

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELMANIN KURUTULMASI: MATEMATİKSEL MODELLEME VE BAZI KALİTE
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

MEHMET SOYDAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. İBRAHİM DOYMAZ

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELMANIN KURUTULMASI: MATEMATİKSEL MODELLEME VE BAZI KALİTE
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Mehmet SOYDAN tarafından hazırlanan tez çalışması 08.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Murat ÖZDEMİR
Gebze Teknik Üniversitesi

Dr. Öğrt. Üyesi İlknur KÜÇÜK
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez uzun ve yoğun bir çalışmanın ürünüdür. Çalışmalarım sırasında ailem ve çalışma arkadaşlarımdan desteğini her zaman hissettim. Onların bana olan inancı bu çalışmanın sonuna gelebilmemde her zaman bana itici güç oldu. Danışmanım Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ tüm tez çalışmamda bana yol gösterici ve iyi bir öğretici oldu. Tezi bitirmemde en çok teşekkür borçlu olduğum kişiler aile bireylerim annem Kadriye SOYDAN ve eşim Zuhale SOYDAN'a sonsuz şükranlarımı iletmek istiyorum. Destekleri sadece çalışmalarım sırasında değil tüm hayatım boyunca yanımda olduğundan en çok teşekkürü hakeden onlardır. Zaman zaman hayal kırıklığına uğradım, başarısız oldum ve yoruldum. Ancak tüm bu durumlarda sevdiklerim ve ailem bana yeniden başlama gücü ve kaldığım yerden devam etme gücü verdi. Tüm bu destekler olmadan elbette bu günlere gelemezdim.

Mayıs, 2019

Mehmet SOYDAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	12
1.3 Hipotez	13
BÖLÜM 2	
ELMA.....	14
2.1 Elma Üretimi	14
2.1.1 Elmanın Yetiştirme Koşulları ve Türleri	15
2.1.2 Türkiye’de Elma Üretimi	16
2.1.3 Elmanın İşlem Öncesi Muhafaza Edilmesi	16
2.1.4 Elmanın Besleyici Değeri ve Faydaları.....	17
2.1.5 Elmayı Oluşturan Bileşenler	18
BÖLÜM 3	
MUHAFAZA YÖNTEMİ OLARAK KURUTMA.....	20
3.1 Kurutma İşlemi.....	20
3.1.1 Kurutma İşleminin Amacı ve Önemi	21
3.2 Biyolojik Materyallerin Kurutulması	21

3.2.1	Meyve ve Sebzelerin Kurutulması	22
3.2.2	Elmaların Kurutulması.....	22
3.3	Kurutma İşleminde Temel Terminolojiler	24
3.3.1	Adyabatik Doygunluk Sıcaklığı (T_{ad})	24
3.3.2	Bağılı Nem	24
3.3.3	Sabit Kuruma Periyodu (N_c)	24
3.3.4	Çiy Noktası (T_d).....	24
3.3.5	Denge Nem İçeriği (X_e)	24
3.4	Kuruma Eğrilerinin Karakteristikleri.....	24
3.5	Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi	25
3.6	Kurutma İşleminde Ön İşlemin Önemi.....	25
3.7	Ön İşlemin Kurutma Üzerine Etkisi	26
3.8	Elmanın Besleyici Değerini Korumak için Kurutma İşlemi Öncesi Yapılan Ön İşlemin Önemi	26
3.9	Kurutma İşlemi Öncesi Uygulanan Ön İşlemler	28
3.9.1	Dondurma ve Çözme	28
3.9.2	Haşlama.....	28
3.9.3	Çözeltiye Daldırma	28
3.9.4	Ultrason.....	29
3.9.5	Ozmotik Kurutma	31
3.10	Endüstriyel Kurutma İşlemi ve Dikkat Edilecek Hususlar.....	31
3.11	Kurutma Mekanizması	32
3.11.1	Kondüksiyon (Taşınım).....	33
3.11.2	Konveksiyon (İletim)	33
3.11.3	Radyasyon (Işınım)	33
3.12	Kurutma Sistemleri	33
3.12.1	Tepsi ya da Kabin Kurutucu.....	33
3.12.2	Bantlı Kurutucu	34
3.12.3	Tünel Kurutucu.....	35
3.12.4	Sprey Kurutucu	35
3.12.5	Vakum Kurutucu	35
3.12.6	Dondurarak Kurutma	35
3.12.7	İnfrared Kurutucu	36
3.12.8	Mikrodalga Kurutucu	37

3.12.9	Güneş Enerjili Tünel Kurutucu	38
3.13	Dondurarak Kurutma İşleminin Önemi.....	40
3.14	Mikrodalga ve Isı Pompası Kurutma Sistemlerinin Avantajları.....	41
3.14.1	Mikrodalga Teknolojisinin Kurutma İşleminde Kullanılması.....	42
3.15	İnfrared Teknolojisinin (IR) Kurutma İşleminde Kullanılması	43
3.15.1	İnfrared Kurutma Sisteminin Avantajları	45
3.16	Gıdanın Kurutulmasına ve Kalitesine Etki Eden Değişkenler	47
3.17	Meyve ve Sebzelerin Kurutulmasında Endüstriyel Sistemlerin Gerekliliği	47
3.18	Kurutma İşleminde Endüstriyel Yöntemlerin Kullanılması ve Matematiksel Modellemenin Önemi	48
3.18.1	Kurutma İşleminde Matematiksel Modellerin Kullanılması	49
3.19	Kurutma İşlemi Sırasında Gıdada Meydana Gelen Değişimler	50
3.19.1	Hacim ve Gözeneklilik	50
3.19.2	Büzülme	51
3.19.3	Renk Değişimi.....	51
3.20	Kurutma İşlemi Sırasında Meydana Gelen Değişimlerin Gözlemlenmesi.....	52
3.21	Kurutma İşleminde Kombine Kurutma Sistemlerinin Kullanımı	54
3.22	Kurutma İşleminde İnfrared Enerji Kaynağı Kullanılarak Modern Ön İşleme ve Kurutma Yöntemi	55
BÖLÜM 4		
MATERYAL VE METOT		58
4.1	Materyal.....	58
4.2	Sitrik Asit ve Askorbik Asit Çözeltisi Hazırlanması	58
4.3	Potasyum Karbonat Çözeltisi Hazırlanması	58
4.4	Deneyde Kullanılan Cihazlar	59
4.4.1	Dijital Termometre.....	59
4.4.2	Hava Akış Hızı	59
4.4.3	Terazi.....	60
4.4.4	Numune Muhafaza	61
4.4.5	Kurutucular	61
4.5	Metotlar	63
4.5.1	Nem ve Kuru Madde Tayini	63
4.5.2	Deney Yöntemi.....	64
4.6	Fiziksel ve İstatiksel Analiz	66

4.6.1	Renk Ölçümü	66
4.6.2	Rehidrasyon Oranı	67
4.6.3	Matematiksel Modelleme	68
4.6.4	Regresyon Analizi	69
4.7	Efektif Nem Difüzyon Katsayısı	69
4.8	Aktivasyon Enerjisi	70
BÖLÜM 5		
BULGULAR VE TARTIŞMA		72
5.1	Konvektif Kurutma	72
5.1.1	Nem İçeriğinin Kurutma Süresine Göre Değişimi	72
5.1.2	Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi	75
5.1.3	Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi	78
5.1.4	Difüzyon Katsayısının Hesaplanması	83
5.1.5	Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	84
5.1.6	Rehidrasyon Analizlerinin Yapılması	86
5.1.7	Renk Analizlerinin Yapılması	89
5.2	Dilim Kalınlığının Kuruma Süresine Etkisi	92
5.3	İnfrared Kurutma	94
5.3.1	Nem İçeriğinin Kurutma Süresine Göre Değişimi	94
5.3.2	Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi	95
5.3.3	Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi	96
5.3.4	Difüzyon Katsayısının Hesaplanması	98
5.3.5	Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	100
5.3.6	Rehidrasyon Analizlerinin Yapılması	101
5.4	Kombine Kurutma (İnfrared + Konvektif)	102
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		103
KAYNAKLAR		108
ÖZGEÇMİŞ		116

SİMGE LİSTESİ

a, b, k ve n	Model sabitleri
a_w	Su aktivitesi
a^*	Kırmızılık
b^*	Sarılık
ΔC	Kromatiklik
D_{eff}	Efektif difüzyon katsayısı
D_0	Sonsuz sıcaklıkta difüzivite değeri
DR	Kurutma hızı
ΔE	Renk farkı
E_a	Aktivasyon enerjisi
e_s	Standart hata
H°	Hue açısı
L	Yarı dilim kalınlığı
L^*	Parlaklık
m	Numune ağırlığı
M_{db}	Kuru bazda numune ağırlığı
M_{wb}	Yaş bazda numune ağırlığı
MR_{DB}	Kuru bazda nem oranı
MR_{WB}	Yaş bazda nem oranı
$MR_{exp, i}$	DeneySEL boyutsuz nem oranı
$MR_{pre, i}$	Tahmini boyutsuz nem oranı
N	Gözlem sayısı
p	İnfrared kaynağının gücü
R	Evrensel gaz sabiti
R^2	Regresyon katsayısı
RR	Rehidrasyon oranı
χ^2	Ki-kare
z	Sabit sayısı

KISALTMA LİSTESİ

CIR	Catalytic Infrared
CVS	Computer Vision System
FD	Freeze Drying
FIR	Far-Infrared
HAD	Hot Air Drying
HAD-FD	Hot Air-Freeze Drying
IR	Infrared
IR-CA	İnfrared-Soğuk hava kombinasyonu
IR-FD	Infrared-Freeze Drying
IR-HA	Infrared-Hot Air
LDL	Low Density Lipoprotein
MER	Moisture Extraction Ratio
MIR	Mid-Infrared
MRA	Multiple Regression Analysis
MRI	Magnetic Resonance Imaging
NIR	Near-Infrared
POD	Peroxidase
PPO	Polyphenol oxidase
RMSE	Root Mean Squared Error
SEC	Specific Energy Consumption
SIRDBD	Simultaneous Infrared Dry Blanching and Drying
SMER	Specific Moisture Extraction Ratio
SSE	Sum of Squared Error
TD-NMR	Time Domain Nuclear Magnetic Resonance

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Elmanın işlenmesi için üretim tesisine getirilmesi	16
Şekil 2. 2 Elmada bulunan faydalı bileşenler	18
Şekil 3.1 Kabin kurutucunun şematik diyagramı	20
Şekil 3.2 Taze ve kurutulmuş elmanın görüntüsü	22
Şekil 3.3 Kurutma işleminde sabit ve azalan hız periyodu	25
Şekil 3.4 Ultrason ön işleminin deneysel gösterimi	30
Şekil 3.5 Tepsili/Kabin kurutucu sistemi	33
Şekil 3.6 Bantlı kurutucunun şematik gösterimi	34
Şekil 3.7 Dondurarak kurutma işleminin şeması	36
Şekil 3.8 Elektromanyetik dalga spektrumu	37
Şekil 3.9 Mikrodalga kurutma sistemi	38
Şekil 3.10 Güneş enerjili kurutma fırını	39
Şekil 3.11 Havalı güneş kolektörü detayı	39
Şekil 3.12 Temsili güneş enerjili tünel kurutucu	40
Şekil 3.13 İnfrared radyasyonun (IR) ürün tarafından emilmesi, yansıması ve emilmeden içinden geçmesi	44
Şekil 4.1 Dijital termometrenin genel görünüşü	59
Şekil 4.2 Anemometre	60
Şekil 4.3 Mettler marka terazinin genel görünüşü	60
Şekil 4.4 Precisa marka terazinin genel görünüşü	61
Şekil 4.5 Kurutulmuş ürünleri ısısal paketlemede kullanılan cihazın genel görünümü ..	61
Şekil 4.6 Kabin kurutucu	62
Şekil 4.7 İnfrared kurutucu	63
Şekil 4.8 Nem tayini için kullanılan etüv	63
Şekil 4.9 Ön işlemin Uygulama Şeması	65
Şekil 4.10 Renk ölçer	66
Şekil 5.1 Elma dilimlerinin 50°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi	73
Şekil 5.2 Elma dilimlerinin 60°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi	74
Şekil 5.3 Elma dilimlerinin 70°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi	74
Şekil 5.4 Elma dilimlerinin 80°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi	75

Şekil 5.5 Elma dilimlerinin 50°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi	76
Şekil 5.6 Elma dilimlerinin 60°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi	76
Şekil 5. 7 Elma dilimlerinin 70°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi	77
Şekil 5.8 Elma dilimlerinin 80°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi	77
Şekil 5.9 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için deneysel ve Midilli & Küçük modelinin kullanılmasıyla tahmin edilen nem oranı değerleri	83
Şekil 5.10 Kabin kurutucuda kurutulan elma dilimlerinin efektif difüzyon katsayısının kurutma sıcaklığı ile değişimi	84
Şekil 5.11 Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi	85
Şekil 5.12 50°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi.....	87
Şekil 5.13 60°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi.....	87
Şekil 5.14 70°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi.....	88
Şekil 5.15 80°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi.....	88
Şekil 5.16 Potas çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi	90
Şekil 5.17 SA+AA çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi	91
Şekil 5.18 Haşlama işlemi ile muamele edilen örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi	91
Şekil 5.19 Kontrol grubu örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi	91
Şekil 5.20 60°C sıcaklıkta ön işlem uygulanmadan kurutulan farklı dilim kalınlıklarındaki elma dilimlerinin kuruma süresi	93
Şekil 5.21 Elma dilimlerinin infrared kurutucu ile kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi	95
Şekil 5.22 Elma dilimlerinin kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi	96
Şekil 5.23 Farklı infrared güç seviyelerinde kurutulan elma dilimlerinin deneysel ve Midilli & Küçük modelinin kullanılmasıyla tahmin edilen nem oranı değerleri...	98
Şekil 5.24 Elma dilimlerinin efektif difüzyon katsayısının infrared güç seviyesi ile değişimi	99
Şekil 5.25 İnfrared kurutucunun güç seviyesinin efektif difüzyon katsayısına etkisi....	100
Şekil 5.26 İnfrared kurutucu ile farklı infrared güç seviyelerinde kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi.....	101
Şekil 5.27 Ön işlem uygulanmayan elma dilimlerinin konvektif ve infrared-konvektif kombine kurutma sisteminde nem miktarının kuruma süresi ile değişimi	102

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli minimum su aktivitesi (a_w) değerleri	23
Çizelge 4.1 Elma dilimlerinin kurutulmasında kullanılan yarı deneysel modeller.....	68
Çizelge 5.1 Elma dilimlerine uygulanan sıcaklık ve ön işlem yöntemine göre kuruma süreleri.....	72
Çizelge 5.2 Potas çözültisi ile ön muamele edilen örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri	79
Çizelge 5.3 SA+AA çözültisi ile ön muamele edilen örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri.....	80
Çizelge 5.4 Haşlama işlemi ile muamele edilen örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri.....	81
Çizelge 5.5 Kontrol grubu örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri	82
Çizelge 5.6 Literatürde kurutma çalışmasında kullanılan elma ve elma posalarının aktivasyon enerjileri	86
Çizelge 5.7 Taze elma ile birlikte farklı sıcaklık ve ön işlem uygulanarak kurutulan elma dilimlerinin renk analizi sonrası L^* , a^* ve b^* değerleri	90
Çizelge 5.8 İnfrared kurutucu ile ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerin verileri için kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri	97
Çizelge 5.9 Literatürde bulunan bazı elma kurutma işlemi sonrası elde edilen difüzyon katsayıları	99

ELMANIN KURUTULMASI: MATEMATİKSEL MODELLEME VE BAZI KALİTE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet SOYDAN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

