve kırsal peyzaj tazmininde de kullanılabilirler. Endüstri bölgelerinde ağır, killi, kireçli topraklarda dahi yetiştirilebilirler [42, 46, 47].

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

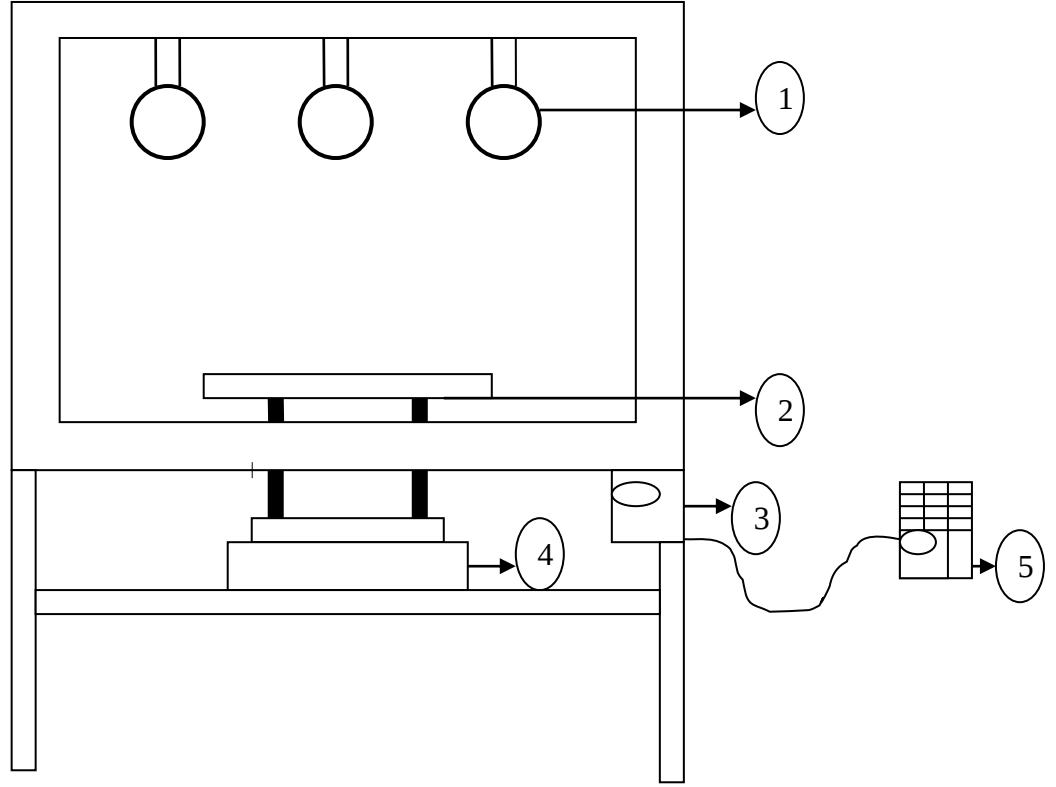
5.1. Araştırmada Kullanılan Materyaller

Bu çalışmada, araştırma materyali olarak kızılcık seçilmiştir. Kurutma için seçilen kızılcık yerel bir manavdan temin edilmiştir. Kızılcıklar 400-500 g aralığında poşetlenip derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. Deney öncesi materyal dondurucudan çıkarılmış, 20 g alınarak başlangıç nem içeriği 100 °C’ de 24 saat bir etüvde bekletilerek belirlenmiştir. Başlangıç nem miktarı %75.92 olarak bulunmuştur.

5.2. Kullanılan Cihazlar

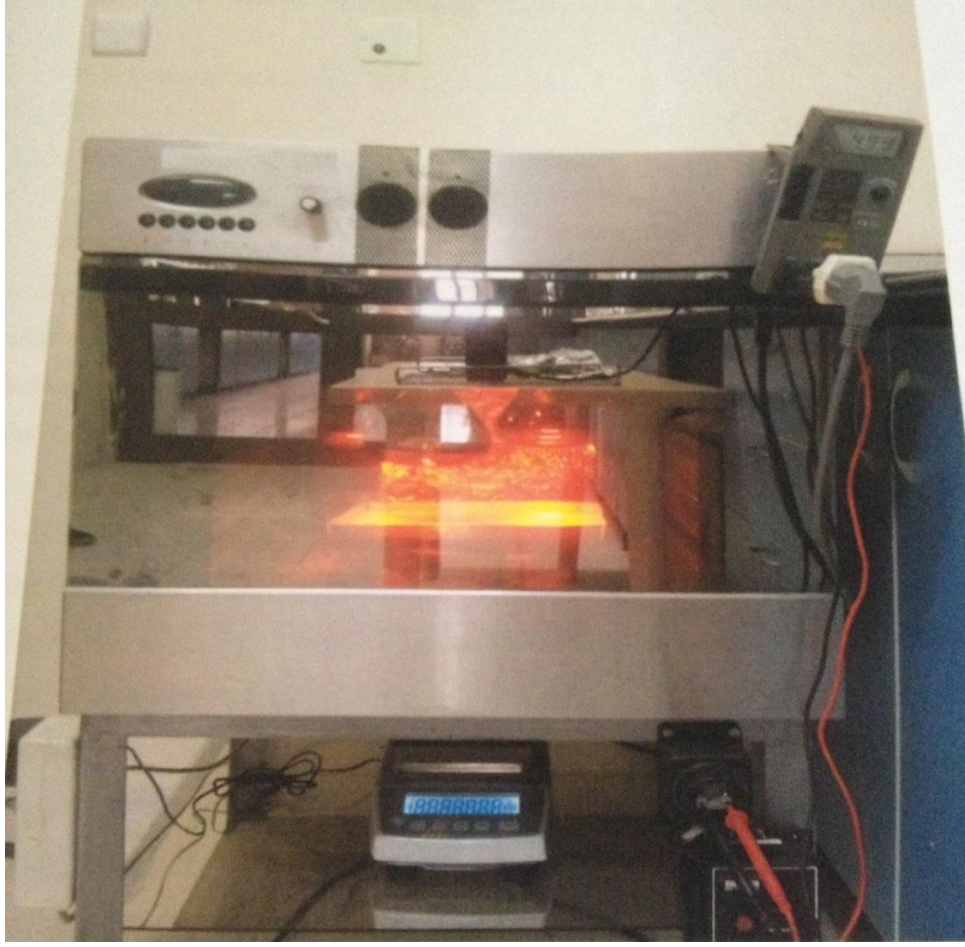
5.2.1. İnfrared Kurutucu

İnfrared enerjisi kullanarak çeşitli sebze ve meyveleri kurutmak için geliştirilen infrared kurutma düzeneği Şekil 5.1’ de, İnfrared kurutucunun genel görünümü ise Şekil 5.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. İnfrared kurutma düzeneği

- 1- İnfrared lamba (250 W)
- 2- Kurutma tepsisi
- 3- Dimmer (Işık ayarlayıcı)
- 4- Hassas terazi
- 5- Wattmetre



Şekil 5.2. İnfrared kurutucunun genel görünümü

Kurutma bölgesi 53.5 cm eninde, 54 cm boyunda ve 57 cm yüksekliğindedir. İç kısım ışığı yansıtıcı alüminyum folyo ile kaplanmıştır ve kurutma odasının ön kısmında açılıp kapanabilen bir kapı bulunmaktadır. İnfrared ısı kaynağı olarak 250 W gücünde 3 adet infrared lamba kurutma bölgesinin tavanına monte edilmiştir. Lambalardan farklı infrared güçleri elde etmek için ışık ayarlayıcı, dimmer (Promed) kullanılmıştır. Dimmerden ayarlanan güç değerlerinin okumaları bir Wattmetre (Lutron DV6060) vasıtasıyla yapılmıştır. Üründen buharlaştırılan nemin uzaklaştırılması için bir tane fan kullanılmıştır.

Kurutma esnasında örnekleri üzerinde kurutmak için tel ızgaradan yapılmış 26.6x18.5 cm ebatlarında bir adet kurutma tepsisi kullanılmıştır. Kurutma tepsisi, kurutma esnasında örnekte meydana gelen kütle kaybının belirlenmesi için dijital bir terazi (Kern PCB) üzerine yerleştirilmiştir.

5.2.2. Renk ölçüm cihazı

Kızılıcığın infrared ışınım ile kurutulması esnasında meydana gelen renk değişimlerini gözlemlemek amacıyla, Konica Minolta CR-400 markalı renk ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.3’ de genel görünümü, Çizelge 5.1’ de ise teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.3.Konica Minolta CR-400 cihazı genel görünümü

Çizelge 5.1. Konica Minolta CR-400 cihazı teknik özellikleri

Işık kaynağı	Pulsen Xenon Lamba
Ölçüm zamanı	İki ölçüm arası: 3 saniye Ölçüm süresi: 1 saniye
Boyutları	102x217x63 mm
Ağırlık	600 g
Pil ömrü	Yaklaşık 800 ölçüm
Çalışma ortamı	0-40 °C, bağıl nem: %85 maks. yoğuşmasız
Renk skalası	L,a,b renk ölçüm skalası

Deneyde kullanılan renk ölçüm cihazında ölçümler “Hunter Lab Renk Skalası (L, a, b)” metodu ile yapılmıştır. R.S Hunter tarafından cihaz fotoelektrik bir renk ölçme cihazı ile direkt okunabilen düzenli bir renk skalası olarak geliştirilmiştir.

Bu metotta kullanılan;

L: gıdanın renginin beyazlık, parlaklık ve matlık indeksine göre ölçümü sonucu elde edilen bir değerdir. Bu değer 0-100 arasındadır. Gıdaların ilk renklerine olan yakınlığının ve tazeliğin göstergesi olan parlaklıkların ne kadar değişip değişmediği bu değere göre belirlenir.

a: gıdanın renginin kırmızı ile yeşil renk skalası içinde nerede bulunduğunu gösterir.

b: gıdanın renginin mavi ile sarı renk skalası içinde nerede olduğunu belirtir.

5.2.3. Su banyosu

Kızılıcığın infrared ışıının ile kurutulmasından sonra rehidrasyon kapasitesinin belirlenebilmesi için kızılıcık örnekleri Nüve NB 9 markalı su banyosu içerisinde bulunan suyun içerisinde bekletilmiştir. Su banyosu genel görünümü Şekil 5.4’ de verilmiştir.



Şekil 5.4. Nüve NB 9 su banyosu genel görünümü

5.3. Deneylerin Yapılışı

5.3.1. Materyalin hazırlanması

Kurutma işleminden hemen önce derin dondurucudan örnek çıkarılmıştır. Kurutma tepsisinin içi alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Çıkarılan örneklerden çürük ve küçük boyutlu olanları çıkarılmış hemen hemen hepsi aynı boyda ve tek sıra olacak şekilde tepsiye dizilmiştir. Örneklerin ortalama çapları bir elektronik mikrometre (Flexbar, 15752) ile ölçülmüştür ve çapları 1 cm (± 0.2), çekirdek çapları ise 0.55 cm (± 0.2) olarak belirlenmiştir. Kurutma denemeleri 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W infrared güçlerinde gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi kurutucunun istenen güç değerinde kararlı hale gelmesi için, kurutucu 5 dakika boşta çalıştırılmıştır.

5.3.2. Materyalin başlangıç içeriğinin belirlenmesi

Kızılçık örneklerinin başlangıç nem içeriklerinin hesaplanabilmesi için 20 g kızılçık numunesi 100 °C sıcaklıktaki bir fırında 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Kurutulan kızılçık örneklerinin başlangıç nem içeriği % 75.92 olarak belirlenmiştir.

5.3.3. Kuruma zamanı ve kuruma hızlarının belirlenmesi

Kuruma zamanı kızılçığın başlangıç nem içeriğinden yaklaşık olarak %10 (± 1) nem içeriğine ulaşmaya kadar geçen süre olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada yaklaşık olarak 373 g kızılçık numuneleri alınarak 250W, 300W, 350W, 400W, 450W, 500W, 550W ve 600W infrared kurutma güçlerinde kurutulmuştur. Örneklerin %10 nem içeriğine kadar kurutulması, 5 dakikalık zaman prosesi aralıklarında tartım kaydı alınarak incelenmiştir. Tüm deneylerde tartım sürelerinin 5 saniyeyi aşmamasına dikkat edilmiştir.