Bu çalışmada, 4, 7 ve 10 mm kalınlıklarındaki Granny Smith türü elma dilimlerinin laboratuvar tipi kabin kurutucuda ve infrared kurutucuda kuruma davranışları incelenmiştir. Elma örnekleri kurutulmadan önce %0,5 askorbik asit ve %0,5 sitrik asit karışımında, haşlama maksadı ile 80°C sıcaklıktaki su içerisinde ve %4 oranında potasyum karbonat ve %0,5 zeytinyağı çözeltisinde bekletme olmak üzere ön işlem süresi 1 dakika olacak şekilde muamele edilmiştir. Kontrol örnekleri ise doğal biçimde ön işlem uygulanmadan kurutulmuştur. Örnekler 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda kabin kurutucuda ve 50, 62, 74, 88 ve 104 W güç seviyelerinde infrared kurutucuda (IR) kurutulmuştur. Değişik sıcaklıkların ve infrared güç seviyelerinin yanında farklı dilim kalınlıkları, kombine kurutma sistemi ve ön işlemlerin; elmanın kuruma kinetiği, rehidrasyon oranı ve renk değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmalar sırasında kullanılan kombine kurutma sistemi iki aşamalı bir sistemdir. İlk olarak infrared kurutma sisteminde 74 W infrared gücünde 1 saat boyunca ön kurutmaya maruz bırakılan 7 mm dilim kalınlığındaki örnekler ardından 60°C sıcaklıkta sabit tutulan kabin kurutucu içerisinde nem seviyesi istenilen düzeye gelene kadar kurutulmuştur. Kombine kurutma sistemi ile kurutulan örneklerin istenilen nem seviyesine ulaşması sadece kabin kurutucu kullanarak 60°C sıcaklıkta kurutulan örneklerle kıyasla daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Dilim kalınlığının etkisini gözlemlemek için yapılan diğer bir çalışmada ise ön işlem uygulanmadan kabin

kurutucuda 60°C sıcaklıkta kurutulan 4, 7 ve 10 mm kalınlığındaki elma dilimlerinin kuruma sürelerinin dilim kalınlıkları ile ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Kabin kurutucuda gerçekleştirilen deneylerde 60°C sıcaklıkta 7 mm dilim kalınlığında kesilen örneklerden kontrol grubu örneklerin en uzun kuruma süresine sahip olduğu gözlemlenirken en kısa kuruma süresi potasyum karbonat (%4) ve zeytinyağı (%0,5) çözeltisi ile muamele edilen örneklerde görülmüştür. Aynı zamanda sitrik asit (%0,5) ve askorbik asit (%0,5) çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin 60°C sıcaklıkta kuruma süresi haşlama yöntemiyle ön muamele edilen örneklerle kıyasla daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar diğer sıcaklıklarda uygulanan kurutma işlemlerinde de tespit edilmiştir. Kabin kurutucuda en hızlı kuruma potasyum karbonat çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerle 80°C sıcaklıkta 165 dakika olarak gözlemlenirken en geç kuruma 50°C sıcaklıkta ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerle 570 dakika sürmüştür. İnfrared kurutucuda ise en hızlı kuruma 104 W gücünde 135 dakika olarak gözlemlenirken en yavaş kuruma 50 W gücünde 315 dakika olarak gözlemlenmiştir. 50°C ve 60°C sıcaklıklarda kurutulan haşlama kodlu örnekler ile 70°C ve 80°C sıcaklıklarda SA+AA kodlu örneklerin en yüksek rehidrasyon oranına sahip olduğu görülmüştür. Renk analizinde, 50°C sıcaklıkta sitrik asit ve askorbik asit karışımından oluşan çözelti ile ön muamele edildikten sonra kurutulan numunelerin L* (parlaklık), a* (kırmızılık) ve b* (sarılık) değerlerinin, taze elmanın değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Agbashlo vd., Page, Henderson & Pabis, Geometrik, Wang & Singh ve Midilli & Küçük matematiksel modelleri örneklerin kurutulması sırasında nem içeriğinin nasıl bir değişme gösterdiğini belirlemek için model olarak seçilmiştir. Modellerin performansları regresyon katsayısı (R^2), hataların ortalama karekökü (RMSE) ve ki-kare (χ^2) gibi istatistikî analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda, Midilli & Küçük modelinin örneklerin kuruma davranışını diğer modellere göre daha iyi açıkladığı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konvektif kurutma, infrared kurutma, elma kurutma, matematiksel modelleme, ön işlem

DRYING OF APPLE: MATHEMATICAL MODELLING AND DETERMINATION OF SOME QUALITY PARAMETERS

Mehmet SOYDAN

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

In this study, the drying behavior of 4, 7 and 10 mm thickness of Granny Smith apple slices in laboratory type cabin dryer and infrared dryer was investigated. Before drying the apple, samples were treated in a mixture of 0.5% ascorbic acid and 0.5% citric acid solution, in 4% potassium carbonate and 0.5% olive oil solution and kept in water at 80°C for blanching pretreatment for 1 minute as a pretreatment time. Control samples were dried naturally without pretreatment. The samples were dried in a cabinet dryer at 50, 60, 70 and 80°C and in an infrared dryer (IR) at 50, 62, 74, 88 and 104 W power levels. In addition to different temperatures and infrared power levels, the effects of different slice thicknesses, combined drying system and different pretreatment methods on drying kinetics of apple, rehydration ratio and color change were investigated. The combined drying system used during the work is a two-stage system. In the infrared drying system, the samples with 7 mm slice thickness were preheated at 74 W infrared power for 1 hour and then were dried at 60°C in the cabinet dryer. The combined drying system was able to reach the desired moisture level only in a shorter time than the samples dried at 60°C using a cabinet dryer. In another study conducted to observe the effect of slice thickness in the cabinet dryer, drying times of 4, 7 and 10 mm thick apple slices dried at 60°C without pretreatment were found to be inversely proportional to slice thickness. In the experiments performed in the cabinet dryer, it was observed for the samples with the thickness of 7 mm that the control group

samples had the longest drying time and the shortest drying time was observed in the samples treated with potassium carbonate (4%) solution. It was also observed that the samples that were pretreated with citric acid (0.5%) and ascorbic acid (0.5%) solution had a longer drying time at 60°C than the pretreated samples with blanching. Similar results were found in drying processes applied at other temperatures. The fastest drying in the cabinet dryer was observed at 80°C for 165 minutes with samples pretreated with potassium carbonate solution, while the latest drying took 570 minutes with samples dried at 50°C without pretreatment. In the infrared dryer, the fastest drying was observed at 104 W in 135 minutes, while the slowest drying rate was 50 W and 315 minutes. After pretreatment with blanching for the samples dried at 50 and 60°C, it was found that the dried samples exposed to blanching pretreatment had better rehydration ratio than the pretreated samples with other pretreatment methods. In color analysis, the values of L* (brightness), a* (redness) and b* (yellowness) of the dried samples at 50°C after pretreating with citric acid and ascorbic acid mixture solution were found to be close to the values of the fresh apple. Agbashlo et al., Page, Henderson & Pabis, Geometric, Wang & Singh and Midilli & Küçük mathematical models were compared with each other to determine how the moisture content changed during drying of samples and the most suitable model was chosen. The performances of the models were determined using statistical analysis methods such as the coefficient of determination (R^2), the mean square root of errors (RMSE) and chi-square (χ^2). In the light of the studies, it was understood that the Midilli & Küçük model explained the drying behavior of the samples better than other models in all slice thickness and drying conditions.

Keywords: Convective drying, infrared drying, apple drying, mathematical modelling, pretreatment

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kurutma işlemi, sürekli olarak gelişen ve değişen aynı zamanda deneysel olarak geniş bilimsel çevrelerce incelenen bir işlemdir. Meyve ve sebzeler yüksek nem içeriğine sahip olduğundan bu tip gıdaların kurutma işlemi öncesi ve sonrası bozulmadan muhafaza edilmesi için uygun işletme koşullarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Uygun koşulların belirlenmesi için bilim insanları tarafından yapılan uzun ve yorucu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kirmaci vd. [1] elmaların dondurarak kurutma kinetiğini incelemek için deneysel ve yarı deneysel modeller üzerinde çalışmışlardır. Örnekler 5, 7 ve 10 mm dilimlenerek kurumaya bırakılmıştır. Çalışmada 10 farklı model kullanılmış olup modellerin doğrulanması χ^2 (ki-kare), R^2 (regresyon katsayısı) ve RMSE (karesel ortalama hata) istatistik değerlerine göre yapılmıştır. Elma dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıklayan model Page model olarak bulunmuştur. İstenen son nem oranına varılması için geçen süre 5, 7 ve 10 mm dilim kalınlığındaki örnekler için 660, 900 ve 1100 dakika olarak gözlemlenmiştir.

Gürlek vd. [2] yaptığı deneysel çalışmada kullandığı Starking çeşidi elmalar 2 mm dilim kalınlığında hazırlanıp %2,5 askorbik asit çözeltisine daldırılarak ön işleme tabi tutulmuştur. 50°C sıcaklıkta ve 2 m/s hava hızında yapılan deneysel kurutma işleminde numune tepsilerinin ağırlıkları 5 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Isı pompalı kurutucu performansları göz önüne alındığında, özgül nem alma hızı (SMER) 2,26 kg su/kWh, nem alma hızı (MER) 0,54 kg su/h ve özgül enerji tüketimi (SEC) değeri 1,6 MJ/kg su

olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, elma dilimlerini kurutmada ısı pompalı kurutucu kullanımının özgül enerji tüketimini oldukça düşüreceğini göstermiştir.

Baysal vd. [3] yaptıkları çalışmada, Starking türü elmanın tepsi kurutucu, ısı pompası kurutucu, dondurarak ve mikrodalga kurutucu ile kombine biçimde kurutulmasının elma diliminin kalite değerine ve elmanın kurutulması sırasında enerji verimliliğine etkisini gözlemlenmiştir. Örnekler 50, 90, 270 ve 20 dakika boyunca sırasıyla tepsi, ısı pompası, dondurarak ve mikrodalga kurutucu ile kurutulmuştur. Kalite değişimi; nem oranı, renk değişimi, su aktivitesi, rehidrasyon oranı ve duyuşal açıdan gözlemlenmiştir. Enerji verimliliği SMER, MER, SEC ve enerji maliyeti açısından değerlendirilmiştir. Kalite açısından değerlendirildiğinde dondurarak ve mikrodalga ile kurutulan örneklerin ısı pompası ve tepsi kurutmaya kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür. En az enerji tüketimi ve yüksek SMER ve MER değerini ısı pompası kurutma sistemi vermiştir.

Ceylan vd. [4], güneş enerjisi ile ısıtılan hava kolektörlü bir kurutma fırınında elma kurutma işlemini deneysel olarak incelemişlerdir. Fırında kurutma işlemi öncesi kabuklarından arındırılan elmalar 4 mm kalınlığında dilimlenmiştir. Elmaların renk değişiminin önlenmesi için limon suyu-askorbik asit karışımı içeren su içerisinde elma dilimleri 4-5 dakika arası bekletilmiş olup sonrasında kurutma işlemine başlanmıştır. Bu çalışmada tamamı kontrolsüz dış hava iklim şartlarında gerçekleştirilen kurutma işleminin yerine, elmanın kurutulması için gerekli ön hazırlık ve son kontrol işlemleri gerçekleştirilerek ilk yatırım masrafı düşük, enerji giderleri az ve karmaşık olmayan kurutma fırınında kontrollü kurutma işlemi yapılarak kurutulan elmanın kalite analizi yapılmıştır. Aynı zamanda güneş kolektörlü kurutma fırını ile yapılan kurutma işleminde doğal kurutma işlemine göre kuruma süresi hem kısalmış hem de kurutulan ürün kalitesi arttırılmıştır.

Heybeli ve Ertekin [5] yaptığı çalışmada, sanayi tipi prototip raflı kurutucuda Starking Delicious (*Malus Communis L.*) elma çeşidine uygulanan kurutma havası sıcaklığının ürünün kuruma süresi, kuruma hızı, hacim ağırlığı, hacimsel büzülme, yeniden su alma, renk ve duyuşal özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Dilim kalınlığı 5 mm olan örnekler 40, 50, 60, 70 ve 80°C kurutma havası sıcaklığı ve 4,1 m/s sabit hava hızında kurutmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre kurutma havası sıcaklığının artışı ile ürünün kuruma süresi azalmış, kuruma hızı artmıştır. Kuruma süresi, 40 ve 80°C kurutma havası sıcaklığı uygulanan ve ön işlem gören örneklerde sırasıyla 3,18 ve 1,38 saat

olurken, ön işlem görmeyen örneklerde ise bu süre 3,45 ve 1,30 saat olarak belirlenmiştir. Hacim ağırlığı ve hacimsel büzülmenin kurutma havası sıcaklığından etkilenmediği saptanmıştır. 80°C kurutma havası sıcaklığında kurutulan ön işlem görmeyen örnekler 90°C sıcaklıkta sabit tutulan su banyosu içerisinde bekletildiğinde kurutma öncesi nem miktarını %82,18 oranında geri kazanmıştır. Örneklerin renk sapmasının (ΔE), ön işlem gören örneklerde kurutma havası sıcaklığının azalışı ile arttığı ve 50°C sıcaklıkta en yüksek değere ulaştığı görülürken, ön işlem görmeyen örneklerde ise 40°C sıcaklıkta en yüksek sapmaya uğramıştır.

Eliçin ve Saçılık [6], tünel tipi güneş enerjili kurutucu kullanarak organik olarak yetiştirilen elmanın kurutma deneylerini Ankara koşullarında yapmıştır. Örnekler 5 mm kalınlıkta kesilip ön işleme tabi tutulmadan tünel tipli güneş enerjili kurutucuda ve açık havada 1,5 ve 2 gün boyunca kurutulmuştur. Deneysel olarak elde edilen kuruma verileri Page, Logaritmik ve Wang & Singh modellerinde kullanılmış ve modellerin katsayıları doğrusal olmayan regresyon tekniği ile belirlenmiştir. Organik elmanın kuruma davranışını en iyi açıklayan model çeşitli istatistiksel karşılaştırma yöntemleri ile belirlenmiştir. Çalışmalar sonucu güneş enerjisi yardımıyla tünel kurutucuda kurutulan elmaların kuruma davranışını en iyi açıklayan modelin Page modeli olduğu ortaya çıkmıştır. Güneş enerjisi ile entegre edilen tünel kurutma sistemi açık alanda güneş enerjisi ile kurutma sistemine göre zaman açısından %14,28 oranında bir azalma sağlamıştır.

Yılmaz [7], 8 mm kalınlığındaki elma dilimlerini konveksiyonel metot kullanarak 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda laboratuvar ortamında kurutmuştur. Ön işlem olarak 60°C sabit sıcaklıkta ve 35 kHz frekansta, 10, 20 ve 30 dakika boyunca ultrason ön işlem uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ultrason uygulamasının kurutma işlemine olan etkisinin belirlenmesi amacıyla ön işlem uygulanmış olup 60°C sıcaklıkta ön işlem uygulanarak kurutulmuş elma dilimleri ile ön işlem uygulanmaksızın 60°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin kuruma süreleri ve kurutma işlemi sonrasındaki renk profilleri karşılaştırılmıştır. Sıcaklığın artışı ile birlikte örneklerin kuruma süresi kısalmış ancak sıcaklık artışı kurutulan elmaların rengini de olumsuz yönde etkilemiştir. Artan sıcaklıkla birlikte daha koyu renkli örnekler elde edilmiş olup 60°C sıcaklık elmaların kurutulması için hem süre hem de kurutma sonrası etkiler açısından optimum sıcaklık olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda ön işlem uygulanmış elma dilimlerinin, ön işlem olmadan

kurutulan örnekler göre daha kısa sürede kuruduğu, ön işlemin kuruma süresini kısalttığı görölmüştür.

Özsoy [8], 2, 4 ve 6 mm dilim kalınlıklarındaki Gala türü elma dilimlerinin laboratuvar tipi bantlı mikrodalga kurutucudaki kuruma davranışlarını incelemiştir. Kuruma süresi, renk değişimi ve enerji tüketim değerleri üzerindeki farklı mikrodalga gücünün (1400, 2000 ve 2800 W) ve bant hızının (0,175, 0,210 ve 0,245 m/dak.) etkileri araştırılmıştır. Newton, Page, Henderson & Pabis, Geometrik ve Wang & Singh kuruma modelleri kurutmanın belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek amacıyla birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu modellerin performansları regresyon katsayısı (R^2), standart hata (e_s) ve ki-kare (χ^2) gibi istatistiki analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm dilim kalınlıklarında ve kuruma şartlarında Page modelinin ürünlerin kuruma davranışlarını diğer modellere göre daha iyi açıkladığı görölmüştür.