5.3.4. Renk değişimlerinin belirlenmesi

İnfrared ışıının ile kurutma yönteminin kızılclık üzerindeki renk değişimine etkisini incelemek için taze ve 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W infrared çıkış güçlerinde kurutulmuş örneklerin renk değişim parametreleri Konica Minolta CR-400 markalı ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Renk ölçüm işlemi öncesinde cihaz beyaz standart kalibrasyon plakası ile kalibre edilmiştir. Ölçüm esnasında bütün numunenin renk değişimi dikkate alınarak renk ölçümü beş farklı noktadan yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

5.3.5. Rehidrasyon kapasitesinin belirlenmesi

İnfrared ışıının ile kurutma yönteminin kuru kızılclığın rehidrasyon kapasitesi üzerine olan etkisini incelemek için 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W infrared çıkış güçlerinde kurutulmuş kızılclık örnekleri soğutulduktan sonra 10' ar gram tartılarak su banyosunda, 100 ml 20, 40, 60, 80 °C' deki distile suda 5'er dakika bekletilip soğuk distile sudan geçirilerek iyice süzölmüştür. Daha sonra kurutulmuş örnekler tarafından absorplanan su miktarları tartılarak belirlenmiştir.

5.3.6. Kurutulmuş kızılclık örneklerindeki C vitamini (askorbik asit) miktarlarının belirlenmesi

Kızılclık örneklerinin C vitamini analizi için Bessey'in modifiye titrimetrik yöntemi kullanılmıştır [48]. Deneyin prensibi, kuvvetli indirgeyici olan askorbik asidin 2,6 diklorofenol indofenol boya çözeltisi ile yapılan titrasyon sonucu oluşan dehidro askorbik asidin pembe renk oluşturmaya esasına dayanır.

Ekstraksiyon prosesi: 20 g kurutulmuş çekirdeği çıkarılmış örnek aynı miktarda % 6'lık okzalik asit çözeltisi ile blenderda iyice karıştırılarak homojenize edilir. Daha sonra karışımdan 10 g tartılarak % 3'lük okzalik asit ile 100 ml'lik

balona aktarılarak çizgisine kadar tamamlanır ve süzgeç kağıdı yardımıyla filtre edilir.

Standart askorbik asit çözeltinin hazırlanması: Bu çözeltinin hazırlanması için 20 mg askorbik asit, 100 mL okzalik asit çözeltisi içinde çözündürülür (0.2 mg/mL).

Askorbik asidin titrimetrik olarak belirlenmesi: Askorbik asit miktarının belirlenmesi için 10 g örnek 90 mL okzalik asit çözeltisi ile karıştırılıp süzülür ve süzüntüden 10 mL bir erlene aktarılır. Daha sonra büretteki boya (diklorofenol indofenol) çözeltisi ile kalıcı pembe renk oluşana kadar titre edilir ve sarfiyat kaydedilir.

Aynı işlem bir de standart askorbik asit çözeltisi ile tekrarlanır. Bu kez erlene alınan örnek yerine standart askorbik asit çözeltisinden alınır (5 mL). Daha sonra 5 mL okzalik asit çözeltisi eklenir ve işlem sonunda standart askorbik asit çözeltisi için harcanan boya çözeltisinin miktarı da kaydedilir. Standart ve örnek çözelti için harcanan bu boya çözeltilerinin miktarından yola çıkılarak materyal içindeki C vitamini belirlenir.

5.4. Deneysel Hesaplamalar

5.4.1. Nem içeriklerinin hesaplanması

Kızılçık örneklerinin kuruma sırasındaki nem içeriği değerleri Denklem 5.1' den hesaplanmıştır [49].

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (5.1)$$

Burada;

M_t : t anındaki nem içeriği (g su / g kuru madde)

m_t : t anındaki örneğin ağırlığı (g)

m_d : örneğin içerdiği kuru madde miktarı (g).

5.4.2. Kuruma hızlarının hesaplanması

Kuruma hızları denklem 5.2 ile hesaplanmıştır [49].

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5.2)$$

DR : kuruma hızı (g su/g kuru madde dk)

M_{t+dt} : t+dt anındaki nem içeriği

M_t : t anındaki nem içeriği

dt : zaman aralığı (dk) dır.

5.4.3. Nem oranlarının hesaplanması

Boyutsuz nem oranları Denklem 5.3 ile hesaplanmıştır [8].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5.3)$$

MR : boyutsuz nem oranı

M_t : t anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde)

M_0 : başlangıçtaki nem içeriği (g su/g kuru madde)

M_e : denge nem miktarı (g su / g kuru madde)

şeklinde tanımlanmıştır.

Burada M_e terimi diğer terimlerden çok küçük olduğu için genellikle sıfır kabul edilir [20].

5.4.4. Rehidrasyon kapasitesinin hesaplanması

Rehidrasyon kapasitesi Denklem 5.4 ile hesaplanmıştır [50, 51].

$$RK = \frac{m_{rehid}}{m_{kuru}} \quad (5.4)$$

Burada;

RK : rehidrasyon kapasitesi

m_{rehid} : rehidrasyon sonrası ürünün ağırlığı (g)

m_{kuru} : materyalin içerdiği kuru madde miktarı (g)dır.

5.4.5. C Vitamini (Askorbik asit) miktarının belirlenmesi

Bölüm 5.3.6’ da anlatılan deney prosedürüne göre hazırlanan standart askorbik asit çözeltisi için harcanan boya çözeltisi miktarı (ml) kaydedilmiştir. Standart çözelti içerisindeki askorbik asit miktarı (mg) hesaplanarak, harcanan boya çözeltisinin kaç mg askorbik aside eşdeğer olduğu orantısı kurulmuştur. Bu orantıdan yola çıkılarak Bölüm 5.3.6’ da hazırlığının anlatıldığı örnek çözeltideki askorbik asit miktarı hesaplanmıştır.

5.5. Teorik Hesaplar

Biot sayısı, kütle transferinde iç ve dış dirençlerin hakim olup olmadığını belirten boyutsuz bir sayıdır. Biot sayısı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$Bi = \frac{\text{katı içindeki yürütücü kuvvet}}{\text{akışkan içindeki yürütücü kuvvet}}$$

Kararlı hal difüzyonunda, Biot sayısına bağlı olarak, üç farklı kararsız nem difüzyonu söz konusudur. Bu durumlar; $Bi \leq 0.1$, $0.1 < Bi < 100$ ve $Bi > 100$.

$Bi \leq 0.1$ olduğu durumlarda, katı içindeki nem difüzyonunda iç direnç ihmal edilir.

$Bi > 100$ olduğu durumlarda, nem transferine dış direnç ihmal edilir.

$0.1 < Bi < 100$ durumlarında ise nem transferine sınırlı iç ve dış direnç etki ediyor demektir [52]. Bu durumlar ve literatür kaynakları göz önüne alınarak modelleme hesaplamaları iki gruba ayrılmıştır.

5.5.1. Dış direncin ihmal edildiği hal (Difüzyon teorisi)

Difüzyon teorisine göre katının iç kısımlarındaki nemin yüzeye hareketi katı içi difüzyonla gerçekleşir.

Birinci Fick yasası madde içerisinde difüze olan maddenin yerel konsantrasyonunun zamanla birlikte azalmasını göz önüne almaz. Bu tür durumlarda difüzyonu ifade etmek için ikinci Fick yasası kullanılır. İkinci Fick yasası bir materyal içerisinde difüze olan maddenin konsantrasyonunun zamanla değişiminin yerel difüzyon akısındaki değişime eşit olduğunu ifade eder.

Difüzyon modeli kütle transferinin yalnızca moleküler difüzyonla gerçekleştiği kabulüne dayanır. Bununla birlikte genellikle kütle transferi için başka mekanizmalar da söz konusu olur. Bu durumda diğer transfer mekanizmalarının etkilerinin difüzyon katsayısı içinde yer aldığı düşünülebilir. Böylece difüzyon katsayısı Denklem 5.5' te gösterildiği gibi efektif bir parametre haline gelir [53].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (5.5)$$

Difüzyon katsayısını belirlemede kullanılan küresel koordinatlarda bir boyutlu Fick'in ikinci difüzyon denklemi ise Denklem 5.6' da verilmiştir [53].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad (5.6)$$

Kızılçık için küre kabulü yapılmıştır.

Difüzyon denkleminin bazı basit geometriler için çözümü aşağıda ifade edilen kabuller çerçevesinde elde edilebilmektedir.

- Başlangıçtaki nem dağılımı materyal boyunca değişmez.
- Numune yüzeyinin nem içeriği çevresi ile hemen dengeye gelir, yani kütle transferine gösterilen dış direnç iç dirence kıyasla ($Bi \gg 1$) ihmal edilebilir.
- Difüzyon katsayısı sabittir ve büzülme ihmal edilebilir [9, 11, 15, 18].

Bu varsayımlara göre başlangıç ve sınır şartları Denklem 5.6a-5.6c'de verilmiştir.

$$M = M_0 \quad R_1 < r < R_2 \quad t = 0 \quad (5.6a)$$

$$M = M_1 \quad r = R_1 \quad t > 0 \quad (5.6b)$$

$$M = M_e \quad r = R_2 \quad t > 0 \quad (5.6c)$$

Başlangıç ve sınır şartlarının ve değişkenlerine ayırma metodunun kullanılmasıyla Denklem 5.6' nın küresel koordinatlarda çözümünden Denklem 5.7 elde edilir. (Denklem 5.6' nın çözümü Ek 9' da verilmiştir.)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2 (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_2 \cos n\pi - R_1}{n} \right)^2 \exp \left(- \frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{(R_2 - R_1)^2} \right) \quad (5.7)$$

Denge nem miktarının (M_e) sıfır ve sadece ilk terimin önemli olduğu dikkate alınıp Denklem 5.7 yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilmiş olur.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2 (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)} (R_2 \cos \pi - R_1)^2 \exp \left(- \frac{D_{eff} \pi^2 t}{(R_2 - R_1)^2} \right) \quad (5.8)$$

Burada;

D_{eff} : etkin difüzivite katsayısı (m^2/s)

R_1 : materyalin iç yarıçapı (m)

R_2 : materyalin dış yarıçapı (m)

t : kuruma zamanı (s)

olarak tanımlanmıştır.

Katıların kurutulması esnasında gerçekleşen kütle transferinin en önemli ölçütü olan etkin difüzivite katsayısı Denklem 5.8' in her iki tarafının $\ln$ ' inin alınmasıyla elde edilir [8, 9, 11, 15, 18, 49, 54-57].

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{6(R_2 \cos \pi - R_1)^2}{\pi^2 (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{(R_2 - R_1)^2} \right) t \quad (5.9)$$

Kızılıcığın 250-600W infrared kurutma güçlerinde kurutulması ile elde edilen deneysel verilerden yararlanılarak hesaplanan MR değerlerinden $\ln(MR)$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan $\ln(MR)$ değerleri, t değerlerine karşı grafiğe geçirildiğinde

elde edilen grafiğin eğimi, $-\left(\frac{D_{eff} \pi^2}{(R_2 - R_1)^2} \right)$ eşitliğini verir. Bu eşitliğin kullanılması ile de etkin difüzivite katsayıları (D_{eff}) hesaplanmıştır [8, 9, 11, 15, 18, 49, 54-57].

5.5.1.1. Kinetik modeller

- **Page modeli**

Gıdaların kuruma kinetiğinin açıklanmasında en çok kullanılan modellerden biri olan Page modeli Denklem 5.10' da verilmiştir [11, 49, 50].

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (5.10)$$

Denklem 5.10' da;

k: kinetik sabit (dk^{-1})

t: kuruma zamanı (dk)

n: Page modeline ait bir katsayıdır.

- **Logaritmik model**

Logaritmik model Denklem 5.11 ile verilmiştir [11, 50].

$$MR = a.\exp(-k.t) + b \quad (5.11)$$

Denklem 5.11' de;

a: katsayı

b: katsayı (dk^{-1})

k: kinetik sabit (dk^{-1})

t: kuruma zamanı (dk) dır.

- **Midilli ve ark. modeli**

Midilli et al modeline ait denklem, Denklem 5.12 ile verilmiştir [11, 58].

$$MR = a.\exp(-k.t^n) + b.t \quad (5.12)$$

Denklem 5.12’de;

a: katsayı

b: katsayı

k: kinetik sabit (dk^{-1})

t: kuruma zamanı (dk)

n: Midilli et al. modeline ait bir katsayıdır.

- **Newton modeli**

Newton modeline ait denklem, Denklem 5.13 ile verilmiştir [11].

$$MR = \exp(-k.t) \quad (5.13)$$

Denklem 5.13’ de;

k: kinetik sabit (dk^{-1})

t: kuruma zamanı (dk) dır.

- **Wang-Singh modeli**

Wang-Singh modeline ait denklem, Denklem 5.14 ile verilmiştir [11, 40].

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (5.14)$$

Denklem 5.14’ de;

a: katsayı

b: katsayı

t: kuruma zamanı (dk) dır.

- **Henderson and Pabis modeli**

Henderson and Pabis modeline ait denklem, Denklem 5.15 ile verilmiştir [11, 40, 49].

$$MR = a \exp(-kt) \quad (5.15)$$

Denklem 5.15’ de;

a: katsayı

k: kinetik sabit (dk^{-1})

t: kuruma zamanı (dk)dır.

- **İki terimli model**

İki terimli modele ait denklem, Denklem 5.16 ile verilmiştir [57, 59].

$$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (5.16)$$

Denklem 5.16' da;

a₁: katsayı

a₂: katsayı

k₀: kinetik sabit (dk⁻¹)

k₁: kinetik sabit (dk⁻¹)

t: kuruma zamanı (dk) dır.

- **Verma modeli**

Verma modeline ait denklem, Denklem 5.17 ile verilmiştir [11, 59].

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt) \quad (5.17)$$

Denklem 5.17' de;

a: katsayı

g: katsayı

k: kinetik sabit (dk⁻¹)

t: kuruma zamanı (dk)dır.

- **Modifiye Page Modeli**

Modifiye Page modeline ait denklem, Denklem 5.18 ile verilmiştir [40].

$$MR = \exp(-kt)^n \quad (5.18)$$

Denklem 5.18' de;

k: kinetik sabit (dk⁻¹)

t: kuruma zamanı (dk)

n: Geometrik modele ait bir katsayıdır.

- **Difüzyon yaklaşımı modeli**

Difüzyon yaklaşımı modeline ait denklem, Denklem 5.19 ile verilmiştir [59].

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (5.19)$$

Denklem 5.19' da;

a: katsayı

b: katsayı

k: kinetik sabit (dk⁻¹)

t: kuruma zamanı (dk)dır.

5.5.1.2. Regresyon analizleri

Regresyon analizlerinde Microsoft Office Excel Solver Programı kullanılmıştır. Belirleme katsayısı (R²) materyallerin kuruma eğrilerini tanımlayan denklemi seçmek için temel kriter olarak alınmıştır. Tahminin standart hatası (RMSE) ve ki kare (χ²) değerleriyle kullanılan modelin uygunluğu belirlenmiştir. En düşük χ² ve RMSE ile en yüksek R² değerleri materyalin kuruma karakteristiğini tanımlayan en iyi modeldir [19].

Denklem 5.20 ve Denklem 5.21' den faydalanılarak RMSE ve χ² değerleri hesaplanmıştır [50].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{tah} - MR_{den})^2}{N}} \quad (5.20)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{den} - MR_{tah})^2}{N - P} \quad (5.21)$$

Denklem 5.20 ve Denklem 5.21'de;

RMSE: tahminin standart hatası

χ² : Ki-kare

MR_{den} : deneysel nem oranı değeri

MR_{tah} : tahmin edilen nem oranı değeri

N : deneysel veri sayısı

P : kullanılan parametre sayısı' dır.

5.5.2. Dış direncin dahil edildiği hal

Kütle transferine karşı dış direncin de etkili olduğu hal için Bi-S korelasyonu geliştirilmiştir [5].

Bi – S korelasyonu

Boyutsuz nem içeriğinin lag faktörü (G) ve kuruma katsayısına (S) karşı kuruma zamanının (t) üstel formda gösterimi Denklem 5.22' deki gibidir.

$$\phi = G \exp(-St) \quad (5.22)$$

Burada S katının kuruma kapasitesini, G ise kuruma anında katı içindeki nem transferine olan iç direnci göstermektedir.

Katının herhangi bir noktasındaki boyutsuzlaştırılmış nem içeriği Denklem 5.23 ile ifade edilebilir.

$$\phi = (M - Me) / (Mi - Me) \quad (5.23)$$

Biot sayısı nem transferi için nem transfer katsayısının (k) bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Nem difüzivitesi (D) ve karakteristik boyuta (Y) bağlı olarak Denklem 5.24' de gösterilmiştir.

$$Bi = kY / D \quad (5.24)$$

Nem difüzivitesi levha, silindir ve küre modeller için Denklem 5.25'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır [5].

$$D = SY^2 / \mu_1^2 \quad (5.25)$$

Denklem 5.24' deki nem transfer katsayısı aşağıdaki gibi düzenlenirse;

$$k = DBi / Y \quad (5.26)$$

ifadesi elde edilir.

Denklem 5.26' dan nem transfer katsayısı veya nem difüzivitesini direkt olarak hesaplayabilmek için Biot sayısı- kuruma katsayısı (Bi-S) korelasyonu Dinçer ve ark. [5] tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$Bi = aS^b \quad (5.27)$$

Burada a ve b sabitlerdir.

Kuruma parametreleri ve proses parametrelerinin tahmininde sözü geçen modelleme tekniğinde kullanılan hesaplama prosedürü aşağıdaki gibidir;

- Deneysel nem içerikleri ve kuruma zamanı verileri Denklem 5.23 kullanılarak bulunmuştur. Bu yöntem ile gereken nem transfer parametreleri (nem difüzivitesi, nem transfer katsayısı) ve kuruma parametrelerinin (kuruma katsayısı ve lag faktörü) bulunması gerekir.
- Boyutsuz nem içeriği dağılımının kuruma zamanına karşı üstel formdaki hali için (Denklem 5.22) en küçük kareler eğri uydurma metodu kullanılmıştır. Buradan lag faktörü (G) ve kuruma katsayısı (S) bulunmuştur.
- Karakteristik kök olan μ_1 levha, silindir ve küre modeller için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [5].

Levha için:

$$\mu_1 = -419.24G^4 + 2013.8G^3 - 3615.8G^2 + 2880.3G - 858.94 \quad (5.28)$$

Silindir için:

$$\mu_1 = -3.4775G^4 + 25.285G^3 - 6843G^2 + 82.468G - 35.638 \quad (5.29)$$

Küre için:

$$\mu_1 = -8.3256G^4 + 54.842G^3 - 134.01G^2 + 145.83G - 58.124 \quad (5.30)$$

Bu çalışmada kullanılan kızılıcık örnekleri küre şekilli olarak kabul edildiğinden Denklem 5.30' e göre hesaplama yapılmıştır.

- Nem difüzivitesi değerleri Denklem 5.25' den hesaplanmıştır.
- Denklem 5.26' dan nem transfer katsayısı hesaplanmıştır.
- Dinçer ve ark.'nın [5] çok sayıda literatür kaynaklarından aldıkları çeşitli ürünlerin nem içeriği değerlerini kullanarak belirledikleri korelasyon katsayısı (0.72) ile Denklem 5.27' yi geliştirmiş ve denklem 5.31 formuna dönüştürmüşlerdir.

$$Bi = 1.23888S^{1/3} \quad (5.31)$$

- Biot sayısı – kuruma katsayısı (Bi-S) korelasyonundan (Denklem 5.31) Biot sayısı hesaplanmıştır.

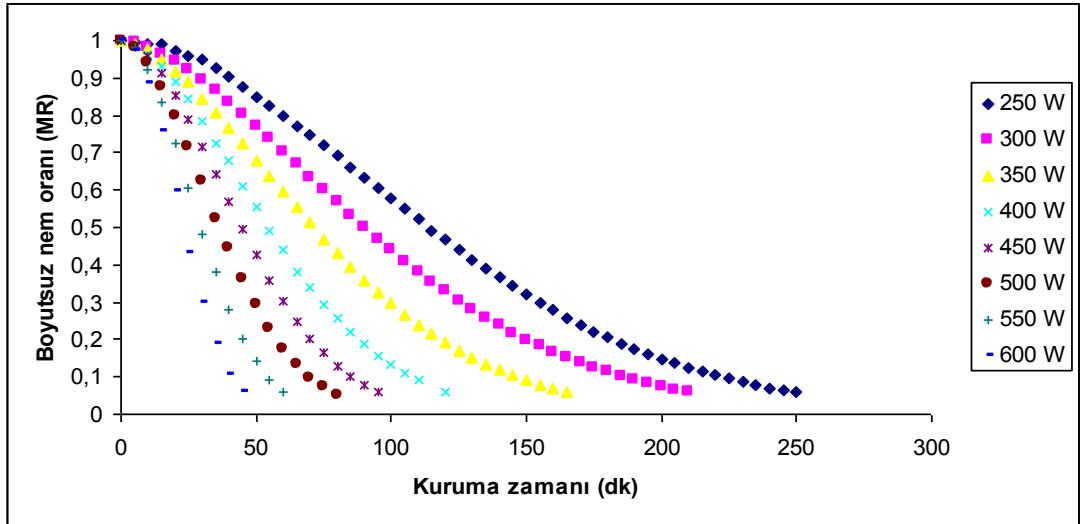
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

6.1. Kuruma Süresi

Kızılılık örneklerinin 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W infrared güçlerinde başlangıç nem içeriğinden güvenli bir şekilde depolanabilmesi için gerekli nem içeriğine (yaklaşık % 10) kadar geçen kuruma süreleri sırası ile 275, 235, 185, 135, 106, 86, 67 ve 50 dk' dır. Görüldüğü gibi infrared gücü arttıkça kuruma süresi kısalmaktadır. Kaya ve Orhan [43] konvektif bir kurutucuda 500 g ağırlığında kızılılık örneklerinin üç farklı sıcaklıkta (30-50 °C) kurutulması sırasında, kuruma süresinin 60-85 saat arasında değiştiğini ayrıca kurutma havası sıcaklığının artması ile kuruma süresinin azaldığını belirtmişlerdir. Anlaşıldığı üzere kızılılığın infrared ısısı ile kurutulması, havalı kurutmaya nazaran kuruma süresinde önemli ölçüde avantaj sağlamıştır. Benzer şekilde Nasıroğlu [23] kırmızıbiber, elma ve pırasa için, Sharma ve arkadaşları soğan dilimleri için, Das ve arkadaşları [60] üç farklı çeltik için, Onin [19] maydanoz, çilek, kırmızıbiber, yeşilbiber için infrared gücü veya infrared yoğunluğu arttıkça kuruma zamanının azaldığını belirtmişlerdir.

6.2. Nem Oranı Değişimi

Bu çalışmada kullanılan kızılılık örneklerinin nem oranı değerleri Denklem 5.3' e göre hesaplanmıştır. Boyutsuz nem oranı değerlerine karşı kuruma zamanı değerleri Şekil 6.1.'de grafiksel olarak sunulmuştur.