Çelen vd. [9], 2, 4 ve 6 mm olarak dilimlenmiş elmaların mikrodalga kurutucuda kuruma davranışı araştırmıştır. Mikrodalga gücünün 1050 W, 1500 W ve 2100 W olduğu konveyör bant hızının 0,175, 0,210 ve 0,245 m/dak. olduğu durumların kuruma zamanına, renk değişimine ve enerji tüketimine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kuruma zamanı ve enerji tüketiminin mikrodalga gücü ve konveyör bant hızının artmasıyla azaldığı görölmüştür. Deneysel sonuçlar matematiksel modellere uygulandığında Page modelinin diğer modellere kıyasla kuruma davranışını tanımlayan en uygun model olduğu tespit edilmiştir. Fick difüzyon modeli efektif difüzyon katsayısının tespitinde kullanılarak difüzyon katsayılarının $1,19 \times 10^{-8}$ m²/s ve $2,75 \times 10^{-7}$ m²/s aralığında değiştiğı belirlenmiştir. Aktivasyon enerjisi 2, 4 ve 6 mm kalınlığında dilimler için sırasıyla 156,65, 40,18 ve 17,90 W/g olarak hesaplanmıştır. Kurutma işleminin sonunda 2 mm dilim kalınlığında elma için 0,175 m/dak. konveyör hızında ve 2100 W mikrodalga gücünde minimum enerji tüketimi 1,34 kWh olarak hesaplanmıştır. Ceylan vd. [10], ısı pompalı bir kurutma fırınında elmanın kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. 4 mm dilim kalınlığındaki elmalar 40°C sıcaklıkta ortalama %20 bağıl nemde ve 2,8 m/s hava hızında gerçekleştirilen kurutma işleminde su miktarı 4,8 (g su/g kuru madde) değerinden 0,18 (g su/g kuru madde) değerine 3,5 saatte düştüğü saptanmıştır. Elmaların kurutma sonrası su aktivite değeri 0,65 bulunmuştur. Düşük su aktivitesi toksijenik küflerin etkinliğini ve toksin üretimini engellemiştir. Deneysel çalışmalar sonucu çevre bağıl nemi düşük olan ortamlarda enerji verimliliğini artırmak

için ısı pompalı kurutucu sisteminin etkili olduğu görülmüş olup geleneksel kurutma yöntemlerine alternatif bir yol olarak önerilmiştir.

Kara ve Doymaz [11], elma posasının kurutulması üzerinde çalışmışlardır. Örneklerin kurutma işlemi 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklık değerlerinde ve 2 m/s sabit hava hızda bir kabin kurutucuda gerçekleştirilmiştir. Kurutulacak elma posası 0,8 cm kalınlığında hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre efektif nem difüzyon katsayısı $1,73 \times 10^{-10}$ ile $4,40 \times 10^{-10}$ m²/s arası değişmekte olup aktivasyon enerjisi 29,65 kJ/mol olarak bulunmuştur. Deneysel veriler 10 adet ince tabaka kuruma modeline uygulanmış ve Midilli & Küçük tarafından geliştirilen modelin R^2 , χ^2 ve RMSE gibi istatistiki analiz değerlerine bakılarak tüm deney koşulları için en uygun model olduğu anlaşılmıştır.

Beigi [12], elma dilimlerinin kuruma karakteristiklerini ve kalite değerlerini incelemiştir. Elma dilimleri hava hızının sabit 1,5 m/s ve sıcaklıkların 50, 60 ve 70°C olduğu ortamda kurutulmuştur. Kurutma sıcaklığının kuruma süresini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Deneysel veriler, 8 teorik modelin simülasyonu yapılmış olup Midilli & Küçük tarafından geliştirilen model elmanın kuruma kinetiğini tanımlayan en uygun model seçilmiştir. Efektif nem difüzyon değeri 50, 60 ve 70°C sıcaklıklar için sırasıyla $7,03 \times 10^{-10}$, $8,48 \times 10^{-10}$ ve $1,08 \times 10^{-9}$ m²/s olarak bulunmuştur. Kuruma esnasında büzülme değerleri 50, 60 ve 70°C sıcaklıklar için sırasıyla %74,70, %82,35 ve %80,78 olarak bulunmuştur. 70°C sıcaklıkta kurutulan örneklerde maksimum rehidrasyon oranı (4,527 kg su/kg kuru madde) ve minimum aktivasyon enerjisi 19,8 kJ/mol olarak bulunmuştur.

Beigi [13], sıcaklık, hava hızı ve bağıl nem gibi kurutucu hava parametrelerinin elma kurutma esnasında difüzyon ve konvektif kütle transferi üzerine etkilerini incelemiştir. Kütle transfer karakteristiklerini bulmak için Dost ve Dinçer modelleri kullanılmıştır. Kütle transferinde iç ve dış dirençleri gösteren Biot sabiti 0,88 – 3,89 değerleri arasında bulunmuştur. Elde edilen Biot sabiti ile elma dilimi kurutma işleminde iç ve dış dirençlerin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Efektif nem difüzyon değeri ve kütle transfer katsayılarının sırası ile $7,13 \times 10^{-11}$ – $7,66 \times 10^{-10}$ m²/s ve $1,46 \times 10^{-7}$ – $3,39 \times 10^{-7}$ m/s değerleri arasında olduğu ve bu değerlerin kurutma havası sıcaklığının ve hızının artmasıyla arttığı ve havanın bağıl neminin artışıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Kullanılan modeller ile deneysel verilerin uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Nadian vd. [14], kimyasal ön işlemin elma kurutma esnasında renk değişimine etkisini gözlemlemiştir. Kurutulacak elma dilimleri 6 mm kalınlıkta hazırlanmıştır. Bu elma dilimleri askorbik asit çözeltisi (%0,5) ve sitrik asit çözeltisine (%0,5) 5 dakika boyunca daldırılmıştır. Örneklerin renk değişimi 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda eş zamanlı olarak izlenmiştir. Bilgisayar görüntüleme sistemi (Computer Vision System - CVS) ön işlem uygulanarak ve ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerin renk değişimini takip etmek için kullanılmıştır. Ön işlem gören elma dilimlerinin renk kalitesi açısından daha üstün olduğu gözlemlenmiş olup bilgisayar görüntüleme sistemlerinin ön işlem gören gıdaların değişen parametrelerinin incelenmesi için iyi bir yöntem olduğu ortaya çıkmıştır.

Torres-Munoz vd. [15], kısa süre sıcak suda haşlama ve sonrasında kurutma işleminin örneklerin kararlılığında, fiziksel özelliklerinde ve elma posasındaki polifenol antioksidan aktivitesine etkisini incelenmiştir. Haşlama ön işlemi uygulanan ve uygulanmayan elmalar 3 m/s hava hızı ve 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında renk, toplam fenolik madde miktarı ve flavanoid vb. analizler yapılmıştır. Haşlama ön işlemi uygulanan elma posası renk, toplam fenolik madde miktarı ve flavanoid açısından daha iyi sonuç vermiştir. Özellikle 80°C sıcaklıkta ve haşlama ön işlemine maruz bırakılan kurutma işleminde fenolik madde miktarı, flavanoid ve antioksidan kapasitesi daha yüksek ürünler elde edilmiştir. Kurutma işleminde antioksidan kapasitesinde önemli bir azalma meydana gelse de haşlama ön işlemi ile bu kaybı en aza indirmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Rodriguez vd. [16] elmanın kurutulması sırasında nem profilini gözlemek için zaman aralıklı manyetik rezonans (Time Domain Nuclear Magnetic Resonance-TD-NMR) sistemini kullanmışlardır. Uygulama sıcaklıkları 50, 60, 70, 80 ve 90°C olarak kabul edilmiş ve difüzyon modeli temel alınarak geliştirilen matematiksel modeller sınırlı element analizi yöntemi ile çözümlenmiştir. Oluşturulan model sadece büzülme ve sıcaklığın difüzyon katsayısı üzerine etkisi ile sınırlı olmayıp örneklerdeki nem miktarının deneysel ve matematiksel olarak kıyaslanmasına yardımcı olmuştur. Elde edilen nem profili konvektif kurutma sisteminde kütle transferinin nasıl olduğunu açıklamanın yanında matematiksel modelin doğrulanması için kullanılmıştır.

Rodrigues vd. [17] tarafından yapılan bir çalışmada, $0,019 \times 0,019 \times 0,005$ m boyutlarındaki elma örneklerini ultrason ön işlemi uygulayarak ve ultrason ön işlemi

uygulanmadan kurutmuştur. Ultrason ön işleminin akustik yoğunlukları 2,1 ve 12,9 W/m² olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, ön işlemin polifenol oksidaz aktivitesine, elmanın mikro yapısına ve kuruma kinetiğine etkisi incelenmiştir. Örnekler ön işlem için 25°C sıcaklıkta 5 dakika boyunca saf su, elma suyu ve sitrik asit çözeltisi içerisinde bekletilerek sonrasında ultrason dalgalarına maruz bırakılmıştır. Ön işlem gören elmalar daha kolay kurumasının yanında daha iyi bir mikro yapıya sahip olmuştur. Elma suyu ve sitrik asit ön işlemine maruz bırakılan elmalarda polifenol oksidaz aktivitesi azalma göstermiştir. Nemin örnekten ayrılarak kurutma ortamına difüzyonu en hızlı ve kolay biçimde 50°C sıcaklık ve 1 m/s hava hızında ön işlem uygulanmayan örneklerde gerçekleşmiştir. Uygulanan ön işlem ile PPO (polifenol oksidaz) aktivitesinde %13–58 arası bir azalma görülmüştür. Nem transferinin en fazla engellendiği durum örnekler sitrik asit çözeltisi ile muamele edildikten sonra gözlemlenmiştir. Ultrason ön işlemi sayesinde efektif nem difüzyon katsayısı artmış olup en fazla artış kurutulacak örneğin düşük yoğunlukta çözelti ile muamele edilmesi ve yüksek ses yoğunluğu kullanılması ile elde edilmiştir.

Joshi vd. [18], elmanın polifenol içeriğine, C vitamini değeri ve antioksidan kapasitesine; hava, fırın ve vakum kurutma sistemlerinin nasıl bir etkide bulunacağını incelemiştir. Kurutma işlemi elmanın fenolik yapısını ve C vitamini yoğunluğunu önemli ölçüde etkilemiştir. Vakum kurutma sistemi ile kurutulmuş elmanın fenolik bileşen değerleri 20°C sıcaklıkta ve 24 saat süre zarfında bir değişme göstermemiştir, ancak antioksidan kapasitesi diğer kurutma yöntemlerine kıyasla fırın kurutma yöntemiyle kurutulan elmalarda azalma göstermiştir. Vakum kurutma ile kurutulan örneklerde biyoaktif madde kayıpları minimum olmasının yanında kurutma sonrası ortaya çıkan homojen olmayan renk dağılımı renk kalitesi açısından olumsuzluk olarak gözlemlenmiştir. Çalışmalar sonucunda 20°C sıcaklıkta gerçekleştirilen vakum kurutma işlemi ile elde edilen elma dilimlerindeki fenolik bileşenlerin, C vitamini yoğunluğunun ve antioksidan kapasitesinin taze elmaya daha yakın değerde olduğu görülmüştür.

Assis vd. [19], küp şeklinde doğranmış elma örneklerinde ozmotik ön işlemin kütle transferi ve su aktivitesi üzerine etkisini incelemiştir. Kurutucu hava hızı 1 m/s olarak belirlenmiş olup kurutma işlemi 25, 55, 70 ve 80°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi boyunca en uzun bekleme süresi 10 saat olarak 25°C sıcaklıkta ölçülmüştür. Küp şeklindeki elma örnekleri ozmotik ön işlem ile sorbitol

ya da sükröz çözeltileriyle 60°C sıcaklıkta muamele edildikten sonra kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Elmalar 60°Brix oranı olan ozmotik çözeltiyle (sükröz ya da sorbitol) 8 saat boyunca 60°C sıcaklıkta atmosfer koşullarında muamele edilmiştir. Ozmotik ön işlem ve artan hava sıcaklığı su aktivitesinde düşmeye sebep olmuştur. Ön işlemde kullanılan çözelti kurutma kinetiğine etki etmemiş fakat sorbitol ile muamele su aktivitesi düşük örnekler elde edilmesinde yardımcı olmuştur. Gerçekleştirilen kurutma işleminde nem içeriğinin zamanla nasıl değiştiğini en iyi açıklayan modelin Modifiye Page olduğu saptanmıştır.

El-Mesery vd. [20], bantlı kurutucu sistemini, meyve ve sebzelerin kurutulması için infrared ve sıcak hava kurutma sistemlerini kullanarak geliştirmiştir. Sistem infrared ve soğuk ya da sıcak hava kullanarak çalıştırılmakta olup soğuk hava çalışma esnasında 2000 W/m² infrared radyasyon yoğunluğunda 30°C sıcaklıkta 0,6 m/s hava hızı sisteme verilmektedir. Sıcak hava çalışma esnasında ise 2000 W/m² infrared radyasyon yoğunluğunda 60°C sıcaklıkta 0,6 m/s hava hızı sisteme verilmektedir. Sıcak hava infrared kurutma sistemi soğuk hava infrared kurutma sisteminden %57,5 oranında ve sadece sıcak hava kurutma sistemine göre %39,1 oranında daha hızlı biçimde kurutma işlemini gerçekleştirmiştir. Sıcak hava ve infrared radyasyon kurutma kombinasyonu enerji tüketimi ve termal verimlilik açısından soğuk hava ve infrared radyasyon kurutma kombinasyonuna ve sadece sıcak hava kurutma sistemine kıyasla daha iyi kuruma sağlamıştır. Elma dilimlerinin infrared ve sıcak hava kurutma kombinasyonu (IR-HA), infrared ve soğuk hava kurutma kombinasyonu (IR-CA) ve sıcak hava kurutma sistemi (HA) ile kuruma oranları sırasıyla 7,40, 6,72 ve 4,16 g su/g kuru madde×dakika olarak bulunmuştur.

Fernandes vd. [21], ultrason yardımlı hava kurutma yöntemiyle elma kurutma ve kurutulan ürünlerde A, B1, B2, B3, B5, B6 ve E vitaminlerinin değişimi üzerinde çalışmışlardır. Deneyler yapılırken hava hızları 1, 2, 3 ve 5 m/s olarak sıcaklıklarsa 45 ve 60°C olarak belirlenmiştir. Ultrason frekansı 75 W ve 21 kHz olarak ayarlanmıştır. Ultrason ön işlemi düşük sıcaklık ve hava hızında bile yüksek verim sağlamıştır. Ultrason ön işlemi ile yapılan kurutma işleminde 45°C sıcaklıkta ve 1 m/s hava hızında geleneksel sıcak hava kurutma sistemine oranla (60°C ve 5 m/s) suyun difüzyonla uzaklaşmasında %54 oranında artma olmuş aynı zamanda %35 oranında kuruma zamanında azalma sağlanmıştır. Yüksek hava hızı türbülansa neden olarak ultrason dalgalarının örneklere

etkisini azaltmıştır. Ultrason ön işlemi elmada bulunan B1 B2, B3 ve B6 vitaminlerinin bozulmasını önlemiştir. Bunun sebebi ultrason ön işlemine maruz bırakılan örneklerin düşük sıcaklıkta kurutma işlemi ile istenilen sonuca ulaşması olarak açıklanmıştır. Ancak B5 ve E vitaminlerindeki kayıp kurutma işleminin bazı besleyici değerler açısından taze ürüne göre düşük sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Seiiedlou vd. [22], elma dilimlerinin kurutulması esnasında kuruma kinetiğini incelemek üzere 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda ve 0,6, 1,2 ve 1,8 m/s hava hızlarında sıcak hava tepsisi kurutucuda çalışma yapmıştır. Çoklu regresyon analizi (Multiple Regression Analysis-MRA) sıcaklık ve hava hızıyla birlikte model sabitlerinin bulunmasında kullanılmıştır. Golden Delicious türü elma 5,3×23×38 mm boyutlarında kesilerek kararma reaksiyonunu engellemek için oda sıcaklığında %1 oranında askorbik asit çözeltisine daldırılmıştır. Nem oranını 7,5 (g su/g kuru madde) değerinden 0,3 (g su/g kuru madde) değerine düşürmek için gereken süreler 1,2 m/s hava hızıyla 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda 366, 292 ve 221 dakika olarak hesaplanmıştır. 0,3 g su/g kuru madde oranına ulaşmak için en kısa zaman 70°C sıcaklık ve 1,8 m/s hava hızında ölçülmüştür. Tüm deneylerde elde edilen istatistiksel R^2 , RMSE ve SSE (Sum of Squared Error) değer aralıklarına göre Aghbashlo vd. önerdiği model elmanın kuruma kinetiğini açıklamak için yeterli görülmüştür.