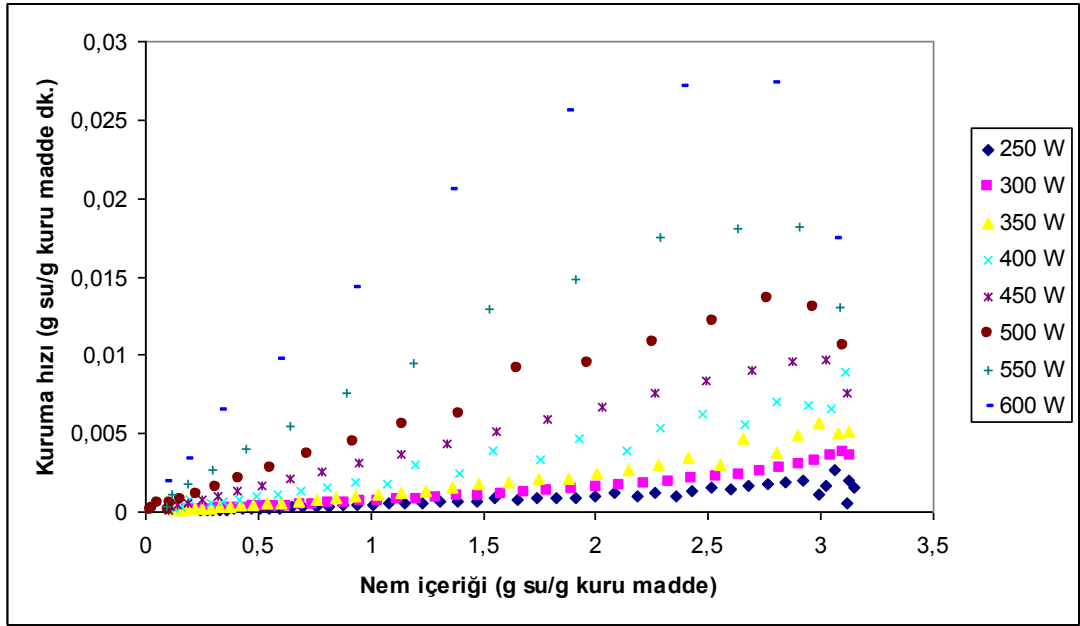


Şekil 6.1. Kızılıcığın farklı infrared çıkış güçlerinde boyutsuz nem oranının kuruma zamanı ile değişimi

Şekil 6.1 incelendiğinde kızılıcık örneklerinin nem oranlarındaki düşüş infrared gücünün artışı ile doğru orantılıdır.

6.3. Kuruma Hızındaki Değişimler

İnfrared ısıtma gücünün kuruma hızı üzerindeki etkisini incelemek için 250-600 W infrared güçlerinde kurutulan örneklerin Denklem 5.2' den hesaplanan kuruma hızı değerlerinin Denklem 5.1'den hesaplanan nem içeriği değerleri ile değişimi Şekil 6.2' de verilmiştir.



Şekil 6.2. Kızılıcığın farklı kurutma güçlerinde nem içeriği ile kuruma hızının değişimi

Kızılıcığın farklı infrared güçlerinde kurutulması esnasında Şekil 6.2 incelendiğinde çok kısa süreli bir ısınma evresinden sonra sabit kuruma hızını takiben azalan hızda kuruma periyodu gözlemlenmiştir. Sabit kuruma evresinin uzunluğu infrared gücünün artması ile önemli ölçüde azalmıştır. Benzer şekilde Dadalı [20] bamyanın mikrodalga ile kurutulmasında kısa süreli bir ısınma evresinden sonra sabit kuruma evresinin ardından azalan hızda kuruma periyodunun gözlemlendiğini belirtmiştir.

İnfrared gücünün kuruma hızı üzerine etkisi incelendiğinde ise infrared lamba gücü arttıkça kuruma hızının da arttığı belirlenmiştir.

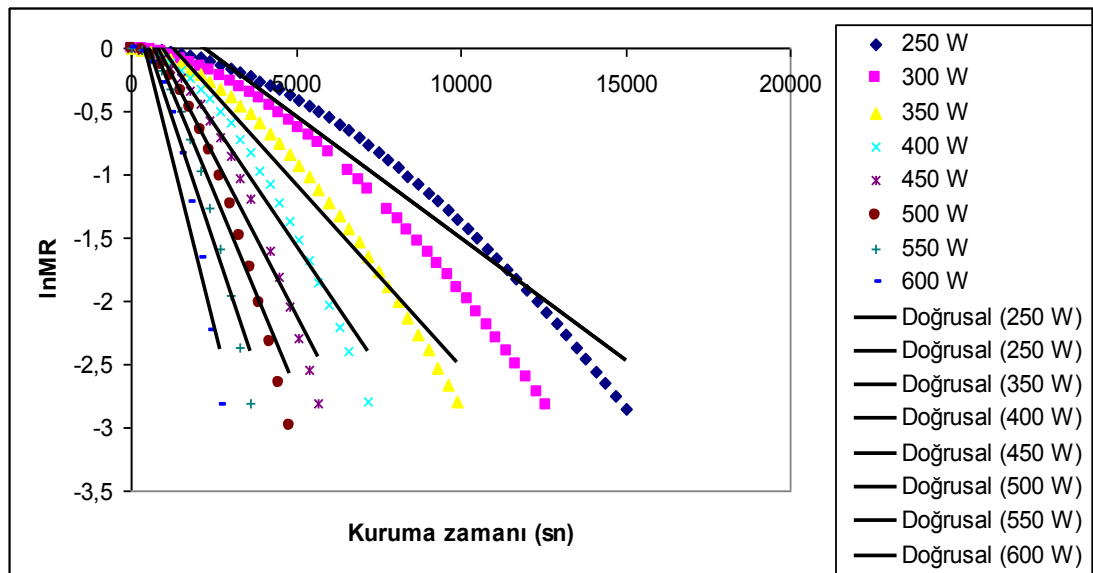
Öte yandan, Nasıroğlu [23] kırmızı biber ve elma dilimlerinin infrared tipli bir kurutucuda kurutulmasında yine kısa süreli bir ısınma aşamasından sonra azalan hız periyodunda görüldüğünü ve infrared lamba gücünün artması ile de kuruma hızının arttığını belirtmiştir. Aynı şekilde Doymaz [61] tatlı patates için, Das ve ark. [60] üç çeltik çeşidi için, Wang ve Sheng [62] şeftali için infrared gücünün artması ile kuruma hızının arttığını belirtmişlerdir. Özkan ve ark. [63] ıspanağın mikrodalga ile kurutulmasında kurumanın azalan hız periyodunda gerçekleştiğini, mikrodalga gücünün artmasıyla da kuruma hızının arttığını belirtmişlerdir.

6.4. Teorik Hesaplamalar

6.4.1. Difüzyon teorisi

6.4.1.1. Etkin difüzivite katsayıları

Etkin difüzivite katsayısı, kızılötesi örneklerinin 250- 600 W infrared kurutma güçlerinde kurutulmaları sırasında Denklem 5.8’ de verilen lineer denklemin eğiminden yararlanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.3’ de Denklem 5.8’deki $\ln(MR)$ teriminin kuruma zamanı (t) ile değişimini göstermektedir. İstatistiksel veriler ise Çizelge 6.1’ de verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı infrared çıkış güçlerinde kızılötesi örneğine ait $\ln(MR)$ değerlerinin kuruma zamanı ile değişimi

Çizelge 6.1. Kızılıcığın farklı infrared güçlerinde hesaplanan etkin difüzivite değerleri

Infrared gücü (w)	Eğim	D_{eff} (m ² /sn)	R ²
250	0.000193	9.93×10^{-11}	0.9544
300	0.000229	1.17×10^{-10}	0.9672
350	0.000289	1.48×10^{-10}	0.0964
400	0.000386	1.98×10^{-10}	0.9528
450	0.000500	2.56×10^{-10}	0.9468
500	0.000626	3.21×10^{-10}	0.9435
550	0.000782	4.01×10^{-10}	0.9324
600	0.001052	5.39×10^{-10}	0.9156

Çizelge 6.1 incelendiğinde infrared gücünün 250 W’ tan 600W’ a artmasıyla etkin difüzivite değerlerinin arttığı görülmektedir. Yüksek infrared güçlerinde gıda içerisinde absorplanan ısı miktarının artmasına bağlı olarak kütle transferinin artması ve kuruma süresinin azalması bu durumun sebebi olarak gösterilebilir. Düşük infrared güçlerinde etkin difüzivite değerlerinin daha düşük olmasının nedeni ise örneklerin daha yavaş kurumalarına bağlı olarak buharlaşması gereken suyun örneği daha geç terk etmesi ile kütle transferinin yavaşlamasıdır. Bu çalışmada, farklı infrared güçlerinde kızılıcık örnekleri için bulunan etkin difüzivite değerleri literatürde verilen çeşitli gıdalar için verilen 10^{-9} - 10^{-11} m²/s genel aralığının kısmen içindedir [64]. Doymaz [65], 50-70 °C sıcaklık aralığında bezelye örnekleri için etkin difüzivitenin 2.641×10^{-9} - 5.711×10^{-9} m²/s aralığında değiştiğini bulmuştur ve sıcaklığın artması ile etkin difüzivite değerlerinin de arttığını belirtmiştir. Benzer olarak Doymaz [8] 55-70 °C sıcaklık aralığında etkin difüzivite değerlerinin ön işlemlili domatesler için 5.65 - 7.53×10^{-10} m²/s, ön işlemsiz domatesler için 3.91 - 6.65×10^{-10} m²/s aralığında değiştiğini yine Doymaz [50] 50-65 °C sıcaklık aralığında kurutulan çileklerin etkin difüzivite katsayılarının sıcaklıkla arttığını ve D_{eff} değerlerinin ön işlemlili çilek örnekleri için 6.42×10^{-10} - 1.42×10^{-9} m²/s, ön işlemsiz örnekler için 4.95×10^{-10} - 1.09×10^{-9} m²/s aralığında değiştiğini belirtmiştir. Onin [19] maydanoz, çilek, kırmızıbiber ve yeşilbiberin etkin difüzivite değerlerinin infrared gücünün artması ile arttığını ve D_{eff} değerlerinin sırası ile 3.126×10^{-11} - 1.524×10^{-11} m²/s, 6.389×10^{-10} - 2.738×10^{-10} m²/s, 14.605×10^{-10} - 8.114×10^{-10} m²/s ve 12.424×10^{-10} - 6.212×10^{-10} m²/s aralığında değiştiğini bulmuştur. Dadalı [11] ise ıspanak için, mikrodalga çıkış gücünün artması ile D_{eff} değerlerinin 1.99×10^{-10} m²/s’ den 5.27×10^{-10} m²/s’ ye arttığını belirtmiştir.

6.4.1.2. Kinetik modeller

İnfrared kurutma tekniği kullanılarak kızılcık örneğinin 250-600 W infrared güçlerinde kurutulması sırasında elde edilen boyutsuz nem oranı değerlerinin kuruma zamanı ile değişimini içeren deneysel değerler literatürde sıkça kullanılan on farklı kurutma modeli ile modellenmiştir. Matematiksel modellere ait istatistiksel veriler sırasıyla Çizelge 6.2- 6.11’ de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılcık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Page kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri		R ²	χ^2	RMSE
	k	n			
250	0.0001	1.7956	0.9994	1.5826x10 ⁻⁵	0.0038
300	0.0003	1.6623	0.9997	7.3094x10 ⁻⁶	0.0025
350	0.0005	1.6629	0.9999	4.2459x10 ⁻⁶	0.0019
400	0.0005	1.7698	0.9996	1.9246x10 ⁻⁵	0.0040
450	0.0006	1.8513	0.9999	3.7804x10 ⁻⁶	0.0017
500	0.0008	1.8694	0.9999	7.4527x10 ⁻⁶	0.0024
550	0.0008	1.9658	1.0000	4.7154x10 ⁻⁶	0.0019
600	0.0009	2.1059	0.9999	1.3764x10 ⁻⁵	0.0033

Çizelge 6.3. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızcılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Logaritmik kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri			R ²	χ^2	RMSE
	a	k	b			
250	4.2770	0.0011	-3.2129	0.9753	0.0007	0.0253
300	6.1882	0.0009	-5.1353	0.9831	0.0004	0.0197
350	7.4315	0.0010	-6.3808	0.9859	0.0005	0.0206
400	5.3182	0.0020	-4.2495	0.9794	0.0011	0.0294
450	11.5346	0.0011	-10.4622	0.9840	0.0011	0.0298
500	10.1652	0.0015	-9.0895	0.9824	0.0014	0.0323
550	12.4978	0.0015	-11.4192	0.9826	0.0019	0.0369
600	2.0517	0.0150	-0.95756	0.9749	0.0044	0.0580