Hoffman vd. [23], infrared kurutma sistemini gıda kurutma işlemine uygulamışlardır. Yapılan çalışmada haşlama ön işleminin, hava hızının ve farklı kurutma sıcaklıklarının; kuruma zamanı ve kalite değişkeni olarak belirlenen tekrar su alma kapasitesi (rehidasyon oranı) üzerine etkisi incelenmiştir. Kurutma işlemi için kullanılan örnekler elma, havuç ve patates olarak seçilmiştir. Gıda örnekleri infrared kurutma (NIR-Near Infrared) sistemi içerisinde hava dolaşımının doğal biçimde olduğu ve zorlamalı hava taşınımının olduğu sistemlerde kurutulmuştur. Zorlamalı hava taşınımı sistemi 0,25 ve 0,5 m/s hava hızında 23 ve 28°C sıcaklıklarda çalıştırılmıştır. Infrared kurutma sisteminin (NIR) kalın dilimlenerek kurutma işlemine maruz bırakılan örneklerin kurutma işlemi sonrası gıda kalitesini koruyacak biçimde muhafaza edilmesi için ideal bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Haşlama ön işlemi ile muamele edilen elma, havuç ve patates dilimleri haşlama ön işlemine maruz bırakılmayan örneklerle göre daha kısa zamanda kuruduğu gözlemlenmiştir. Tekrar su alma oranının haşlama ön işlemine maruz bırakılan örneklerde daha yüksek olduğu görülmüştür. Kurutma işlemi sonrası

maksimum rehidrasyon oranı haşlama ön işlemi ile muamele edilen örneklerde 3,96 iken bu değer ön işlem uygulanmayan örneklerde ise 3,46 değerinde bulunmuştur.

Antal vd. [24], küp şeklinde doğranmış elma örneklerinin kuruma eğrilerini ve kurutma işlemi sırasında enerji tüketimlerini hesaplamak için üç farklı kurutma yöntemi kullanmıştır. Elma küpleri farklı kurutma koşullarında dondurarak kurutma sistemi (FD), sıcak hava destekli dondurarak kurutma sistemi (HAD-FD) ve infrared radyasyon enerjisi destekli dondurarak kurutma sistemi (IR-FD) kullanılarak kurutulmuştur. Kontrol örnekleri ise dondurarak kurutma sistemi ile ön işlem uygulanmadan kurutulmuştur. Sıcak hava destekli dondurarak kurutma işlemi (HAD-FD) 60 ve 80°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Idared türü elma küpleri 5 kWh/m² infrared güç yoğunluğunda kurutulmuştur. Sıcak hava-dondurarak kurutma ve infrared-dondurarak kurutma kombinasyonu sadece dondurarak kurutma sistemine göre kuruma zamanını sırasıyla %27,3 ve %45,5 oranında azaltmıştır. Enerji tüketimi de sıcak hava-dondurarak kurutma kombinasyonunda %34,5 oranında azalırken bu oran infrared-dondurarak kurutma kombinasyonunda %45,1 olarak hesaplanmıştır. İnfrared radyasyon enerjisi ile kurutma sistemi sıcak hava kurutma sistemine kıyasla çok daha hızlı olup infrared radyasyon enerjisi ile ön kurutma yapılan örnekler renk, su aktivitesi ve tekrar su alma kapasitesi açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Deney sonuçlarına göre 60°C sıcaklıkta 5 kWh/m² infrared radyasyon gücünde çalıştırılan sistemde 3, 4 ve 5 dakika boyunca yapılan ön kurutma işlemi ve sonrasında dondurarak kurutma işlemi ile kurutulan örneklerin kuruma süreleri ve enerji tüketimi sadece dondurarak kurutma sistemine göre daha düşük bulunmuştur. Uygulanan Henderson & Pabis ve üçüncü dereceden polinom (third-degree polinomial) matematiksel modellerinin deneysel veriler ile uyum içerisinde olduğu regresyon katsayısı ve karesel ortalama hata gibi istatistiki parametreler yardımıyla anlaşılmış olup kurutma işlemini iyi bir şekilde tanımladığı görülmüştür.

Samadi vd. [25], elma dilimlerinin kurutulması için sıcak hava konvektif kurutma sistemi ve infrared kurutma sistemlerini kullanmıştır. Elma dilimleri 90, 120 ve 150°C sıcaklıklarda konvektif kurutma sisteminde ve infrared radyasyon yoğunluğunun 0,22, 0,31 ve 0,49 W/cm² olduğu infrared kurutma sisteminde kurutulmuştur. Deney sonucunda elma dilimlerinin infrared kurutma sistemi ile kurutulması için gereken minimum enerji miktarı 1 kWh iken sıcak hava konvektif kurutma sistemi ile kurutulan

elma dilimlerinin minimum enerji gereksinimi 7,02 kWh olarak hesaplanmıştır. Kurutma işlemi sırasında harcanan özgül enerji tüketiminin infrared kurutma sisteminde sıcak hava konvektif kurutma sistemine göre %82-86 oranında daha az olduğu gözlemlenmiştir. İnfrared kurutma sistemi ile kurutulan elma dilimlerinin özgül enerji tüketimi (SEC - Specific Energy Consumption) 71,78 -110,35 kWh/kg su değerleri arasında değişirken bu değer sıcak hava konvektif kurutma sistemi için 501,15 – 635,53 kWh/kg su değerleri arasında bulunmuştur. Hesaplanan nem difüzyon değerleri sıcak hava konvektif kurutma sistemi ile kurutulan örnekler için $3,499 \times 10^{-7} - 4,746 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ değerleri arasında iken infrared kurutma sistemi ile kurutulan örnekler için bu değer $3,671 \times 10^{-7} - 5,101 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişmektedir. Aynı zamanda infrared kurutma sistemi ile yapılan kurutma işlemi için aktivasyon enerjisi değeri 140,1 kJ/mol iken bu değer sıcak hava konvektif kurutma sistemi ile yapılan kurutma işleminde 94,62 kJ/mol olarak bulunmuştur. İnfrared kurutma sistemi ile gerçekleştirilen elma kurutma işlemi sıcak hava konvektif kurutma sistemi ile gerçekleştirilen elma kurutma işlemi ile karşılaştırıldığında daha düşük bir kuruma zamanı elde edilmiştir. Efektif nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) infrared kurutma sistemi ile gerçekleştirilen kurutma işleminde sıcak hava konvektif kurutma sistemi ile kurutulan örneklerle kıyasla daha yüksektir. Deneysel çalışmadan elde edilen verilere göre infrared kurutma sisteminin elma dilimlerinin kurutulması için harcanan enerji açısından sıcak hava kurutma sistemine kıyasla daha iyi sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

Lewicki ve Nowak [26] yaptıkları çalışmada, son ürün sıcaklıklarının eşit olduğu durumda infrared kurutma sistemi ve sıcak hava konvektif kurutma sistemi ile kurutulan elma dilimlerinin kalitelerini analiz etmiştir. İnfrared kurutma sisteminde infrared enerji kaynağı ve kurutulacak örnek arasındaki mesafeler 10, 20 ve 30 cm olarak ayarlanmıştır. İnfrared enerji kaynağı $7,875 \text{ kW/m}^2$ olarak belirlenmiş olup kurutma hava hızı 0,5, 1,0 ve 1,5 m/s olarak kararlaştırılmıştır. Konvektif sıcak hava kurutma işlemi 65 ve 75°C sıcaklığında 1,5 m/s hava hızında gerçekleştirilmiştir. Son ürün sıcaklığının kurutulan elma dilimlerinin tekrar su alma kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Konvektif sıcak hava kurutma sistemi ve infrared kurutma sistemi ile kurutulan örneklerin mikroyapısının birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiş olup bu farklılığın kuruma oranlarının farklı olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Çalışmalar sonucu ürünün son durumdaki rengi, tekrar su emme yeteneği

ve kırılmaya karşı dayanım gibi mekanik özelliklerin konvektif sıcak hava kurutma sistemi ve infrared kurutma sistemi de dahil olmak üzere ürünün nasıl bir kurutma sisteminde kurutulduğundan bağımsız olup ürünün kurutma sonrası son sıcaklığına bağlı olduğu görülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Elma, dünyada her kesimden insanın tüketebildiği kolay ulaşılabilen besleyici değeri yüksek bir meyve olmasının yanında saklama koşullarının yeterli olmadığı durumlarda kolay bozulan bir gıdadır. Sağlığımız açısından oldukça faydalı olan elmanın bozulmadan muhafazası zor olduğundan çeşitli muhafaza yöntemlerinin uygulanmasını gerekmektedir. Gıda muhafaza yöntemlerinden en bilinen ve en uygulanabilen yöntem geleneksel sıcak hava konvektif kurutma yöntemidir. Bunun dışında son zamanda gelişen ve istenilen sonuçlar veren infrared radyasyon enerjisi ile kurutma işleminin kullanım alanı artmaktadır. Bu çalışmada en klasik muhafaza yöntemlerinden biri olan sıcak hava konvektif kurutma işlemi ve daha yeni uygulanmaya başlayan infrared radyasyon enerjisi yardımıyla kurutma işlemi elma dilimlerinin kurutulması için kullanılmıştır. Son zamanlarda gıda sektöründe popüler hale gelen kombine kurutma sistemi de infrared ve konvektif kurutma sisteminin birlikte kullanılmasıyla deneysel olarak uygulanmıştır. Kurutma işlemi sırasında farklı sıcaklık ve infrared radyasyon seviyelerinin kurutulacak örnek üzerinde etkilerinin gözlemlenmesi yanında potasyum karbonat çözeltisi, sitrik asit ve askorbik asit karışımı çözeltisi ve haşlama ön işlemlerinin kurutma işlemine etkisi incelenmiş olup kurutma sırasında nem oranının matematiksel yollarla hesaplanabilmesi için çeşitli deneysel ve yarı deneysel modeller kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonunda elma kurutma işlemi için en uygun sıcaklık değerinin, infrared radyasyon seviyesinin, ön işlem yönteminin, kuruma zamanının ve matematiksel modelin bulunması amaçlanmıştır. Bunun yanında uygulanan kombine kurutma sisteminin kurutma işlemine etkisi yakından gözlemlenmiştir. Literatürde az sayıda çalışma mevcut olan potasyum karbonat ve zeytinyağı karışımından oluşan çözelti ile ön muamele yönteminin kuruma karakteristiğine ve kalite parametrelerine etkisi araştırılmış olup elde edilen sonuçların sonraki çalışmalara katkısı olacağı düşünülmektedir.

1.3 Hipotez

Elma kurutma işleminde sıcak hava konvektif kurutma ile kurutulan elmaların ve infrared radyasyon enerjisi ile kurutulan elmaların ön işlem ile muamele edildikten sonra kuruma sürelerinin değişeceği, kalite ve renk açısından daha göze hoş gelen bir hal alacağı düşünülmektedir. Bu işlem için elma dilimleri %0,5 sitrik asit ve %0,5 askorbik asit çözeltisinde, haşlama amaçlı sıcaklığı 80°C olan su içerisinde ve %4 potasyum karbonat ve %0,5 zeytinyağı çözeltisinde ön işlem süresi 1 dakika olacak şekilde bekletilmiştir. Sitrik asit ve askorbik asit çözeltisi ile muamele edilen örneklerin daha açık bir renkte olması beklenmektedir. Ön işlem çözeltileri ile muamele edilen örneklerin yapısında bulunan gözenekler açıldığından kontrol grubu örneklerle kıyasla difüzyon katsayılarının yüksek olması ve kuruma sürelerinin daha kısa olması beklenmektedir. Bu durumun sebebi gözeneklerin açılmasıyla birlikte nem transferinin hızlanması olarak düşünülmektedir.

BÖLÜM 2

ELMA

2.1 Elma Üretimi

Elma, dünya üzerinde en önemli besleyici değere sahip olan bahçe bitkileri arasında 4. sırada olup birçok gıdada hammadde olarak kullanılır. Taze elma, nem oranı yüksek çabuk bozulmaya meyilli düşük raf ömrü olan bir gıdadır [27]. Dünya’da Çin 41390000 ton yıllık elma üretimi ile bu alanda lider konumdadır. Elma üretim alanı 2220230 hektar olup dünyada en geniş elma yetiştirme alanına sahip ülkedir [28]. Çizelge 2.1’de dünya genelinde lider elma üreticilerinin yıllık üretim miktarları ve elma üretimi için ayırdıkları alan verilmiştir. Türkiye 175357 hektar alan ve yıllık 3032164 ton elma üretimi ile Çin ve Amerika’dan sonra elma üretiminde dünyada 3. konumdadır.

Çizelge 2.1 2017 yılında Dünya’da elma üretiminde önde gelen en önemli ülkeler ve üretim miktarları [28]

Ülke	Üretim Alanı (Hektar)	Üretim Miktarı (Ton)	Ürün (Ton/Hektar)
Çin	2220230	41390000	20,5
Amerika	130710	5173670	43,6
Türkiye	175357	3032164	19,1
Polonya	176352	2441393	15,3
Hindistan	305000	2265000	8,2
İran	119528	2096749	19,3
İtalya	57260	1921272	37
Şili	35937	1766210	54,2
Fransa	42678	1710755	44,2
Rusya	188251	1639421	9,6
Brezilya	33138	1300943	43,3

Türkiye, dünyada toplam elma üretimine %3,6 oranında bir katkı sağlamaktadır. Ülkemizde elma üretimine ayrılan alan 175357 hektar olup Çin, Hindistan, Rusya, Polonya'dan sonra dünyada elma üretimi için ayrılan en büyük 5. alandır [28].

2.1.1 Elmanın Yetiştirme Koşulları ve Türleri

Elma diğer meyvelerden daha fazla miktarda ve daha geniş alanda yetiştirilmektedir. Üretimi iklime göre yıldan yıla yaklaşık %20 oranında değişiklik göstermektedir. 100 çeşitten fazla türü bulunmakta olup 20 türü ticari olarak önemlidir. Ancak üretimi yapılan türlerin sadece 5 tanesi dünya elma üretiminde söz sahibidir. Bunlar Delicious, Golden Delicious, McIntosh, Rome Beauty ve Granny Smith türleridir. Yeni elma türleri de piyasada yaygınlaşmaktadır. Bu türler arasında Gala, Fuji, Jonagold, Braeburn ve Lady Williams sayılabilir. Elmanın olgunlaşma koşulları türlerine göre farklılık gösterir. Örneğin; Gala türü elma 100 günde veya daha az günde yetişirken Batı Western Australian türünün yetişmesi için 200 don olayı yaşanmayan gün gerekmektedir.

Elmalar tarımı yapılan iklimlere uyum sağlarlar. Kırmızı elmalar rengini korumak için nemsiz hava isterler ve soğuk bir kış mevsimi birçok elma çeşidinin istediği bir durumdur.

Farklı elma türleri ve çeşitleri aşağıda verilmiştir:

Fuji: Elmanın rengi kırmızı olup etli içyapısı sarı turuncu arası bir renktir. Saklanma koşulları oldukça iyidir.

Gala: Bu elma uzun yıllar bozunmadan saklanabilir. Boyutu orta ya da küçüktür. Sezonun başlangıcı için tüketimi en uygun olan türdür.

Golden Delicious: Eğer dış kabuk yeşil ve iç kısım sarı ise oldukça tatlı ve suludur.

Granny Smith: Sert bir yapıya sahip, yeşil bir dış yapısı ve ekşimsi tadı vardır. Geç hasat edilirse rengi sarıya döner ve ekşimsi tadı ortadan kalkarak tatlı hale gelir.

Gravenstein: Bu elma yeşilimsi sarı renkte olup üzerinde kırmızı şerit çizgiler vardır. Aromatik bir tada sahip olan bu elma tipi uzun süre saklanamaz.

Jonathan: Dışı kırmızı içi beyaz yapıda olan taze yenmesi önerilen elma sosu ve elma suyu yapımında tercih edilen bir türdür.

Red Delicious: Kırmızının değişik tonlarında kabuk rengi olan bu tür uzun zaman saklanabilir.