Çizelge 6.4. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızcılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Midilli ve ark. kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri				R ²	χ^2	RMSE
	a	k	n	b			
250	1.0058	-0.0211	0.5233	-0.0068	0.9960	0.00012	0.0099
300	0.9947	-0.0239	0.5881	-0.0099	0.9991	2.8093x10 ⁻⁵	0.0046
350	0.9902	-0.0347	0.3976	-0.0097	0.9987	5.3173x10 ⁻⁵	0.0063
400	1.0056	-0.0326	0.4747	-0.0136	0.9975	0.00014	0.0102
450	0.9980	-0.0418	0.5313	-0.0192	0.9983	0.00013	0.0096
500	0.9962	-0.0554	0.6150	-0.0312	0.9983	0.00015	0.0099
550	0.9993	-0.0613	0.3946	-0.0252	0.9969	0.00040	0.0155
600	1.0000	0.0009	2.1062	-4.4x10 ⁻⁶	1.0000	8.4881x10 ⁻⁶	0.0023

Çizelge 6.5. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızcılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Newton kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkeni ve sabiti	R ²	χ^2	RMSE
	k			
250	0.0045	0.9562	0.0026	0.0500
300	0.0058	0.9663	0.0019	0.0428
350	0.0079	0.9656	0.0024	0.0480
400	0.0109	0.9520	0.0043	0.0636
450	0.0143	0.9492	0.0062	0.0759
500	0.0176	0.9455	0.0068	0.0789
550	0.0236	0.9369	0.0101	0.0957
600	0.0372	0.9453	0.0161	0.1217

Çizelge 6.6. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızcılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Wang-Singh kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri		R ²	χ^2	RMSE
	a	b			
250	-0.0015	-2.7553x10 ⁻⁵	1.0000	3.35x10 ⁻⁷	0.0005
300	-0.0026	-3.5348 x10 ⁻⁵	0.9966	0.0001	0.0097
350	-0.0038	-4.5989 x10 ⁻⁵	0.9965	0.0001	0.0112
400	3.65x10 ⁻⁵	9.1219 x10 ⁻¹¹	0.9839	0.1312	0.3354
450	-0.0063	-9.6856 x10 ⁻⁵	0.9933	0.0005	0.0207
500	-0.0077	-0.0001	0.9927	0.0005	0.0221
550	-0.0100	-0.0001	0.9895	0.0011	0.0304
600	-0.0103	8.4232 x10 ⁻⁵	0.9730	0.0055	0.0677

Çizelge 6.7. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Henderson and Pabis kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri		R ²	χ^2	RMSE
	a	k			
250	1.0768	0.0055	0.9496	0.0013	0.0350
300	1.0652	0.0070	0.9613	0.0010	0.0300
350	1.0714	0.0094	0.9600	0.0013	0.0348
400	1.0885	0.0131	0.9438	0.0027	0.0488
450	1.1057	0.0171	0.9390	0.0041	0.0589
500	1.1047	0.0209	0.9351	0.0048	0.0627
550	1.1212	0.0279	0.9239	0.0076	0.0784
600	1.1651	0.0430	0.9294	0.0127	0.1028

Çizelge 6.8. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin İki terimli kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri				R ²	χ^2	RMSE
	a	k ₀	b	k ₁			
250	0.9990	0.0055	0.0778	0.0055	0.9496	0.0014	0.0350
300	0.9891	0.0080	0.0733	-0.0029	1.0000	7.0363x10 ⁻⁹	7.3977x10 ⁻⁵
350	1.0498	-6.79x10 ⁻⁶	0.2773	0.0269	0.9880	0.0004	0.0189
400	1.0248	0.0131	0.0636	0.0131	0.9438	0.0034	0.0488
450	1.0031	0.0171	0.1026	0.0171	0.9390	0.0050	0.0589
500	1.0161	0.0209	0.0885	0.0209	0.9351	0.0061	0.0627
550	1.0697	0.0279	0.0514	0.0279	0.9239	0.0102	0.0784
600	0.0666	0.0430	1.0984	0.0430	0.9294	0.0158	0.1028

Çizelge 6.9. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızcılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Verma kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri			R ²	χ^2	RMSE
	a	k	g			
250	2.2080	0.0111	0.0214	0.9992	2.2073x10 ⁻⁵	0.0043
300	1.8619	0.0129	0.0285	0.9993	1.8114x10 ⁻⁵	0.0038
350	2.0160	0.0171	0.0347	0.9992	2.8240x10 ⁻⁵	0.0047
400	6.0979	0.0293	0.0356	0.9974	0.0001	0.0106
450	6.0944	0.0371	0.0455	0.9972	0.0002	0.0126
500	-0.8293	0.0152	-0.0021	0.9914	0.0008	0.0246
550	-7.0478	0.0720	0.0611	0.9946	0.0006	0.0209
600	-4.8546	0.0020	0.0057	0.9712	0.0062	0.0684

Çizelge 6.10. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızcılık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Modifiye Page kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri		R ²	χ^2	RMSE
	k	n			
250	0.0456	0.0990	0.9562	0.0027	0.0500
300	0.0629	0.0935	0.9663	0.0020	0.0428
350	0.0748	0.1060	0.9656	0.0026	0.0480
400	0.0844	0.1300	0.9520	0.0047	0.0636
450	0.1017	0.1412	0.9492	0.0068	0.0759
500	0.1178	0.1499	0.9455	0.0076	0.0789
550	0.1550	0.1525	0.9369	0.0114	0.0957
600	0.2259	0.1649	0.9453	0.0177	0.1217

Çizelge 6.11. Çeşitli infrared güç seviyelerinde kurutulan kızılcık örneğinin kuruma hızının belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin Difüzyon yaklaşımı kurutma modeli ile karşılaştırılması ve istatistiksel analizi

Güç (W)	Model değişkenleri ve sabitleri			R ²	χ^2	RMSE
	a	k	b			
250	-0.4137	0.0089	-0.1300	0.9928	0.0002	0.0145
300	0.0364	0.0058	1.0080	0.9663	0.0022	0.0428
350	0.0621	0.0079	1.0019	0.9656	0.0028	0.0480
400	-2.4139	0.0395	0.6845	0.9972	0.0001	0.0109
450	-6.1208	0.0447	0.8416	0.9973	0.0002	0.0125
500	-4.3669	0.0570	0.7878	0.9968	0.0002	0.0139
550	-4.4824	0.0752	0.7798	0.9945	0.0006	0.0211
600	-7.5161	0.1021	0.8422	0.9926	0.0016	0.0348

Çizelge 6.2-6.11 incelendiğinde, elde edilen verilerin genel değerlendirilmesi sonucunda en yüksek R², en düşük RMSE ve χ^2 değerleri ile Page modelinin [11, 49, 50] kızılcık için kuruma kinetiğini açıklayan en iyi model olduğu belirlenmiştir.

Dadalı ve Özbek [40] pırasa için, Soysal ve arkadaşları [9] ise maydanoz için kuruma karakteristiğini tanımlamada en iyi modelin Midilli ve ark. [11, 50] olduğunu, Doymaz [61] tatlı patates için kuruma karakteristiğini tanımlayan en iyi modelin Logaritmik model [11, 50] olduğunu, Akbudak ve arkadaşları [63] ıspanak için, Doymaz [8] ise domates için kuruma karakteristiğinin belirlenmesinde Page modelinin [11, 49, 50] en uygun model olduğunu bulmuşlardır.

Page modeline ait kinetik sabiti değeri k' nın infrared çıkış gücü 250 W' dan 600 W' a doğru arttıkça arttığı belirlenmiştir. Akbudak ve arkadaşları [63] ıspanak için, Sarımeşeli [18] ise kişniş yaprakları için yapmış oldukları çalışmada mikrodalga çıkış gücü arttıkça kurutma hız sabiti k' nın arttığını bulmuşlardır.

6.4.2. Bi-S korelasyonu

Kızılciğa ait kuruma katsayısı (S), lag faktörü (G), Biot sayısı (Bi), karakteristik kök (μ_1), nem difüzivitesi (D) ve nem transfer katsayısı (k) gibi termal parametreler Çizelge 6.12’ de verilmiştir.

Çizelge 6. 12. Bi-S kuruma katsayısı korelasyonuna ait veriler

İnfrared Gücü (W)	G (-)	S (1/s)	Bi (-)	μ_1 (-)	D (m²/s)	k (m/s)x10⁸
250	5.2725	0.0002	0.0737	2.3445	9.5960x10 ⁻¹⁰	1.4154
300	4.9716	0.0002	0.0780	2.0412	1.3740x10 ⁻⁹	2.0827
350	5.0113	0.0003	0.0843	2.1912	1.6453x10 ⁻⁹	2.7765
400	5.1086	0.0004	0.0935	2.2453	2.1322x10 ⁻⁹	3.9874
450	5.3333	0.0005	0.1021	2.1861	2.6835x10 ⁻⁹	5.3224
500	6.5486	0.0007	0.1145	3.1020	2.0524x10 ⁻⁹	4.7008
550	5.5015	0.0008	0.1192	2.4958	3.5760x10 ⁻⁹	8.5255
600	5.4785	0.0011	0.1306	2.4799	4.7639x10 ⁻⁹	10.2444

Biot sayısı kurutmada ürün içinde kütle transferindeki direnci belirleyen önemli boyutsuz bir parametredir. Kızılciğ için biot sayısı değerleri infrared gücün artması ile artmıştır. 250-400 W infrared çıkış güçlerinde biot sayısının 0.1’ den küçük olması ürün içindeki nem difüzyonunda dış direncin etkili olduğunu göstermektedir. 450-600 W infrared çıkış güçlerinde ise biot sayısı değerlerinin 0.1’ den büyük olması ürün içindeki nem difüzyonunda hem iç hem de dış direncin etkili olduğunu göstermektedir. Nem difüzivitesi (D) ve nem transfer katsayısının (k) infrared çıkış gücünün artması ile genel olarak arttığı görülmektedir. Akpınar ve Dinçer [66] farklı sıcaklıklarda patlıcan dilimlerini kurutmuşlar, kurutma havası sıcaklığının 55 °C’ den 75 °C’ ye artırılması ile Bi-S korelasyonunu kullanarak hesapladıkları Biot sayısının 0.0729 değerinden 0.0898 değerine arttığını, yine sıcaklığa bağlı olarak nem difüzivitesinin 6.770x10⁻¹¹ m²/ s’ den 12.965x10⁻¹⁰ m²/s’ ye, kuruma katsayısının ise 1.974 m/s’ den 4.660 m/s’ ye sıcaklığın artmasına bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir.

6.5. Kızılıcığın Renk Değişimi Üzerine İnfrared Gücün Etkileri

Kızılıcığın taze ve farklı infrared güçlerinde kurutulmuş örnekleri için ölçülen renk parametreleri Çizelge 6.13'te verilmiştir.

Çizelge 6.13. Kızılıcığın kurutulmasında infrared ısıtma gücünün renk değişimi üzerine etkisi

İnfrared gücü (W)	L	a	b
taze	90.05	45.65	49.31
250	85.14	39.26	45.24
300	83.93	38.12	41.43
350	80.05	35.14	37.98
400	78.76	33.01	33.99
450	75.51	30.89	29.01
500	71.11	27.35	26.46
550	69.23	24.97	24.32
600	65.43	21.09	21.89

Çizelge 6.13 incelendiğinde kurutulmuş kızılıcık örneklerinin L (parlaklık) değerlerinin bütün infrared güçlerinde taze iken sahip olduğu L değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

Kurutulmuş kızılıcık örneklerinin taze iken sahip olduğu a (kırmızılık) değerinin infrared gücünün artmasına bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir.

Kurutulmuş kızılıcık örneklerinin b (sarılık) değerlerine bakıldığında ise taze kızılıcık örneklerinin b (sarılık) değerinin infrared çıkış gücünün artmasıyla azaldığı bulunmuştur.

Bu sonuçlara bağlı olarak taze kızılıcık örneklerinin kurutulmuş örneklerle göre daha parlak kırmızı renge sahip olduğu belirlenmiştir. Sarımeşeli [18] kişniş yaprakları için, Maskan [67] muz için mikrodalga çıkış gücünün kurutulmuş örneklerin rengi üzerinde etkili olmadığını belirtmişlerdir. Nasıroğlu [23] ise infrared ısıtma tekniği ile kuruttuğu kırmızı biber örneklerinin taze örneklerle kıyasla yer yer

koyuluklarına rağmen örneklerin daha güzel bir kırmızı ve yeşil renge sahip olduklarını belirtmiştir.