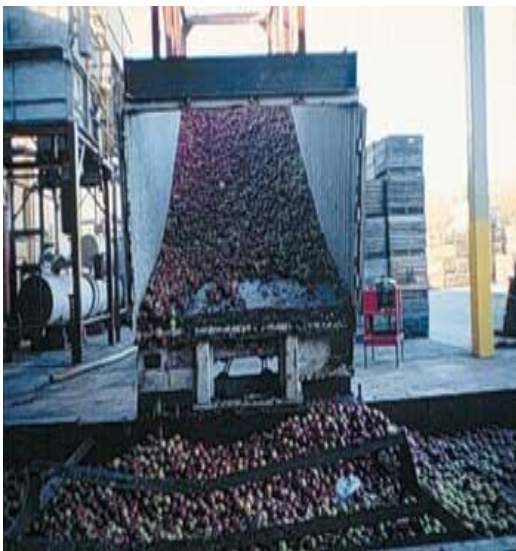
Rome Beauty: Yuvarlak şekle sahip ve sap kısmında derin çukur bulunan bu tür pişirilmiş şekilde tüketilebilir [7].

2.1.2 Türkiye’de Elma Üretimi

Türkiye meyve üretiminde 2016 yılı itibariyle 3329 ha ile toplam tarım arazisinin %14 lük bir bölümünde meyve üretimi yapmaktadır. Meyve üretimi yapılan bu alanlarda 2016 yılı itibariyle 2925828 ton elma üretimi gerçekleştirilmiş olup en fazla üretimi yapılan meyve elma olmuştur [29]. 2017 yılı verilerine göre, ülkemiz elma üretiminde dünyada 3. sıradadır. Dünya genelinde yıllık 83139326 ton üretim yapılmakta olup üretilen miktarın 303164 tonu ülkemizde üretilmiştir. Toplam üretimdeki payımız ise %3,6 oranındadır [28].

2.1.3 Elmanın İşlem Öncesi Muhafaza Edilmesi

Elmalar işlenmek üzere fabrikaya getirildiklerinde bir kısmı bozulmaya uğramaktadır. Sağlam kalan elmalar türlerine göre 1 ile 4°C arası sıcaklıklarda kontrollü atmosferde muhafaza edilmektedir. Kontrollü atmosfer, %2 ile %3 arası oksijen, %1 ile %4 arası karbondioksit ve düşük sıcaklıktan oluşmaktadır. Elmalar bu koşullarda 4 ile 6 ay arası bekletilebilir. Elmalar, hava soğutmalı depolarda, mekanik olarak soğutulmuş odalarda ve kontrollü atmosferde muhafaza edilir. Şekil 2.1’de elmanın hasadından sonra işlenmek üzere fabrikaya getirilmesi görülmektedir.



Şekil 2.1 Elmanın işlenmesi için üretim tesisine getirilmesi [30]

Elmalar güzelce yıkandıktan sonra işlenmek üzere hazır hale getirilir. İşlenmesi kapasite sorunu sebebiyle sonraya bırakılan elmalar kontrollü atmosferde işlenene kadar muhafaza edilir.

2.1.4 Elmanın Besleyici Değeri ve Faydaları

Elma işlemenin yan ürünü olan elma kabuğu yüksek oranda fenolik içeriğe sahiptir. Bu fenolik içerik sıcaklığa duyarlı ve kararsız yapıya sahiptir. Elma dünya genelinde çok fazla üretilen ve tüketilen bir meyve olmanın yanında yıl boyunca marketlerde bulunduğu için insanların günlük diyetinde önemli pay sahibidir. Elma aynı zamanda fitokimyasal ve flavanoid açısından zengin olup yüksek antioksidan kapasitesine sahip bir meyvedir. Birçok kaynağa göre antioksidanlar elma kabuğunda yoğunlaşmış olup elmanın bütününe göre kabuğunda daha fazladır. Elma kabuğu kurutulmuş elma işleminin yan ürünü olarak ortaya çıkmakta olup meyve suyu üretiminde kullanılmaktadır. Sadece Şili’ de yıllık olarak 9000 ton elma kabuğu üretilmektedir [31]. Elma üretimi Kanada’nın sera sektörüne önemli ölçüde katkı sağlar. Kanada’da marketlerdeki 270 milyon kg elma serada üretilmektedir. Kanada birinci kalite ve yapısal özellikleri iyi olan kurutulmuş elma açısından yüksek potansiyele sahip bir ülkedir [32].

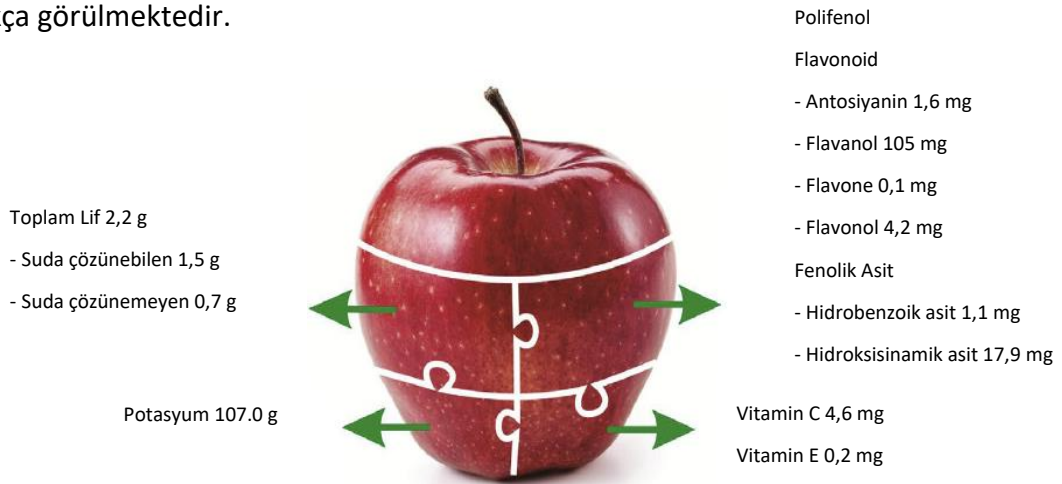
Taze elma, grip hastalığına karşı koruyucu etkiye sahip olup 4 hafta boyunca günde bir elma tüketimi LDL (düşük yoğunluklu lipoprotein) molekülünün vücuttaki oranını azaltmaya yardımcı olur. Son zamanlarda yapılan çalışmalar elma ve türevlerinin vücutta oksitlenmeyi engelleyip antioksidan görevi üstlendiğini ortaya çıkarmıştır. Elmanın yapısında fazla miktarda bulunan faydalı moleküllerin yanında, fenolik açıdan yüksek değere sahip olan elma insan sağlığı açısından önemli bir yere sahiptir. Elmanın yapısında bulunan klorojenik asit kabuğundan çok et kısmında bulunurken kuersetin ise daha çok kabuğunda bulunur. Yapısında bulunan moleküller meyvenin olgunluğuna ve çevresel yetiştirme koşullarına göre değişik oranlarda bulunur. İşlenmemiş elma işlenmiş elmaya kıyasla daha fazla besleyici değere sahiptir. Ancak, işlenmiş meyveler (kurutulmuş elma gibi) uygun yöntemlerle istenilen besleyici değerlere ulaşabilmektedir [33]. Elma dünyada en fazla üretilen ve tüketilen meyve olmasının yanında sadece taze olarak tüketilmez. İşlenmiş olarakta (meyve suyu, reçel gibi) tüketilmektedir. Bu açıdan, hazır gıda, atıştırmalık, kahvaltılık, bebek maması gibi

fonksiyonel birçok ürün içerisinde kurutulmuş elmalara rastlanmaktadır. Elma, lif ve fenol bileşenleri açısından temel bir gıdadır. Fenol, antioksidan kapasitesi yüksek bir bileşendir. Elmanın işlenme süreci antioksidan potansiyelini ve diğer kalite parametrelerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin kurutma işlemi elmada oksidasyon, kararma ve büzülme gibi sorunlara yol açmasının yanında daha birçok fonksiyonel özelliğin etkilenmesine sebep olmaktadır [34]. Elma; dünya genelinde en fazla üretilen, ekonomik değeri olan ve kuersetin değeri yüksek olan bir meyvedir. Kuersetin, flavonoid grubuna ait ikincil bir polifenol bileşenidir. Bu doğal antioksidan kalbe iyi gelmekle birlikte kansere karşı koruyucu etkiye sahiptir. Kuersetin genelde elma kabuğunda bulunur ve elmanın içerisindeki faydalı moleküllerin güneşin ultraviyole ışınlarından korunmasına yardımcı olur. Ama işlenmiş elmalar kabuklarından yoksun olduğu için kuersetin değeri düşüktür. Elma kabuğu ve posası potansiyel olarak sağlığa faydalı kuersetin gibi fonksiyonel bileşenler açısından zengindir [35].

Elma günlük diyeteye önemli katkı sağlamanın yanında kalp ve damar sorunlarını giderme açısından faydalı bir meyvedir. Elma; damar fonksiyonuna, kan basıncına, kandaki yağ miktarına, iltihaba ve kan şekerinin ayarlanmasına pozitif katkı sağlar. Elma ve diğer meyvelerin sağlık açısından bu derece önemli etkilere sahip olması yapılarındaki yüksek fenolik bileşenler sayesinde.

2.1.5 Elmayı Oluşturan Bileşenler

Şekil 2.2’de 100 g taze işlenmemiş elmanın değerlerini göstermektedir. Elmanın fenolik asit, polifenol, lif, potasyum, C ve E vitaminleri açısından zengin olduğu Şekil 2.2’de açıkça görülmektedir.



Şekil 2. 2 Elmada bulunan faydalı bileşenler [36]

Çizelge 2.2’de 454 gram elmanın besleyici değerleri protein, yağ, karbonhidrat, fosfor, kalsiyum ve verdiği enerji açısından gösterilmektedir. Elmanın kurutularak işlenmesi ile elde edilen ürünlerin diğer elmadan elde edilen türevlerine göre protein, yağ, karbonhidrat, fosfor, kalsiyum ve verdiği enerji açısından daha yüksek değerler elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 2.2 Elmanın besleyici değerleri (454 g) [30]

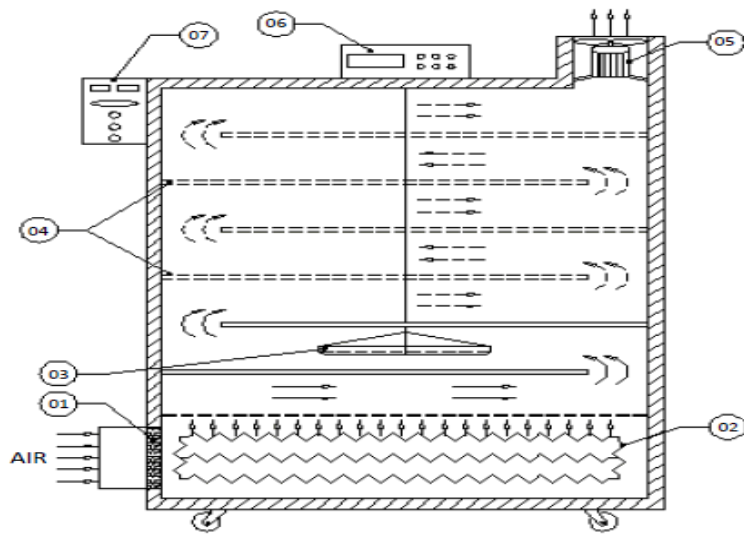
Ürünler	Enerji (Kalori)	Protein (g)	Yağ (g)	Karbonhidrat (g)	Kalsiyum (mg)	Fosfor (mg)
Taze elma	242	0,8	2,5	60,5	29	42
Elma sosu	413	0,9	0,5	108	18	23
Elma suyu	213	0,5	0,1	54	27	41
Donmuş elma dilimi	422	0,9	0,5	110,2	23	27
Kurutulmuş elma dilimi (%24)	1247	4,5	7,3	325,7	141	236
Kurutulmuş elma dilimi (%2)	1601	6,4	9,1	417,8	181	299

Elmanın %84 oranında kısmını su oluşturmaktadır. Kalan kısmının %14 oranında kısmını karbonhidrat ve %1 oranında kısmını lif ve şeker (başlıca fruktoz) oluşturmaktadır. Elma, E ve C vitaminlerini bünyesinde barındırır. Ayrıca yapısında mineraller (başlıca potasyum) ve fenoller de bulunmaktadır. Başlıca elma ürünleri arasında elma suyu (bulanık ve açık), fermente elma şırası ve sirke bulunmaktadır. Bulanık elma suyunda düşük şeker ve yüksek pektinin yanında yüksek oranda fenol bulunmakta olup pektin ve fenol değerleri taze elmaya göre düşüktür. Başlangıçta elma suyu üretimi atığı olarak düşünülen elma posası bilimsel çalışmalar sonucu yüksek lif ve fenol içerdiği anlaşıldığından tekrardan ekonomiye kazandırılmaktadır [36].

3.1 Kurutma İşlemi

3.1 Kurutma İşlemi

Kurutma işlemi, maddelerin içerdikleri su oranını istenilen seviyeye çekmek ya da tamamen uzaklaştırmak olarak kabul edilebilir. Bilimsel olarak kurutma işlemi madde içeriğindeki suyun değişik yöntemler kullanarak arındırılması ya da sınırlandırılmasıdır. Zaman içerisinde su miktarının ısı ve kütle aktarımıyla istenen seviyeye çekilmesi olarak da tanımlanabilir. Belirlenen zaman içinde maddenin amaçlanan nem oranına getirilmesi için kullanılan ısıtma ve nem alma gibi sistemlerden oluşan yapı kurutma sistemi ya da kurutucu olarak adlandırılır. Şekil 3.1 kabin kurutucunun şematik diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.1 Kabin kurutucunun şematik diyagramı [37]

1 numaralı kısım kurutma havası giriş yaparken havanın temizlenmesini sağlayan hava filtresini, 2 numaralı kısım havanın ısınmasını sağlayan ısıtıcıları göstermektedir. Yine Şekil 3.1’de görülen 3 numaralı kısım örneklerin kurutulmak üzere üzerine yerleştirildiği tepsiyi, 4 numaralı kısım kurutucu içerisinde sabit olan orijinal tepsileri, 5 numaralı kısım kurutma işlemi sonrası nem kazanmış havanın çıkış fanı, 6 numaralı kısım elektronik hassas teraziye ve 7 numaralı kısım ise kurutma işleminin kararklı bir halde devam etmesi için gerekli PID kontrol birimini göstermektedir.

3.1.1 Kurutma İşleminin Amacı ve Önemi

Kurutma işlemi; çimento, gıda, kereste ve kimya endüstrisinde de kullanılan temel bir işlemdir. Gıda kurutma işlemi gıda içerisindeki su seviyesinin kimyasal değişimler ve mikrobiyal etkilerle gıdanın bozulmasına yol açamayacak seviyeye çekilmesi işlemidir. Gıdanın kurutulmasında amaç uzun süre bozulmadan kullanılabilecek ürünler elde etmektir. Gıdanın nem içeriğini, enzim aktivitesini ve bazı metabolik aktiviteleri sınırlayarak raf ömrünü uzatan kurutma işlemidir. Nem içeriğinin düşürülmesi gıdanın sadece raf ömrünü uzatmaz aynı zamanda besleyici değerlerinin kaybolmasını da engeller. Kurutularak hacim ve ağırlığı azaltılan gıdalar daha kolay biçimde taşınır ve depolanır. Gıdalara, özellikle meyve ve sebzelere kurutma işlemi oldukça fazla uygulanır. Türkiye kuru meyve ve sebzelerin üretilmesinde ve ihracatında geçmişten günümüze dünyada önemli bir paya sahiptir. Kuru meyve ve sebze ihracatı dış ticaret gelirleri arasında ilk sıralardadır. Meyve ve sebzelerin hasadı ve kurutularak işlenmesinin en önemli sebebi iklimin uygun, hasadın kolay ve işçilik maliyetlerinin düşük olması olarak açıklanabilir. Ülkemizde kuru meyve imalatı sıradan ve teknolojik olmayan yöntemlerle yapılmaktadır. Meyve üreticileri kurutma işlemi için her türlü dış etkene açık ortam koşullarını kullanmaktadır. Kurutma öncesi yapılmayan hazırlık ve kurutma sonrası yapılması gereken periyodik kontrollerden yoksun olarak yapılan bu kurutma işlemi önemli derecede kalite kayıplarına yol açmaktadır.

3.2 Biyolojik Materyallerin Kurutulması

Gıdaların kurutulması sadece ekipman seçimine bağlı değildir. Gıda kurutma işlemindeki fiziko-kimyasal değişimler uygun kurutma yöntemiyle analiz edilip ortadan kaldırılmalıdır. Kurutma işleminde iyi bir tasarım ve optimizasyon işlemi yapabilmek için ısı ve kütle transferi de iyi anlaşılmalıdır. Kurutma ve buharlaştırma işlemleri ısı ve kütle

transferlerini içeren temel işlemlerdir. Kurutma işleminde enerji ihtiyacı başlangıç nem miktarı, kuru gıdanın nem miktarı, bağıl nem, kurutma sıcaklığı ve kurutma hızı gibi birçok etmene bağlıdır. Farklı matematiksel modeller gıdaların kurutulması için kurutucu tasarımları ve kurutma işlemi standardizasyonunda kullanılır.

3.2.1 Meyve ve Sebzelerin Kurutulması

Meyve ve sebzeler için kurutma işlemi en eski muhafaza etme yöntemlerinden biridir. Kurutma gıda endüstrisinde temel işlemlerden biridir. Meyve ve sebzelerin kurutulması raf ömrünü uzatmakla beraber depolama esnasında ürün kaybını azaltır. Aynı zamanda hacim ve ağırlık azalmasıyla taşınma sırasında kolaylık sağlar. Uygun kurutma işlemleri ile uygun koşullarda taze ürünlerdeki besleyici değeri yüksek ve duyu kalite açısından istenilen sonuçlar alınabilir. Aksi durumda önemli bozulmalar olabilir.

3.2.2 Elmaların Kurutulması

Elmanın kurutulması sırasında iki yol takip edilir. Öncelikle nem miktarının değişimini anlamak için elmanın ağırlığındaki değişim takip edilir. Kurutma işlemi sırasında katı madde miktarının değişime uğramadığı kabul edilir. Sonrasında kurutma işleminin istenilen standartlarda gerçekleşip gerçekleşmediğini anlamak için duyu kontroller yapılır. Bu işlemler sonunda elma kurutma işlemi tamamlanmış olur. Elmanın taze ve kurutulmuş hali Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Taze ve kurutulmuş elmanın görüntüsü [7]

Elma içeriğindeki tannik asit sebebiyle, kesilen yüzey hava ile temas ettiğinde yüzeyde polifenoller oluşarak esmerleşme reaksiyonları meydana gelir. Bu tarz renk değişimlerini önlemek için limon suyu, sitrik asit çözeltisi, askorbik asit-sitrik asit çözeltisi ya da askorbik asit-sakkaroz karışımı kullanılabilir.

Kurutma sonrası yapılan duyu sal kontroller esnasında elmalardaki renk değişimi gözlenebilmektedir. Kurutulmuş elmalar elastiki olmalı ve ikiye katlandığında kırılmamalıdır. Kurutulan elma dilimleri bir kesici ile ortadan kesildiğinde merkezlerinde nem bulunmamalıdır.

Ağırlığın değişimi ile analiz yapılabilmesi için öncelikle kuru madde miktarının bulunması gerekir. Kurutma işlemi öncesi elmalar kurutma işlemine göre 70-105°C sıcaklık aralığında fırın içerisinde 10-30 dakika aralıklarla bekletilerek art arda yapılan iki tartım sonucu elde edilen ağırlık farkının %1 oranından az olması durumunda elmalar kurutulmuş kabul edilir. Elmada kuru baza göre su oranını hesaplamak için (3.1) eşitliği kullanılabilir.

$$MR_{DB} = \frac{M_{wb} - M_{db}}{M_{db}} \quad (3.1)$$

Elmada yaş baza göre su oranı hesaplamak için (3.2) eşitliği kullanılabilir.

$$MR_{WB} = \frac{M_{wb} - M_{db}}{M_{wb}} \quad (3.2)$$

Elmanın kurutma işlemi sonrasında bozulmadan muhafaza edilebileceği su oranı %18 (0,18 g su/g kuru madde) olarak kabul edilir. Su miktarının bu seviyede tutulması gıda içerisinde küflerin ve toksin oluşumuna sebep olan mikroorganizmaların üremesi için gerekli olan su aktivite (a_w) değerini sınır değerin altına çeker. Gıdanın su aktivite değeri kimyasal ve mikrobiyolojik olayları etkilediğinden metabolik olaylar üzerinde önemli etkiye sahiptir [10]. Çizelge 3.1 gıdalara etki eden toksinejik küfleri ve toksin üretimi için gerekli olan minimum su aktivite değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.1 Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli minimum su aktivitesi (a_w) değerleri [10]

Oluşturulan mikotoksinler	Küfler	Minimum su aktivitesi değerleri	
		Faaliyet için	Toksin üretimi için
Aflatoksin	<i>Aspergillus flavus</i>	0,82	0,83-0,87
	<i>A. parasiticus</i>	0,82	0,87
Ochratoksin	<i>A. ochraceus</i>	0,77	0,85
	<i>Penicillium cyclopium</i>	0,82-0,85	0,87-0,90
Patulin	<i>P. expansum</i>	0,81	0,99
	<i>P. patulum</i>	0,81	0,95
Stachybotryn	<i>Stachybotrys altra</i>	0,94	0,94

Kurutma işlemi ile su aktivitesi 0,6 değerinin altına çekildiğinde aflatoksin, ochratoksin, patulin ve stachybotryn gibi mikotoksinlerin gıdalarda oluşumu engellenir ve gıdalar güvenli hale getirilir [10].

3.3 Kurutma İşleminde Temel Terminolojiler

3.3.1 Adyabatik Doygunluk Sıcaklığı (T_{ad})

Adyabatik koşullarda hava-buhar sistemlerinde bulunan sıcak gazın enerjisi ile ortamdaki sıvıyı buharlaştırması ve yine buharlaşan sıvı ile gazın doymuş hale geldiği sıcaklıktır. Sadece hava/su sistemleri için ıslak termometre sıcaklığı olarak da adlandırılır.

3.3.2 Bağlı Nem

Kurutulacak maddeye fiziksel ya da kimyasal olarak bağlı bulunan ve aynı sıcaklıkta saf suya kıyasla daha düşük buhar basıncı olan nem içeriğidir.

3.3.3 Sabit Kuruma Periyodu (N_c)

Sabit kurutma koşullarında gıdanın birim alanından birim zamanda buharlaşan nemin sabit olduğu periyottur. Bu durum yüzey nemi gıdadan uzaklaşırken gerçekleşir.

3.3.4 Çiy Noktası (T_d)

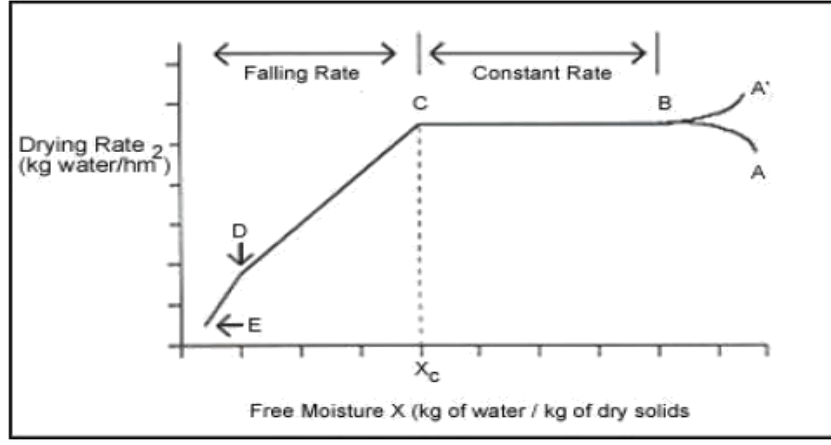
Doymamış hava-buhar karışımının doymuşluğa ulaştığı sıcaklıktır.

3.3.5 Denge Nem İçeriği (X_e)

Belirli bir sıcaklık ve basınçta hava-buhar karışımı ile nemli gıdanın dengede olduğu andaki nem içeriğidir.

3.4 Kuruma Eğrilerinin Karakteristikleri

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere kurutma işlemi sabit ve azalan periyot olmak üzere ikiye bölünebilir.



Şekil 3.3 Kurutma işleminde sabit ve azalan hız periyodu [7]

Sabit Hız Kuruma Periyodu (B-C): Eğer materyal kurutma işleminin başında ıslaksa, sıvı akışı hidrolik değişken ile olur. Nem serbest olmakla birlikte tüm gücüyle buhar basıncı uygular. Bu esnada nem yüzeyde ve en büyük kapillerler içerisinde bekler. Yüzey sıcaklığı ıslak termometre sıcaklığına eşit kabul edilir.

İlk Azalan Kuruma Periyodu (C-D): Nem tüm gücüyle kapiler damarlar arasından buhar basıncı uygulamaya ve taşınmaya devam eder. Sıcaklık yükselir ve ıslak termometre sıcaklığını geçer.

İkinci Azalan Kuruma Periyodu (D-E): Kuruma oranı ve nem buhar basıncı hızla düşer.

3.5 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Meyve ve sebzelerin etkileşim alanı ve hacmi kurutma işlemi esnasında önemli değişikliklere uğrar. Kurutma işleminde su buharlaştıkça etkileşim alanı yüzeyin büzülmesinden dolayı azalmaktadır. Değişiklikler sonrası gıdanın içerisinde ve dışarısında meydana gelen durum kurutma işleminde modelleme işlemi oldukça karmaşık hale getirmektedir. Değişen kurutma koşulları yardımıyla kurutma kinetiğinin hesaplanması uygun kurutma koşullarının bulunmasına yardımcı olmaktadır. Farklı çalışmalarda çeşitli modeller kurutma işlemi tanımlamak için kullanılmaktadır. Page, Modifiye Page, Logaritmik, Henderson & Pabis, Newton ve Midilli ve Küçük modelleri kurutma işlemi tanımlamak için kullanılan modellerden bazılarıdır [7].

3.6 Kurutma İşleminde Ön İşlemin Önemi

Kurutma işlemi hasat sonrası ürünün bozulmasını engellemek için yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Kuru gıda endüstrisi, gıda endüstrileri arasında en önemlisidir. Uygun modelleme endüstriyel kurutma işlemi için oldukça gereklidir. Ancak meyve ve sebzeler

%80-95 arası nem içerdiğinden bunların kurutulmasının modellenmesi zordur. Simülasyon ve teorik uygulamalar nemin uzaklaştırılması için önemlidir. Son yıllarda endüstriyel kurutuma işlemi, gıdaların bozulmaya ve besleyici değer kaybına karşı korunması için herkes tarafından kabul gören bir yöntemdir. Ancak kurutma işlemi gıda endüstrisinde çok enerji tüketen ve zaman alan bir işlemdir. Bu duruma çözüm olacak şekilde farklı ön işlemler gıdalara uygulanarak zaman kazanılmış ve enerji verimliliğinde artış sağlanmıştır. Ön işlemler gıdaların yüzeylerinde meydana gelen kararma sorunlarına ve besleyici değerlerin kaybolmasına çözüm olarak sunulmaktadır. Tüketiciler duyuşal ve besleyici değerleri yüksek olan gıdaları daha çok tercih etmektedirler. Bu sebeple, duyuşal ve fiziksel özelliklerin korunması yanında renk ve nem içeriğı değerlerinin istenilen seviyede olması için optimizasyon çok önemlidir. Yüksek sıcaklık, kurutma sırasında kalitenin duyuşal açıdan bozulmasına ve besleyici değer kaybına yol açmaktadır. Ön işlem bu gibi durumların önlenmesi için gereklidir.

3.7 Ön İşlemin Kurutma Üzerine Etkisi

Genelde tünel kurutucu, ısı pompası kurutucu, vakum kurutucu, dondurarak kurutucu, güneş enerjili kurutucu, konvektif sıcak hava kurutucu ve doğal güneş enerjisi yardımıyla açık havada kurutma sistemi ile meyve ve sebzeler kurutulmaktadır. Bunların arasında konvektif (iletim) sıcak hava kurutma sistemi gıda endüstrisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak meyvelerin kurutulması işlemi enerji ihtiyacı ve maliyeti yüksek olan bir işlemdir. Enerji maliyeti düşük ve besleyici değeri yüksek olan ürünler elde etmek için kurutma işlemine başlamadan önce ön işlem uygulanır. Kimyasal (inorganik ve organik) ve fiziksel (ısıtma, haşlama, dondurma, ultrason vb.) olmak üzere iki temel ön işlem vardır. Ön işlemlerin en önemli katkısı kurutma işlemini hızlandırması, enzimlerin inaktivasyonu ve dokusal yumuşamaya sebep olmasıdır. Son zamanlarda uygun üretim yöntemleri hem üretici hem de tüketici tarafından oldukça önemli hale gelmiştir. Ön işlemin uygulanması sıcaklığa karşı bozulmayı engellemesinin yanında enerji tüketimini ve ürün kaybını azaltır.

3.8 Elmanın Besleyici Değerini Korumak için Kurutma İşlemi Öncesi Yapılan Ön İşlemin Önemi

Elma, önemli biyolojik aktivitelere olanak sağlayan fenolik bileşen kaynağıdır. Fenolik bileşenler meyveye dağılmış biçimde bulunsada bunların çoğı kabuk kısmında

bulunur. Kuversetin, klorojenik asit ve antosiyanin bilinen en önemli fenolik bileşenlerdir. Bu bileşenler serbest ya da şekerlere bağlı halde meyve içerisinde bulunmasının yanında flavanoid ailesinin birer parçasıdır. Bu bileşenlerin kalp ve dolaşım sistemine faydalı olduğuna dair birçok çalışma mevcuttur [38]. Elmanın işlenmesi, örneğin elma suyu üretimi ve elmanın kurutulması posa gibi yan ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olur. Elma posası içinde elmanın özü, kabukları ve fitokimyasallar konsantre halde bulunur. Önceki yapılan çalışmalar elmanın endüstriyel olarak işlenmesi sırasında fitokimyasalların yaklaşık %58 oranında elma posasında kaldığını göstermiştir [39]. Elma posası sağlığı artırıcı fitokimyasalların önemli bir kaynağı olmasının yanında çeşitli gıdaların üretiminde önemli bir bileşendir. Genelde elmanın işlenmesi sırasında ortaya çıkan yan ürünler gübre, yem ve pektin kaynağı olarak kullanılır. Son zamanlarda yapılan bir çalışma elma posasının besleyici değeri yüksek ve sağlıklı olduğu için kek hamurunda bileşen maddesi olarak kullanıldığını göstermiştir.

Taze elma posası içeriğindeki polifenoller enzimatik esmerleşme reaksiyonlarında substrat olarak görev aldığı için oksidasyon reaksiyonlarına karşı duyarlıdır. Enzimatik esmerleşme polifenol oksidaz enzimi tarafından tetiklenir. Bu yüzden kurutma öncesi ön işlem fitokimyasalların değişimini azaltarak kararlı bir ürün elde etmek için gereklidir. Kurutma işlemi muhafaza yöntemi olup elma ürünlerinin raf ömrünün uzatılmasında ve bozulmadan korunmasında kullanılır. Ancak elma kurutmada yüksek sıcaklık uygulaması bozulmaya ve flavanoid gibi termal açıdan sıcaklığa hassas bileşenlerin değişimine sebep olur. Bozulma reaksiyonları kurutma öncesi haşlama ve kimyasal katkı maddelerinin eklenmesi gibi ön işlemler ile azaltılabilir ve böylece polifenol gibi bileşenlerin termal açıdan bozulmaları azalır.

Elma dokusunun yapısında bağlı bulunan polifenol kurutma sırasında yapıda meydana gelen değişimler ile antioksidan aktivitesinin artmasını sağlar. Bunun yansira termal işlemler polifenollerin kimyasal değişimine sebep olarak bozulma ürünleri ortaya çıkarır. Bu bozulma ürünleri nadir olsa da antioksidan aktivitesini koruyabilir ya da daha yüksek antoksidan aktivite değerine sahip olabilir. Termal işlemlerin gıda işleme üzerine etkisinin bilinmesi gıdalarda maksimum fitokimyasal bileşenlerinin kararlılığı için önemlidir [40].

3.9 Kurutma İşlemi Öncesi Uygulanan Ön İşlemler

Su aktivitesini mikroorganizmaların, enzimatik reaksiyonların ve diğer bozunma reaksiyonlarının gerçekleşemeyeceği seviyenin altına çekerek raf ömrünü uzatan muhafaza yöntemi kurutma işlemidir. Kurutmanın sayısız faydası olmasının yanında yüksek sıcaklıkta kurutma işlemi ısıya hassas ürünlerin kalitesini düşürür. Düşük sıcaklıkta kurutma işleminde ısının ürüne verdiği zarar azdır ancak bu durum kurutma zamanını artırır ve kalite kaybına sebep olur. Farklı ön işlemler kurutma işlemini olumlu yönde etkilemek için başarılı biçimde kullanılmaktadır.