6.6. İnfrared Gücünün Kızılığın Rehidrasyon Kapasitesi Üzerindeki Etkisi

Kurutulmuş kızılçık örnekleri için Denklem 5.4' e göre hesaplanan rehidrasyon kapasitesi değerleri Çizelge 6.14' te verilmiştir.

Çizelge 6.14. Kızılığın kurutulmasında infrared ısıtma gücünün rehidrasyon kapasitesi üzerine etkisi

İnfrared gücü (W)	Su Sıcaklığı (°C)			
	20	40	60	80
250	0.249	0.450	0.611	0.691
300	0.255	0.490	0.632	0.655
350	0.283	0.512	0.680	0.685
400	0.325	0.654	0.710	0.745
450	0.394	0.699	0.750	0.760
500	0.472	0.711	0.783	0.810
550	0.491	0.754	0.800	0.870
600	0.556	0.800	0.820	0.890

Çizelge 6.14 incelendiğinde infrared gücü 250 W' dan 600 W' a doğru arttıkça rehidrasyon kapasitesinin de arttığı görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi infrared gücü arttıkça kuruma süresi azalmakta ve örneklerin ışınlara maruz kalma süresi kısalmaktadır. Dolayısıyla, ürünlerin yapısal bozunmaları da daha az olmaktadır ve kuru ürün daha fazla su absorplayabilmektedir. Ayrıca ürünlerin içinde bulunduğu suyun sıcaklığının artması ile rehidrasyon kapasitesinin de arttığı

görülmektedir. Sıcaklık artışının ürün içindeki difüzyonu hızlandırması bu durumun nedenidir.

Benzer şekilde Doymaz [61] tatlı patates örnekleri için, Nasıroğlu [23] kırmızı biber örnekleri için infrared gücün artması ile rehidrasyon kapasitesinin arttığını, Dadalı ve ark. [11] mikrodalga ile ıspanağın kurutulmasında mikrodalga çıkış gücünün artması ile kurutulmuş ıspanağın rehidrasyon kapasitesinin arttığını belirtmişlerdir.

6.7. İnfrared Gücünün Kızılçık Materyallerinin C vitamini Kayıpları Üzerindeki Etkisi

Taze ve farklı infrared güçlerinde kurutulan kızılçık örneklerinin C vitamini değerleri Çizelge 6.15’ te verilmiştir.

Çizelge 6.15. Taze ve farklı infrared güçleri ile %10 nem içeriğine kadar kurutulmuş kızılçık örneklerinde C vitamini değişimi

İnfrared gücü (W)	C vitamini (mg/100 g)
taze	58.0
250	52.0
300	49.2
350	45.7
400	39.6
450	31.9
500	21.0
550	15.0
600	7.0

Çizelge 6.15 incelendiğinde infrared gücün artması ile C vitamini kayıplarının arttığı ve kurutulmuş örneklerin C vitamini değerlerinin taze örneklerle göre düşük olduğu saptanmıştır. Kızılçık örneklerinin kurutulması esnasında maruz

kaldığı sıcaklık değerinin artmasına bağlı olarak ürün içindeki C vitamininin bozunması bu durumun nedeni olarak gösterilebilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kızılıcığın bir infrared kurutucuda kurutulmasında 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W aralığında değişen infrared kurutma güçlerinin kütle transfer katsayılarına, C vitamini kayıplarına, renk parametrelerine ve rehidrasyon kapasitesi üzerine etkisi araştırılmıştır. İnfrared gücü arttıkça kuruma süresinin azaldığı tespit edilmiştir. İnfrared gücünün kuruma hızı üzerine etkisi incelendiğinde, infrared gücün artması ile kuruma hızının arttığı belirlenmiştir. Kurutma işleminin çok kısa süreli bir ısınma evresinden sonra hem sabit hem de azalan hızda kuruma periyodu gözlemlenmiştir. Kızılıcık örneklerinin kuruma kinetiğini tanımlamak için seçilen 10 modelden en yüksek R^2 , en düşük RMSE ve χ^2 değerleri ile Page modelinin deneysel ve tahmin edilen nem oranı değerleri arasında en iyi uyum sağlayan model olduğu belirlenmiştir. Etkin nem difüzivitesinin artan infrared gücü ile arttığı tespit edilmiştir. Etkin nem difüzivite değerleri 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W infrared çıkış güçleri için sırasıyla, $9.93 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.98 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $2.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.01 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $5.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. İnfrared ısısı ile kızılıcığın kurutulmasında kütle transfer parametreleri incelendiğinde lag faktörünün (G) infrared gücün artmasından etkilenmediği kuruma katsayısının (S) artan infrared gücü ile arttığı belirlenmiştir. Artan infrared gücü ile Biot sayısının arttığı, 250-400 W aralığında kızılıcığın kurutulmasında gerçekleşen kütle transferinde dış direncin etkili olduğu, 450-600 W infrared güçlerinde ise hem iç hem de dış direncin etkili olduğu tespit edilmiştir. Etkin difüzivite değerleri 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 ve 600 W infrared güçleri için sırasıyla 9.5960×10^{-10} , 1.3740×10^{-9} , 1.6453×10^{-9} , 2.1322×10^{-9} , 2.6835×10^{-9} , 2.0524×10^{-9} , 3.5760×10^{-9} , $4.7639 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Etkin difüzivite (D) ve kütle transfer katsayısının (k) infrared gücün artmasıyla arttığı tespit edilmiştir.

Taze kızılıcık örneklerinin kurutulmuş örneklere göre daha parlak kırmızı renge sahip olduğu belirlenmiştir. İnfrared çıkış gücü arttıkça kızılıcık örneklerinin rehidrasyon kapasitesinin de arttığı tespit edilmiştir. İnfrared gücün artması ile C vitamini kayıplarının da arttığı kurutulmuş kızılıcık örneklerindeki C vitamini değerlerinin taze örneklere göre daha düşük olduğu bulunmuştur.

Öneri olarak, kızılığın infrared ısısı ile kurutulması prosesinde deney sonuçlarını daha iyi temsil edecek yeni bir Biot korelasyonu mutlaka geliştirilmelidir. Ayrıca endüstriyel uygulamalar için kuruma hızı, C vitamini kayıpları ve kalite parametrelerinin dikkate alınmasıyla optimum kuruma şartları belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Aktaş, İ. Ceyhan ve H. Doğan, *Güneş enerjili kurutma sistemlerinin, fındık kurutulmasına uygulanabilirliği*, **Teknoloji**, cilt 7, sayı 4 (2004) 557–564.
- [2] Soner Çelen. *Mikroalga ve vakum kurutucuda bazı gıda ürünlerinin kurutulması ve modellenmesi*. Doktora tezi, Trakya üniversitesi, Türkiye, 2010.
- [3] Ahmet Kaya. *Kurutmada ısı ve kütle transferinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniv., Trabzon, 2008.
- [4] T. Dikbasan, *Determination of effective parameters for drying of apples*, **Master of Science**, İzmir Institute of Techonolgy, December 2007.
- [5] I. Dincer, M.M. Hussain, vd., *Development of a new drying correlation for practical applications*, **International Journal of Energy Research**, 26 (2002), 245-251.
- [6] C. Akosman ve M. Kalander, *Soya fasülyesinin kuruma karakteristiğinin tepsili kurutucuda incelenmesi*. **Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 16(2) 2004, 243-251.
- [7] V. Mrkic, M. Ucrainczyk, B. Tripalo, *Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective drying of Broccoli*, **Journal of Food Engineering**, 79 (2007), 640-646.
- [8] İ. Doymaz, *Air drying characteristics of Tomatoes*, **Journal of Food Engineering**, 78 (2007), 1291-1297.
- [9] Y. Soysal, S. Öztekin ve Ö. Eren, *Microwave drying of parsley: modelling, kinetics and energy aspect*, **Biosystems Engineering**, 93(4) 2006, 403-413.
- [10] İ.T. Toğrul, H. Toğrul, *Determination of moisture transport parameters of some fruits under open sun drying conditions*, **International Journal of Green Energy**, 4:4 (2007), 397-408.
- [11] G. Dadalı, E. Demirhan, B. Özbek, *Microwave heat treatment of spinach: drying kinetics and effective moisture diffusivity*, **An International Journal**, 25:10,1703-1712.
- [12] S. Karaaslan ve İ. K. Tuncer, *Kırmızıbiberin fan destekli mikroalga ile kurutulmasında kuruma karakteristiklerinin incelenmesi ve uygun kuruma modelinin belirlenmesi*, **KSÜ Doğa Bil. Derg.**, 12(2) 2009.
- [13] H. Kocabıyık, D. Tezer, *Drying of carrots slices using infrared radiation*, **International journal of food science an techonology**, 44 (2009), 953-959.

- [14] G. Dadalı ve B. Özbek, *Kinetic thermal degradation of vitamin C during microwave drying of okra and spinach*, **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, 60(1) (2009), 21-31.
- [15] E. Demirhan ve B. Özbek, *Drying kinetics and effective moisture diffusivity of purslane undergoing microwave heat treatment*, **Korean J. Chem Eng.**, 27(5)2010, 1377-1383.
- [16] S. Darıcı ve S. Şen, *Kivi meyvesinin kurutulmasında kurutma havası hızının kurumaya etkisinin incelenmesi*. **X. Tesisat Mühendisliği Kongresi**, İzmir, Nisan 13-16, (2011).
- [17] T. Jurandic, B. Tripalo, *Biot number-lag factor (bi-g) correlation for tunnel drying of baby food*, **African Journal of Biotechnonology**, vol. 10(59)(2011), pp 12706-12703.
- [18] A. Sarimeseli, *Microwave drying charasteristic of coriander (Coriandrum Sativum L.) leaves*, **Energy Conversion and Management**, Vol. 52, Issue 2 (2011), 1449-1453.
- [19] Meltem Onin. *Bazı meyve ve sebzelerin infrared kurutucuda kurutulmasının deneysel ve teorik olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya,2012.
- [20] Gökçe Dadalı. *Bamya ve Ispanağın Mikrodalga Tekniği Kullanılarak Kurutulması, Doku ve Renk Özelliklerinin İncelenmesi ve Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [21] İ. Saldamlı, E. Saldamlı, *Gıda Endüstrisi Makineleri*, **Savaş Yayınevi**, Ankara, 2004.
- [22] İbrahim Doymaz. *Üzüm ve Kahramanmaraş biberinin kuruma karakteristiklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik üniversitesi, Türkiye, 1998.
- [23] Şahin Nasıroğlu. *Kırmızıbiber, elma ve pırasanın kurutulmasında infrared tekniğinin kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, 2007.
- [24] A. Güngör, N. Özbalta, in: *Teskon Program Bildirileri/ TES 046, Endüstriyel Kurutma Sistemleri*, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 1997, pp 737-747.
- [25] Ö. L. Gürses, *Gıda İşleme Mühendisliği- II*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 963, Ankara, 1986.
- [26] G. Bingöl, *Gıda işlemede kurutma teknolojilerinin temel ilkeleri*, IV. İstanbul sanayi odası, İstanbul Teknik Üniv., **Doktora/Yüksek lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi**.