3.9.1 Dondurma ve Çözme

Dondurma ve daha sonra çözme ön işlemi kurutma sırasında ısı aktarımını artırır. Bu ön işlem ürünün yapısının değişime uğramasına sebep olarak özellikle hücre duvarlarını zayıflatır ve kurutma sırasında suyun kolayca uzaklaşmasına yardımcı olur.

3.9.2 Haşlama

Enzimatik reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan tat ve renk değişimi diğer bir ön işleme yöntemi olan haşlama ile engellenir ve suyun aktarımı kolaylaşır. Haşlama işlemi gıdanın buhar ya da sıcak suyla muamele edilmesidir. Böylece enzimler inaktive olur.

3.9.3 Çözeltiye Daldırma

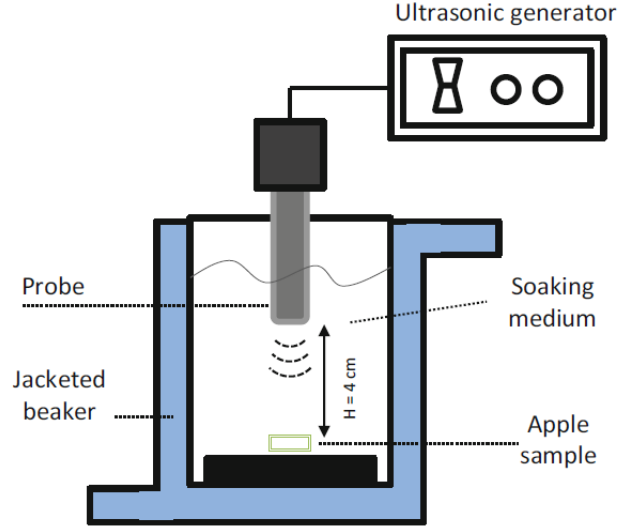
Çözeltiye daldırma işlemi gıdanın ortalama sıcaklıklarda kısa süreliğine askorbik asit ve sitrik asit gibi organik asit çözeltilerinde bekletilmesidir. Bu işlem gıdanın yapısında hücre duvarının şişmesi ve hücreler arası boşlukların daralması gibi yapısal değişikliklere sebep olarak kütle aktarımını etkiler ve böylece kurutma zamanının değişimine sebep olur. Meyve ve sebzelerin hücresel yapısı yarı geçirgen olarak bilinir. Kütle aktarımı doku içerisindeki suyun ve daldırıldığı çözelti içerisindeki suyun kimyasal potansiyelinin farklı olmasından kaynaklanır. Çözeltiye daldırma işlemi sırasında kütle aktarımı daldırılan çözeltilerin içeriğine, kurutulacak maddenin yüzey alanına ve daldırılan çözeltilerin sıcaklığına bağlıdır. Genelde çözeltiye daldırma yavaş bir işlem olup kaliteyi olumsuz etkilemeden kütle aktarımını hızlandırmak için ekstra işlemlere gerek duyulur. Çözeltiye daldırma işleminde kullanılan askorbik asit ve sitrik asidin belirli yüzdelerde çözeltileri kurutulacak gıdanın yüksek sıcaklıklarda görünümünü ve tadını muhafaza etmek için kullanılır. Askorbik asit ve sitrik asit ile muamele edilen gıdanın

yüzeyinde yüksek sıcaklıklarda enzimlerin sebep olduğu esmerleşme reaksiyonları meydana gelmez.

3.9.4 Ultrason

Son zamanlarda ultrason destekli ön işlemler konvektif sıcak hava kurutma işleminde gıdalardan suyun uzaklaştırılmasını hızlandırmaktadır. Gıdanın neminin dışarıya çıkmasını engelleyen iç direnç, ön işlemler sayesinde üstesinden gelinerek istenilen kütle aktarımı sağlanır. Ultrasonun sebep olduğu akustik enerji mikroskopik kanallar yaratarak suyun yüzeye doğru çıkmasına yardımcı olur ve neticede efektif su difüzyonunu artırır. Ultrason destekli uygulamalar kavun, ananas, elma ve muz gibi ürünlerle daha çok ultrasonik banyolarda (dolaylı sonikasyon) uygulanır. Ancak az sayıda çalışma gerçek akustik yoğunluğun (W/cm^2 , W/mL) ultrasonik banyo yardımıyla ürüne aktarıldığını söylemektedir [41, 42]. Doğrudan sonikasyon istendiği zaman ultrasonik gömme uçları mantar, elma ve havuç gibi ürünler ile kullanılır. Bu durumda güç yoğunlukları $0,04-0,26 W/cm^3$ ve $3,6-11,5 W/cm^2$ arasında değişir.

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere ultrason cihazı, içerisindeki örneğin sıcaklığının sabit tutulması için içerisinde sıvı dolaşımı olan bir ceket, ultrason yoğunluğunu ölçmek için kullanılan bir analiz ucu, örneğin muhafazası için su banyosu ve platformdan oluşmaktadır. Platform ve ultrason yoğunluğunu ölçmek için kullanılan analiz ucu arasındaki mesafe ayarlanabilmekte ve böylece ultrason yoğunluğunun şiddeti değiştirilebilmektedir.



Şekil 3.4 Ultrason ön işleminin deneysel gösterimi [17]

Gıdada mikroorganizma ve enzimlerin inaktivasyonu için en yaygın yöntemler haşlama ve sterilizasyondur. Maalesef yüksek sıcaklık gıdada besleyici değer kaybına, istenmeyen tat oluşumuna ve gıdanın fonksiyonel bileşenlerine zarar vermektedir. Güçlendirilmiş ultrason işlemi bu tarz oluşumlara sebep olmadan ortalama bir sıcaklıkta yüksek basınç ile kavitasyona sebep olarak nemin transferi için uygun bir yol açar. Aynı zamanda bu işlem esnasında ortaya çıkan kayma kuvveti enzimi inaktive eder. Ultrason havuç ve domatestede peroksidaz (POD), mantar ve ananasta polifenol oksidaz (PPO) enzimlerini inaktive ederken gıda endüstrisinde bu teknolojinin kullanılması açısından gelecek vadeder. Ancak ultrasonun enzimi inaktive etmesi pH, sıcaklık, gıdanın yapısı, ultrason yoğunluğu ve işlem zamanı gibi faktörlere bağlıdır [17]. Gıda endüstrisinde ön işlem olarak ultrason kullanımı yeni olmanın yanında yeteri kadar bu işlem üzerine çalışma yapılmamıştır. Ultrason ön işlemi su içeriğini düşürmek ve meyvelerin dokusunun mikroyapısını değiştirerek kurutma işlemini hızlandırmak için kullanılır. Ön işlem yöntemi; etkinliği kabul gören, gıdalarda fonksiyonel bileşenlerin korunmasını sağlayan, yaklaşık oda koşullarında uygulandığı için sıcaklığa karşı duyarlı olan maddelerin bozunmasını önleyen bir yöntemdir. Ultrason, frekansı 20 kHz ve 100 kHz arası değişen hava titreşimlerinin katı, sıvı ve gaz ortamlarda yaratılmasıyla ortaya çıkan mekanik dalgalar olarak tanımlanır. Havanın değişen oranlarda sıkıştırılıp genişletilmesiyle ultrasonik dalgalar oluşturulur. Bu durum, süngerin sıkılıp bırakılması gibidir. Sünger etkisi de denilebilir. Ultrason gıdada kavitasyona sebep olarak sıkı

biçimde bağlı bulunan suyun gıdadan uzaklaşmasını sağlar. Meyve gibi gözenekli gıdalarda ultrason işlemi mikroskopik kanallar açarak nemin uzaklaşmasına olanak sağlar [7].

3.9.5 Ozmotik Kurutma

Ozmotik kurutma işlemi gıdanın dokularından suyun kısmen uzaklaştırılması için hipertonik çözelti içerisinde gıdanın bekletilme işlemidir. Yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak gıdanın çözelti ortamında gereğinden fazla çözünmüş maddeyi içine alması ozmotik kurutma işleminin potansiyeli sınırlamaktadır.

Kurutulacak gıdanın yüksek ozmotik basınca sahip çözelti içerisinde bekletilerek kısmi olarak nemin uzaklaştırılmasına neden olan ozmotik kurutma orta seviye nem oranı içeren gıdalar üretir. Ancak bu nem içeriği ve su aktivite değeri raf ömrü uzun ürünler elde etmek için yeterli değildir. Bu yüzden ozmotik kurutma işlemi, kurutma öncesi bir ön işlem olarak kullanılır ve sonrasındaki işlemin zamanını düşürür. Kurutma işlemi öncesi ozmotik kurutma uygulamak gıdanın rehidrasyon özelliklerini, yapısal ve renk özelliklerini iyileştirir. Küp şeklinde doğranan elma örneklerinin içerisindeki suyun uzaklaştırılması sırasında ozmotik kurutma ön işleminin etkisini kütle transfer kinetiği ve su aktivitesi üzerinde görmek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. 60°C sıcaklıkta sükroz ve sorbitol çözeltisi ile muamele edilen elmalar kuruma kinetiği üzerine etki etmemekle birlikte su aktivitesini önemli ölçüde düşürmüştür. Sükroz çözeltisi ile muamele edilen elma küplerinin su aktivite değeri sorbitol çözeltisi ile muamele edilen örneklerle göre daha fazla düşüş göstermiştir. Ozmotik ön işlem ile son ürünün renk kalitesi, mekanik özellikleri ve rehidrasyon oranı yüksek ürünler elde edilmesinin yanında son ürünün yapısal özellikler bakımından güzel görünümü tüketiciler tarafından ürünün kabul edilebilirliğini artırmıştır [19].

3.10 Endüstriyel Kurutma İşlemi ve Dikkat Edilecek Hususlar

Kurutma işlemi ilk çağa kadar dayanır. Gün geçtikçe kurutma yöntemleri gıdaların raf ömrünü uzatmak için geliştirilmiştir. Açıkta kurutma yöntemi gelişen teknoloji ile kapalı bir şekilde makineler sayesinde daha sağlıklı duruma gelmiştir. Kurutma işleminden ayrıca kereste, kimya sanayi ve kâğıt sanayisinde suyun uzaklaştırılması işleminde faydalanılmaktadır. Enerji verimliliği açısından seçilen kurutma işlemi çok önemlidir. Kurutma işlemi ile bozulmanın önlenmesi için asıl amaç gıdanın su aktivite değerinin

sınır değerinin altında tutulmasıdır. Bu sayede gıdanın kalitesi ve besleyici değerleri daha iyi muhafaza edilmektedir.

Dünyanın birçok yerinde kurutma işlemi sanayi tipi kurutucu ya da doğal biçimde yapılmaktadır. Doğal kurutma renk, tat ve sağlık açısından gıdanın kalite değerinde önemli kayıplara neden olmaktadır. Yağmur, rüzgâr, toz ve toprak gibi dış etmenler kurutulacak gıdanın zarar görmesine sebep olmaktadır. Makina yardımıyla kurutma ise yatırım maliyeti ve enerji giderleri açısından olumsuz görölmektedir. Buna rağmen, kapalı ortamda kurutma işlemi daha verimli olmanın yanında kalite ve sağlık açısından açık ortama kıyasla çok daha iyidir.

Kurutma işleminin amacı su seviyesini belirli miktarın altına en az seviyede enerji kullanımı ile çekerek gıdaların raf ömrünün uzatılması olarak açıklanabilir. Suyun uzaklaştırılması endüstriyel işlemlerde en fazla maliyet gerektiren fiziki işlemdir. Kurutma işlemlerinde enerjinin verimli bir biçimde kullanılması bu açıdan çok önemlidir. Enerji efektif biçimde kullanılırsa az enerji kullanarak daha faydalı kurutma işlemi yapılacaktır.

Kurutma işleminin başarıya ulaşması için dikkat edilecek hususlar aşağıda özetlenmiştir:

- En az müdahale gerektiren ve basit işleyen bir kurutma sistemi
- Taze ve sağlıklı ham madde
- En az ürün kaybı ve enerjinin verimli kullanımı
- Kontrollü ve hızlı biçimde nemin uzaklaştırılması
- Uygun ön işlem ile kimyasal ve fiziksel değişimlerin önüne geçilmesi [2]

3.11 Kurutma Mekanizması

Katı maddelerin kurutulması işleminde iki önemli adım vardır. İlk olarak ısının bu maddeye aktarılması ve bu ısı sayesinde madde içerisindeki nemin önce buharlaşması ve sonrasında maddenin içerisinde bulunan kapiler borular sayesinde ortamı terk etmesidir.

Maddeye ısı üç yöntemle verilir. Bunlar aşağıda özetlenmiştir.

3.11.1 Kondüksiyon (Taşınım)

Kurutulması planlanan madde ısının kaynağına doğrudan temas ettirilerek içeriğindeki nemin taşınan ısı ile uzaklaştırılması prensibine dayanır.

3.11.2 Konveksiyon (İletim)

Buharlaşma için gereken ısı hava gibi bir aracı ile taşınarak nemin maddeden uzaklaştırılması ve havaya karışması prensibine dayanır.

3.11.3 Radyasyon (Işınım)

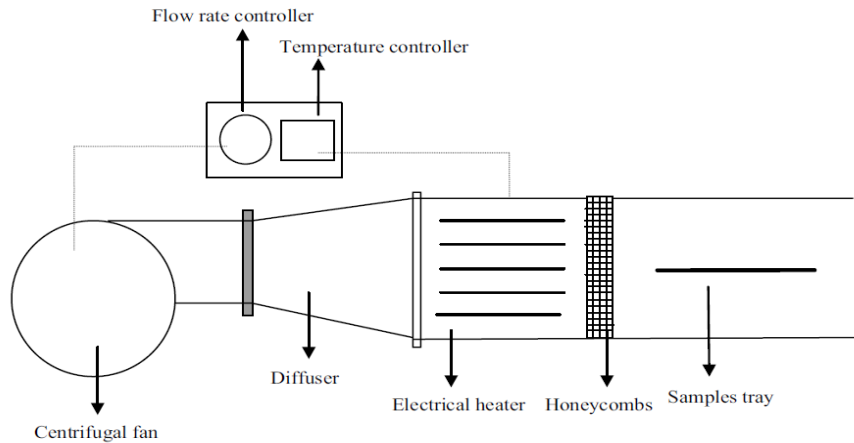
Isı enerjisinin nemi uzaklaştırmak için elektromanyetik ışıma ile doğrudan kurutulması planlanan materyale verilmesi olayına dayanır. Isı enerjisi elektromanyetik dalga yöntemiyle iletiğinden materyale ulaşmak için ara yüzeye ihtiyaç duymaz.

3.12 Kurutma Sistemleri

İçerisinde sıcak hava dolaşımı ile maddelerin kurutulmasına yardımcı olan geleneksel yöntemlerden biri olarak kabul edilen kapalı sistem, kurutma odası olarak adlandırılır. Kurutma odası büyük hacimli endüstriyel materyallerin kurutulması için tercih edilen bir yöntemdir.

3.12.1 Tepsi ya da Kabin Kurutucu

Tepsi ya da kabin tipinde olan kurutucular gıda maddesinden tekstil ürününe çok farklı türde materyali kurutmaya yarayan oldukça kullanışlı makinelerdir. Yapısındaki delikli raflar sayesinde sıcak hava materyale daha iyi temas ederek ısı etkileşim yüzeyini artırır. Bu tarz kurutma sistemi oldukça tercih edilmektedir. Şekil 3.5'te kabin kurutucunun bileşenleri görülmektedir.