- [27] <http://www.food.hacettepe.edu.tr/turkish/ouyeleri/gmu809/Kizilotesi.pdf> (on- line access on 22 july,2014).
- [28] S. Ö. Özkoç, *Kızılötesi ve kızılötesi kombinasyon ısıtma teknolojilerinin gıda işleme uygulamalarında kullanımı*, **Derleme**, 2009.
- [29] A. Çağlar, İ. Türk Toğrul, H. Toğrul, *Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying*, **Food and Bioproduct Processing**, 87 (2009), 292-300.
- [30] B. Özbek, G. Dadalı, *Thin layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment*, **Journal and Food Engineering**, 83 (2007), 541-549.
- [31] B. Polatoğlu, A. V. Beşe, *Konvektif, mikrodalga ve güneşte kurutma prosesleri ile kıvılcık (*Cornus mas L.*) meyvesinin kuruma kinetiğinin incelenmesi ve matematiksel modellenmesi*, **Onuncu Ulusal Kimya Mühendisliği kongresi**, 3-6 Eylül 2012, Koç Üniversitesi, İstanbul.
- [32] G.P. Sharma, R. C. Verma, P.B. Pathare, *Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of onion slices*, **Journal of Food Engineering**, 71 (2005), 282-286.
- [33] S.O. Keskin ve ark., *Halogen lamp- microwave combination baking of cookies*, **Eur Food Res Technol**, 220 (2005), 546-551.
- [34] G. Sumnu ve ark., *Optimization of halogen lamp- microwave combination baking of cakes*, **Eur Food Res Technol**, 221 (2005), 61-68.
- [35] P. Demirekler ve ark., *Optimization of bread baking in halogen lamp-microwave combination oven by response surface methodology*, **Eur Food Res Technol**, 219 (2004), 341-347.
- [36] C. Akosman, *Küp şekerin infrared enerjisi ile kurutulması*, **F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 15:4 (2003), 561-568.
- [37] B. Cemeroglu, *Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi*, 2. Cilt, Bizim Grup Basımevi, Ankara, 2009.
- [38] Adnan Topuz, *Akışkan yatakta fındık kurutma prosesinde ısı ve kütle geçişinin incelenmesi*, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [39] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, *Gıda teknolojisi, sebzeleri kurutma*, **Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi**, Ankara, 2007.
- [40] G. Dadalı, B. Özbek, *Microwave heat treatment of leek: drying kinetic and effective moisture diffusivity*, **International Journal of Food Science and Technology**, 43 (2008), 1443-1451.

- [41] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, *Gıda Teknolojisi, Gıdalarda askorbik asit tayini, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi*, Ankara, 2008.
- [42] E. Selçuk, K. Özrenk, *Erzincan yöresinde yetiştirilen kıvılcıkların (Cornus mas L.) fenolojik ve pomolojik özelliklerinin belirlenmesi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(4) (2011), 23-30.
- [43] A. Kaya, O. Aydın, *Kurutma havası sıcaklığının kıvılcığın kuruma süresi ve sorpsiyon eğrisine etkisinin deneysel incelenmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28, 2(2008), 45-49.
- [44] M. Didin ve ark., *Malatya’ da yetiştirilen bazı kıvılcık çeşitlerinin nektara işlenmeye uygunluklarının belirlenmesi üzerinde bir araştırma, Gıda*, 25 (2000) 6, 435-441.
- [45] H. Demir, *Bazı yabani meyve türlerinin besin değerlerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma, Bahçe*, 31 (1-2) (2002), 33-38.
- [46] S. Tural, İ. Koca, *Physico-chemical and antioxidant properties of Cornelian Cherry fruits (Cornus mas L.)grown in Turkey, Scientia Horticulturae*, 116 (2008), 362-366.
- [47] N. Türkoğlu ve ark.,*Konya’nın Derebucak ilçesinde yetişen kıvılcıkların (Cornus mas. L) seleksiyonu üzerine bir ön çalışma,Yüzüncü yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü*, Van.
- [48] C. Gülbahar ve ark.,*Bazı sebzelerin çiğ ve pişmiş durumlarındaki C vitamini tayini*, Meb Tübitak, Türkiye Sanayi Sevk ve İdare Enstitüsü, Gebze, 2009.
- [49] D.K. Apar, G. Dadalı ve B. Özbek, *Microwave drying kinetics of Okra, An International Journal*, 25:5, 917–924.
- [50] İ. Doymaz, *Convective drying kinetics of strawberry, Chemical Engineering and Processing*,47 (2008), 914-919.
- [51] H. Kocabıyık, D. Tezer, *Drying of carrot slices using infrared radiation, International Journal of Food Science and Technology*, 44 (2009), 953-959.
- [52] A.K. Haghi, N. Amaniford, *Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products, Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol.25, No.03 (2008), pp 491-501.
- [53] B. Z. Uysal, *Kütle Transferi Esasları ve Uygulamaları*, Gazi Üniversitesi, Yayın No 211, Ankara, 2003.
- [54] İ. Doymaz, *Air drying characteristics of thin layer Carrots, Journal of Food Engineering*, 61 (2004), 359-364.

- [55] Tuğrul, vd., *Drying characteristics of dill and Parsley leaves*, **Journal of Food Engineering**, 77 (2006), 559-565.
- [56] O. İsmail, İ. Doymaz, *Drying characteristics of Sweet Cherry*, **Food and Bioproducts Processing**, 89 (2011), 31-38.
- [57] M. Zielinska, M. Markowski, *Air drying characteristics and moisture diffusivity of Carrots*, **Chemical Engineering and Processing**, 49 (2010), 212–218.
- [58] İ. Doymaz ve M. Pala, *Hot- air drying characteristics of red pepper*, **Journal of Food Engineering**, 55 (2002), 331-335.
- [59] D. Arslan, M. M. Özcan, *Evaluation of drying methods with respect of Savory Leaves*, **Food Bioprocess Technol**, 11947-010-0498-y.
- [60] İ. Das, S. K. Das, S. Bal, *Drying Performance of a batch type vibration aided infrared dryer*, **Journal of Food Engineering**, 71 (2004), 129-133.
- [61] İ. Doymaz, *Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea Batatas* L.) slices*, **J Food Sci Technol**, DOI 10 1007 (2010), s13197-010-0217-8.
- [62] J. Wang, K. Sheng, *Far infrared and microwave drying of peach*, **Lebensmittel-Wissenschaft und- Technologie**, 39 (2006), 247-255.
- [63] I.A.Ozkan, B. Akbudak, N. Akbudak, *Microwave drying characteristic of spinach*, **Journal of Food Engineering**, 78 (2007), 577-583.
- [64] P. S. Madamba ve ark., *The thin-layer drying characteristics of garlic slices*, **J. Food Eng.**, 29(1996), 75-97.
- [65] İ. Doymaz, *Drying behaviour of gren beans*, **Journal of Food Engineering**, 69 (2005), 161-165.
- [66] E. K. Akpınar, I. Dincer, *Moisture transfer models for slab drying*, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 32 (2005), 80-93.
- [67] M. Maskan, *Microwave –air and microwave finish drying of banana*, **Journal of Food Engineering**, 44 (2000), 71-78.
- [68] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Brunel Universty, Clarendon Press, Second Edition, Oxford, 1975.

EKLER

EK 1. 250 W İnfrared Gücünde Kızılılık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.1079	3.1528	1.0000	0.0000
5	372.4280	3.1452	0.9976	0.0015
10	370.6718	3.1256	0.9914	0.0019
15	369.9785	3.1179	0.9889	0.0005
20	365.1467	3.0641	0.9718	0.0026
25	361.3618	3.0220	0.9585	0.0016
30	358.3980	2.9890	0.9480	0.0011
35	352.2180	2.9202	0.9262	0.0019
40	345.4581	2.8450	0.9023	0.0018
45	338.1581	2.7637	0.8766	0.0018
50	330.6682	2.6804	0.8501	0.0016
55	323.6148	2.6019	0.8252	0.0014
60	315.4283	2.5108	0.7963	0.0015
65	307.7784	2.4256	0.7693	0.0013
70	301.5147	2.3559	0.7472	0.0009
75	293.4615	2.2663	0.7188	0.0011
80	285.8629	2.1817	0.6920	0.0010
85	276.9086	2.0820	0.6603	0.0011
90	269.2286	1.9965	0.6332	0.0009
95	261.7087	1.9128	0.6067	0.0008
100	253.7755	1.8245	0.5787	0.0008
105	245.7590	1.7353	0.5504	0.0008
110	238.0858	1.6499	0.5233	0.0007
115	229.4404	1.5537	0.4928	0.0008
120	221.8119	1.4688	0.4658	0.0007
125	214.3641	1.3859	0.4395	0.0006
130	207.1160	1.3052	0.4140	0.0005
135	200.0843	1.2269	0.3891	0.0005

EK 1- Devam

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
140	193.2826	1.1512	0.3651	0.0005
145	186.7227	1.0782	0.3420	0.0005
150	180.4135	1.0080	0.3197	0.0004
155	174.3621	0.9407	0.2983	0.0004
160	168.5733	0.8762	0.2779	0.0004
165	163.0501	0.8147	0.2584	0.0003
170	157.7937	0.7562	0.2398	0.0003
175	152.8036	0.7007	0.2222	0.0003
180	148.0777	0.6481	0.2055	0.0002
185	143.6126	0.5984	0.1898	0.0002
190	139.4040	0.5516	0.1749	0.0002
195	135.4460	0.5075	0.1609	0.0002
200	131.7322	0.4662	0.1478	0.0002
205	128.2553	0.4275	0.1356	0.0001
210	125.0072	0.3913	0.1241	0.0001
215	121.9794	0.3576	0.1134	0.0001
220	119.1631	0.3263	0.1035	0.0001
225	116.5488	0.2972	0.0942	0.0001
230	114.1271	0.2702	0.0857	0.0001
235	111.8884	0.2453	0.0778	0.0001
240	109.8232	0.2223	0.0705	0.0000
245	107.9216	0.2012	0.0638	0.0000
250	106.1743	0.1817	0.0576	0.0000
255	104.5719	0.1639	0.0519	0.0000
260	103.1052	0.1475	0.0468	0.0000
265	101.7652	0.1326	0.0420	0.0000
270	100.5434	0.1190	0.0377	0.0000
275	99.4314	0.0998	0.0338	0.0000

EK 2. 300 W İnfrared Gücünde Kızılçık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.7278	3.1528	1.0000	0.0000
5	372.1275	3.1350	0.9943	0.0035
10	368.6932	3.0968	0.9822	0.0038
15	363.9337	3.0439	0.9654	0.0035
20	358.0960	2.9791	0.9449	0.0032
25	351.359	2.8210	0.9211	0.0029
30	343.8702	2.7308	0.8947	0.0027
35	335.7578	2.7308	0.8661	0.0025
40	327.1374	2.6350	0.8357	0.0023
45	318.1139	2.5348	0.8039	0.0022
50	308.7837	2.4311	0.7711	0.0020
55	299.2353	2.3250	0.7374	0.0019
60	289.5496	2.2174	0.7033	0.0017
65	279.8007	2.1090	0.6689	0.0016
70	270.0558	2.0000	0.6346	0.0015
75	260.3753	1.8932	0.6004	0.0014
80	250.8134	1.7869	0.5667	0.0013
85	241.4178	1.6825	0.5336	0.0012
90	232.2304	1.5805	0.5013	0.0011
95	223.2873	1.4811	0.4697	0.0010
100	214.6190	1.3848	0.4392	0.0009
105	206.2508	1.2918	0.4097	0.0008
110	198.2032	1.2024	0.3813	0.0008
115	190.4920	1.1167	0.3541	0.0007
120	183.1289	1.0348	0.3282	0.0006
125	176.1217	0.9570	0.3035	0.0006
130	169.4746	0.8831	0.2801	0.0005
135	163.1886	0.8133	0.2579	0.0005

EK 2- Devam

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
140	157.2620	0.7474	0.2370	0.0004
145	151.6904	0.6855	0.2174	0.0004
150	146.4674	0.6275	0.1990	0.0003
155	141.5846	0.5732	0.1818	0.0003
160	137.0320	0.5226	0.1657	0.0003
165	132.7983	0.4756	0.1508	0.0002
170	128.8713	0.4319	0.1370	0.0002
175	125.2378	0.3916	0.1242	0.0002
180	121.8840	0.3543	0.1123	0.0002
185	118.7959	0.3200	0.1015	0.0001
190	115.9589	0.2885	0.0915	0.0001
195	113.3588	0.2596	0.0823	0.0001
200	110.9811	0.2332	0.0739	0.0001
205	108.8116	0.2090	0.0663	0.0001
210	106.8364	0.1871	0.0593	0.0001
215	105.0420	0.1672	0.0530	0.0000
220	103.4153	0.1491	0.0473	0.0000
225	101.9437	0.1327	0.0421	0.0000
230	100.6151	0.1180	0.0374	0.0000
235	99.4181	0.1047	0.0332	0.0000

EK 3. 350 W İnfrared Gücünde Kızılçlık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.5000	3.1528	1.0000	0.0000
5	371.2015	3.1272	0.9918	0.0051
10	366.6803	3.0769	0.9759	0.0050
15	359.0148	2.9917	0.9489	0.0056
20	350.2470	2.8942	0.9179	0.0048
25	341.7244	2.7995	0.8879	0.0037
30	329.0121	2.6581	0.8431	0.0047
35	319.3851	2.5511	0.8091	0.0030
40	307.1263	2.4148	0.7659	0.0034
45	294.9532	2.2794	0.7229	0.0030
50	282.7170	2.1434	0.6798	0.0027
55	270.4869	2.0074	0.6367	0.0024
60	259.2057	1.8820	0.5969	0.0020
65	246.9383	1.7456	0.5536	0.0020
70	235.1520	1.6145	0.5121	0.0018
75	223.2014	1.4817	0.4699	0.0017
80	212.3515	1.3610	0.4316	0.0015
85	201.9161	1.2450	0.3948	0.0013
90	192.0078	1.1348	0.3599	0.0012
95	182.6534	1.0308	0.3269	0.0010
100	173.8692	0.9331	0.2959	0.0009
105	165.6628	0.8419	0.2670	0.0008
110	158.0336	0.7571	0.2401	0.0007
115	150.9744	0.6786	0.2152	0.0006
120	144.4722	0.6063	0.1923	0.0006
125	138.5092	0.5400	0.1712	0.0005
130	133.0638	0.4794	0.1520	0.0004
135	128.1114	0.4244	0.1346	0.0003

EK 3- Devam

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
140	128.1114	0.3745	0.1187	0.0003
145	123.6255	0.3295	0.1045	0.0003
150	119.5778	0.2890	0.0916	0.0002
155	115.9394	0.2528	0.0802	0.0002
160	112.6810	0.2205	0.0699	0.0002
165	109.7734	0.1917	0.0608	0.0001
170	107.1881	0.1663	0.0527	0.0001
175	104.8974	0.1438	0.0456	0.0001
180	102.8745	0.1240	0.0393	0.0001
185	101.0941	0.1066	0.3380	0.0000

EK 4. 400 W İnfrared Gücünde Kızılclık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.0400	3.1528	1.0000	0.0000
5	369.0533	3.1084	0.9859	0.0088
10	363.1017	3.0421	0.9649	0.0066
15	353.9755	2.9405	0.9326	0.0067
20	341.3047	2.7995	0.8879	0.0070
25	328.8588	2.6609	0.8439	0.0055
30	312.1284	2.4747	0.7849	0.0062
35	295.4319	2.2886	0.7259	0.0053
40	281.5613	2.1344	0.6769	0.0038
45	262.5858	1.9232	0.6099	0.0046
50	247.5740	1.7560	0.5569	0.0033
55	228.3061	1.5415	0.4889	0.0039
60	215.0054	1.3935	0.4419	0.0024
65	197.4334	1.1979	0.3799	0.0030
70	186.1950	1.0727	0.3402	0.0017
75	173.6048	0.9326	0.2958	0.0018
80	162.1242	0.8048	0.2552	0.0015
85	151.7651	0.6895	0.2186	0.0013
90	142.5114	0.5864	0.1860	0.0011
95	134.3243	0.4953	0.1571	0.0009
100	127.1480	0.4154	0.1317	0.0007
105	120.9137	0.3460	0.1097	0.0006
110	115.5446	0.2862	0.0908	0.0005
115	110.9597	0.2352	0.0746	0.0004
120	107.0766	0.1920	0.0609	0.0003
125	103.8141	0.1556	0.0493	0.0002
130	101.0945	0.1254	0.0397	0.0002
135	98.8450	0.1003	0.0318	0.0001

EK 5. 450 W İnfrared Gücünde Kızılçık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.9600	3.1528	1.0000	0.0000
5	370.5558	3.1150	0.9880	0.0075
10	361.8674	3.0185	0.9574	0.0096
15	348.9522	2.8751	0.9119	0.0095
20	332.6943	2.6945	0.8546	0.0090
25	313.9628	2.4865	0.7886	0.0083
30	293.6061	2.2604	0.7169	0.0075
35	272.4320	2.0252	0.6423	0.0067
40	251.1339	1.7888	0.5673	0.0059
45	230.3575	1.5581	0.4941	0.0051
50	210.5959	1.3386	0.4245	0.0043
55	192.2285	1.1346	0.3598	0.0037
60	175.5143	0.9490	0.3010	0.0030
65	160.6009	0.7834	0.2484	0.0025
70	147.5384	0.6384	0.2024	0.0020
75	136.2996	0.5135	0.1628	0.0016
80	126.7831	0.4079	0.1293	0.0013
85	118.8616	0.3199	0.1014	0.0010
90	112.3681	0.2478	0.0786	0.0008
95	107.1255	0.1896	0.0601	0.0006
100	102.9550	0.1433	0.0454	0.0004
105	99.6850	0.1070	0.0339	0.0003

EK 6. 500 W İnfrared Gücünde Kızılclık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.2800	3.1528	1.0000	0.0000
5	368.5025	3.0996	0.9831	0.0106
10	356.8044	2.9695	0.9418	0.0130
15	338.4026	2.7648	0.8769	0.0136
20	316.6475	2.5227	0.8001	0.0121
25	292.3566	2.2525	0.7144	0.0108
30	266.6976	1.9670	0.6239	0.0095
35	238.0526	1.6483	0.5228	0.0091
40	215.4904	1.3973	0.4432	0.0062
45	192.8588	1.1455	0.3633	0.0055
50	172.6186	0.9204	0.2919	0.0045
55	154.4917	0.7187	0.2279	0.0036
60	139.6419	0.5535	0.1755	0.0027
65	127.4601	0.4180	0.1325	0.0020
70	117.7146	0.3096	0.0981	0.0015
75	110.1038	0.2249	0.0713	0.0011
80	104.2969	0.1603	0.0508	0.0008
85	99.9654	0.1121	0.0355	0.0005

EK 7. 550 W İnfrared Gücünde Kızılçık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.3778	3.1528	1.0000	0.0000
5	367.5334	3.0877	0.9793	0.0130
10	351.1882	2.9060	0.9217	0.0181
15	326.7789	2.6345	0.8356	0.0180
20	295.3697	2.2851	0.7248	0.0174
25	261.9854	1.9138	0.6070	0.0148
30	226.9632	1.5243	0.4834	0.0129
35	197.2145	1.1934	0.3785	0.0094
40	169.8264	0.8888	0.2819	0.0076
45	147.7176	0.6429	0.2039	0.0054
50	129.7502	0.4431	0.1405	0.0039
55	116.4999	0.2957	0.0938	0.0026
60	107.0096	0.1901	0.0603	0.0017
65	100.5068	0.1178	0.0373	0.0011
67	98.5707	0.0963	0.0305	0.0003

EK 8. 600 W İnfrared Gücünde Kızılçık kurutma prosesi için elde edilen deneysel veriler

t(dk)	m(g)	M_t (g su/g k.m.)	MR	DR (g su/g k.m. dk)
0	373.2000	3.152	1.0000	0.0000
5	365.3733	3.0657	0.9723	0.0174
10	340.8100	2.7924	0.8856	0.0273
15	304.2867	2.3859	0.7567	0.0270
20	258.4767	1.8762	0.5950	0.0254
25	212.3666	1.3631	0.4323	0.0205
30	173.8933	0.9350	0.2965	0.0142
35	143.3533	0.5951	0.1887	0.0097
40	120.1646	0.3371	0.1069	0.0064
45	106.5849	0.1860	0.0590	0.0033
50	98.1433	0.0921	0.0292	0.0018

EK 9. Denklem 5.6' nın küresel koordinatlarda başlangıç ve sınır şartlarının ve değişkenlerine ayırma metodunun kullanılması çözümü

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial r^2}$$

$$M(r,t) = f(r).g(t)$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} = g.f'$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} = g.f''$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = f.g'$$

$$g.f'' = \frac{1}{D_{eff}} f g' = -\lambda^2$$

$$1) \lambda^2 = 0 \text{ için}$$

$$g.f'' = \frac{1}{D_{eff}} f g' = 0$$

$$\frac{f''}{f} = \frac{1}{D_{eff}} \cdot \frac{g'}{g} = 0$$

$$1.a) \frac{f''}{f} = 0$$

$$f'' = 0$$

$$f' = C_1$$

$$f' = C_1.r + C_2$$

$$1.b) \frac{1}{D_{eff}} \cdot \frac{g'}{g} = 0$$

$$g' = 0$$

$$g = C_3$$

$$M \Big|_{\lambda^2=0} = f.g$$

$$M \Big|_{\lambda^2=0} = (C_1 r + C_2) C_3$$

$$A = C_1 \cdot C_3 \quad , \quad B = C_2 \cdot C_3$$

$$M \Big|_{\lambda^2=0} = A \cdot r + B$$

$$2) \lambda^2 \neq 0$$

$$\frac{f''}{f} = \frac{1}{D_{eff}} \cdot \frac{g'}{g} \quad , \quad \frac{f''}{f} = -\lambda^2$$

$$2.a) \frac{f''}{f} = -\lambda^2$$

$$f'' + \lambda^2 f = 0$$

$$\frac{f''}{f} = D^2$$

$$D^2 + \lambda^2 = 0$$

$$D_{1,2} = \pm i\lambda$$

$$f = C_4 e^{-i\lambda r} + C_5 e^{-i\lambda r}$$

$$2.b) \frac{1}{D_{eff}} \cdot \frac{g'}{g} = -\lambda^2$$

$$g' + \lambda^2 D_{eff} \cdot g = 0$$

$$\frac{g'}{g} = D$$

$$D + \lambda^2 D_{eff} = 0$$

$$D = -\lambda^2 D_{eff}$$

$$g = C_6 \cdot e^{-\lambda^2 D_{eff} \cdot t}$$

$$f = C_4 \cdot (\cos(\lambda r) - i \sin(\lambda r)) + C_5 (\cos(\lambda r) + i \sin(\lambda r))$$

$$f = \cos(\lambda r) \cdot (C_4 + C_5) + \sin(\lambda r) \cdot (iC_5 - iC_4)$$

$$C = C_4 + C_5$$

$$D = iC_5 - iC_4$$

$$f = C \cos(\lambda r) + D \sin(\lambda r)$$

$$M \Big|_{\lambda^2 \neq 0} = f.g$$

$$M \Big|_{\lambda^2 \neq 0} = [C.\cos(\lambda r) + D \sin(\lambda r)]C_6 e^{-\lambda^2 D_{eff}.t}$$

$$E = C.C_6$$

$$F = D.C_6$$

$$M \Big|_{\lambda^2 \neq 0} = [E.\cos(\lambda r) + F \sin(\lambda r)]e^{-\lambda^2 D_{eff}.t}$$

Yukarıda bulunan ifade için başlangıç ve sınır değerleri uygulandığında aşağıdaki denklem elde edilir [68].

Başlangıç ve sınır değerleri;

$$M = M_0 \quad R_1 < r < R_2 \quad t = 0$$

$$M = M_1 \quad r = R_1 \quad t > 0$$

$$M = M_e \quad r = R_2 \quad t > 0$$

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = 1 - \frac{6}{\pi^2 (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_2 \cos n\pi - R_1}{n} \right)^2 \exp \left(- \frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{(R_2 - R_1)^2} \right)$$

Sadece ilk terimin önemli olduğu dikkate alınıp denklem yeniden düzenlenirse;

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = 1 - \frac{6}{\pi^2 (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)} (R_2 \cos \pi - R_1)^2 \exp \left(- \frac{D_{eff} \pi^2 t}{(R_2 - R_1)^2} \right)$$

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ayşegül BANI

Doğum Yeri ve Tarihi: İskenderun, 15.05.1986

Adres: Özalper Mah. Kardeşlik sk. Şireciler Sitesi A blok No:23 d.5
Yeşilyurt/MALATYA

E-Posta: baniaysegul@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim: (2009-2011) Dia-Med Kimya Medikal İlaç ve Laboratuvar San.
ve Tic. Ltd. Şti. / Üretim Sorumlusu