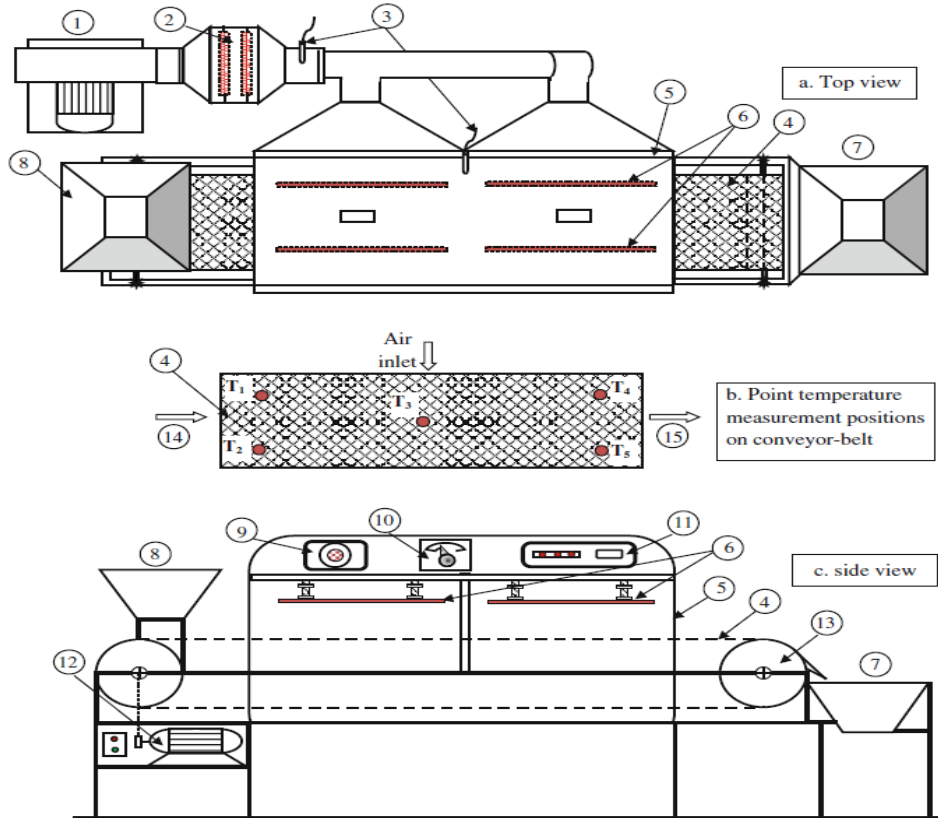


Şekil 3.5 Tepsi/Kabin kurutucu sistemi [12]

Öncelikle girişte havayı dışarıdan kurutucu içerisine çekmeye yarayan santrifüj pompa bulunmaktadır. Çekilen havayı homojen bir şekilde kurutulacak örneklerle dağıtmak için santrifüj pompa sonrasında bir difüzör bulunmaktadır. Difüzör sayesinde homojen bir şekilde dağıtılan hava elektrikli ısıtıcı yardımıyla ısıtıldıktan sonra filtreden geçirilerek kurutulacak madde ile temas ettirilir. Tüm kurutma işleminin seyrinde gitmesi için sıcaklık ve hava akışını kontrol eden kontrol sistemleri de yine kabin kurutucu içerisinde mevcuttur.

3.12.2 Bantlı Kurutucu

Bantlı kurutucular ise yapay bir tünel içerisinde yerleştirilmiş ısı kaynaklarının bant üzerinde hareket eden kurutulacak maddeye ısı enerjisini göndererek nemin uzaklaştırılması prensibine dayanır. Burada bant hızı kurumaya etki eden en önemli faktörlerden biridir. Kurutulması planlanan madde bant üzerine serilerek sistem çalıştırılır. Döner bant sistemi ile maddenin ısı ile teması sağlanır. Bant sistemi duruma göre delikli de olabilir. Bantlı kurutucunun şematik gösterimi Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 Bantlı kurutucunun şematik gösterimi [20]

1 numaralı kısım hava akımı sağlarken 2 numaralı elektrikli ısıtıcı ile kurutma işleminde kullanılan hava ısıtılmaktadır. 3 numaralı kısım kurutucu içerisinde sıcaklık derecesini ölçerken 4 numaralı kısım kurutulacak ürünlerin transferini sağlayan taşıma kayışıdır. 5 numaralı kısım kurutma odası olarak tarif edilirken 6 numara ile gösterilen kısım ürünlerin kurutulması sırasında infrared enerji yayan infrared kurutma cihazıdır. 7 ve 8 numaralı kısımlar sırasıyla çıkış ve giriş haznesi olarak tanımlanırken 9 numaralı kısım infrared enerjiyi üretmeye yarayan elektrik sistemini düzenleyen voltaj düzenleyicidir. 10 numara ile gösterilen kısım sıcaklık kontrolünü sağlayan cihaz olup 11 numara ile gösterilen kısım infrared güç kaynağının seviyesini gösteren Watt ölçerdir. 12 numaralı kısım sistemin çalışması için elektrik temin eden elektrik motorunu temsil ederken 13 numaralı kısım ürünlerin kuruma süresince nakliyesini sağlayan döndürme kayışıdır. 14 ve 15 numaralı kısımlar ise sırasıyla ürün giriş ve ürün çıkış haznelerini göstermektedir.

3.12.3 Tünel Kurutucu

Tünel kurutucu sistemi bantlı kurutucunun benzeridir. Kurutulacak maddeler taşıyıcı yardımıyla tünelden geçirilerek nemi uzaklaştırılır.

3.12.4 Sprey Kurutucu

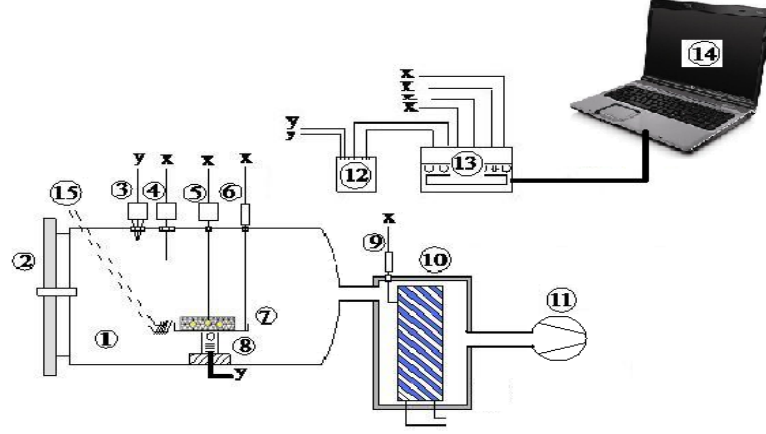
Sprey kurutucu genelde sıvı ve karışımların kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak olan madde pulvarize hale getirilerek çok yüksek sıcaklıktaki gaz karışımının bulunduğu odaya püskürtülür. Sıcak hava ile temas eden materyal nemden arındırılmış olur.

3.12.5 Vakum Kurutucu

Vakum kurutucular atmosfer ortamından izole edilmiş bir ortamda bulunan kurutulacak materyalin vakum pompası ile içeriğindeki nemin istenilen seviyeye çekilmesine yardımcı olur.

3.12.6 Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma işleminde kurutulacak madde önce dondurulur daha sonra vakumlu ortamda içeriğinde bulunan nem miktarı süblimasyon ile azaltılır. Dondurarak kurutma işleminin şeması Şekil 3.7’de görülmektedir.

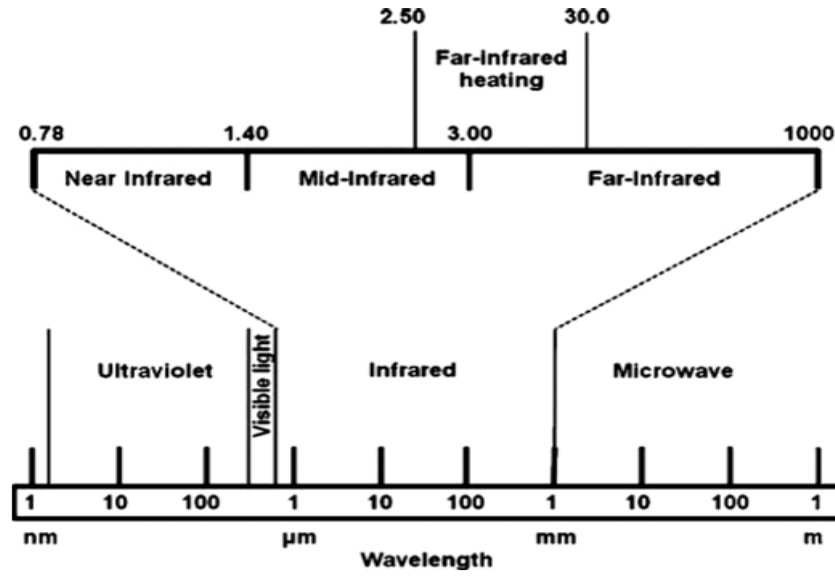


Şekil 3.7 Dondurarak kurutma işleminin şeması [1]

1 numaralı kısım ürünlerin kurutulacağı kurutma odasını göstermektedir. 2 numaralı kısım kuruma sırasında süreci gözlemlemeye kolaylık sağlayacak şeffaf Pleksiglas kapıyı göstermektedir. 3 numaralı kısım vericiyi gösterirken 4 numaralı kısım kurutma odası sıcaklığını ölçen ısıölçeri göstermektedir. 5 numaralı kısım elmaya monte edilmiş ısıyı ölçerken 6 numaralı kısım tepsi ya da raf üzerine monte edilmiş ısıölçerdir. 7 numaralı kısım tepsi ya da raf diye tabir edilen kısmı tarif ederken 8 numaralı kısım yük hücre, 9 numaralı kısım yoğuşturucu yüzey için ısıölçeri gösterirken 10 numaralı kısım yoğuşturucu ünitesini göstermektedir. 11 numaralı kısım vakum pompasını ve 12 numaralı kısım sinyal dönüştürücüyü (E-700) göstermektedir. 13 numara bilgisayara entegre edilen veri kaydediciyi (E-680) gösterirken 14 numaralı kısım tüm süreci yöneten bilgisayarı (Emanager 5.1) göstermektedir. Son olarak 15 numaralı kısım ise elektrikli ısıtıcıdır.

3.12.7 İnfrared Kurutucu

İnfrared kurutucular maddenin nem içeriğini elektromanyetik dalga ile taşınan enerji sayesinde azaltır. Enerjinin taşınması için ara yüzeye ihtiyaç duyulmaz. Bu sistemle kurutulacak maddenin birim alanına verilen enerji konveksiyon (iletim) yoluyla aktarılan enerjiden daha yüksektir. İnfrared (IR) radyasyon dalga boylarına göre 3 (üç) kategoriye (Şekil 3.8) ayrılır: (NIR) Near-infrared – düşük seviye infrared dalga boyu 0,78-1,4 mm arası, (MIR) Middle-infrared – orta seviye infrared dalga boyu 1,4-3 mm arası ve (FIR) Far-infrared – ileri seviye dalga boyu 3-1000 mm arası değişmektedir.



Şekil 3.8 Elektromanyetik dalga spektrumu [43]

Suyun uzaklaştırılmasına en katkı sağlayan NIR (Near-infrared) düşük seviye infrared dalga boyunun kullanıldığı sistemdir. Bu sistemde infrared kaynağı tarafından üretilen elektromanyetik dalga doğrudan su molekülleri tarafından emilir.

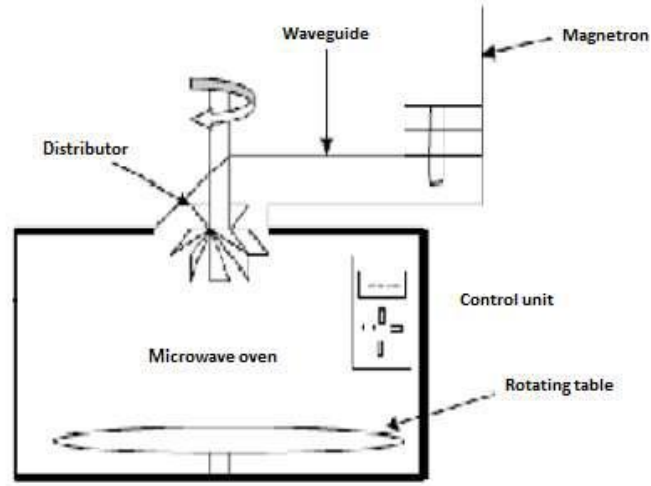
FIR (Far-infrared) ileri seviye infrared dalga boyu kullanıldığında ise infrared enerji yüzeyde emildiğinden su moleküllerini buharlaştırmak için harcanan enerji kayba uğramaktadır.

Aynı şekilde kalın biçimde dilimlenen örneklerin kurutulması sırasında NIR (Near-infrared) düşük seviye infrared dalga boyu kullanan sistem FIR (Far-infrared) ileri seviye infrared dalga boyu kullanan sisteme kıyasla daha iyi kuruma sağlamaktadır.

Yüksek seviye infrared dalga boyu kullanan sistem ince dilimlenen örneklerin kurutulması için ideal bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır [43].

3.12.8 Mikrodalga Kurutucu

Mikrodalga kurutucular, mikrodalga enerjisi ile ortaya çıkan dipol kuvvetler yardımıyla maddenin içeriğindeki su moleküllerini buharlaştırır. Verilen enerji doğrudan suyun buharlaşmasına harcandığından enerji kayıpları azdır. Son yıllarda mikrodalga teknolojisi ile yapılan kurutma işlemleri kabul görmekte olup bu alanda çalışmalar devam etmektedir [8]. Şekil 3.9 mikrodalga sistemini göstermektedir. Mikrodalga kurutucunun çalışma prensibi diğer kurutuculardan farklıdır.

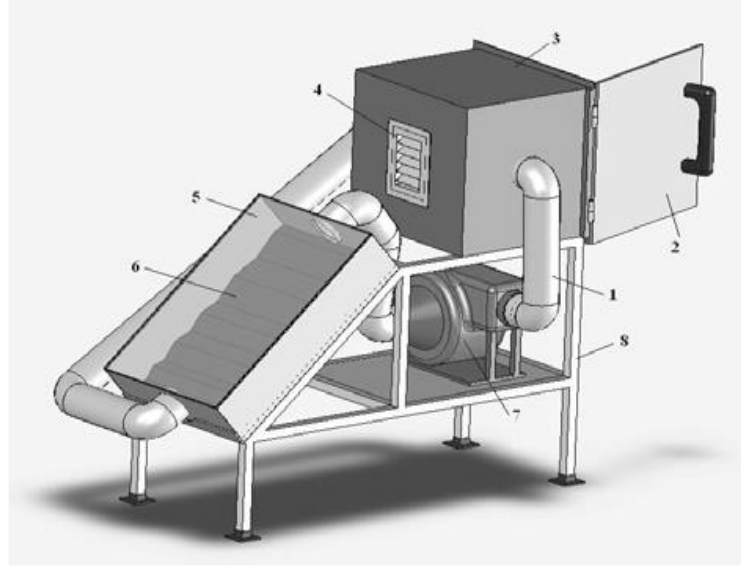


Şekil 3.9 Mikrodalga kurutma sistemi [3]

Magnetron tarafından oluşturulan mikrodalga enerjisi dalga yönlendirici tarafından yönlendirilerek dağıtıcı sayesinde kurutulacak madde üzerine yönlendirilir. Kurutulacak madde döner tepsi üzerinde mikrodalga enerjisine maruz bırakılarak kurutulur. Sürecin sorunsuz bir şekilde sonlanması için mikrodalga kurutucuda kontrol ünitesi de mevcuttur.

3.12.9 Güneş Enerjili Tünel Kurutucu

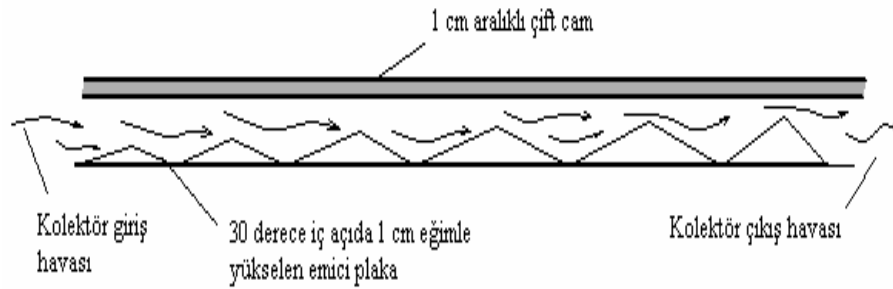
Elma dilimleri genelde sıcak hava kurutma yöntemiyle kurutulmakta olup bunun yanında güneş enerjisi yardımıyla kurutma ve mikrodalga kurutma yöntemi de kullanılmaktadır. Suyun uzaklaştırılması için yüksek sıcaklık ve uzun kurutma zamanı gereklidir ancak bu durum tat, koku ve besleyici değerler açısından ürün üzerinde olumsuz etkiler bırakır. Bu yüzden güneş enerjisi yardımıyla kurutma işlemi alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneş enerjisi yardımıyla kurutma işlemi tarım ürünlerinin muhafaza edilmesi için önemlidir. Güneş enerjili kurutma fırını Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10 Güneş enerjili kurutma fırını [4]

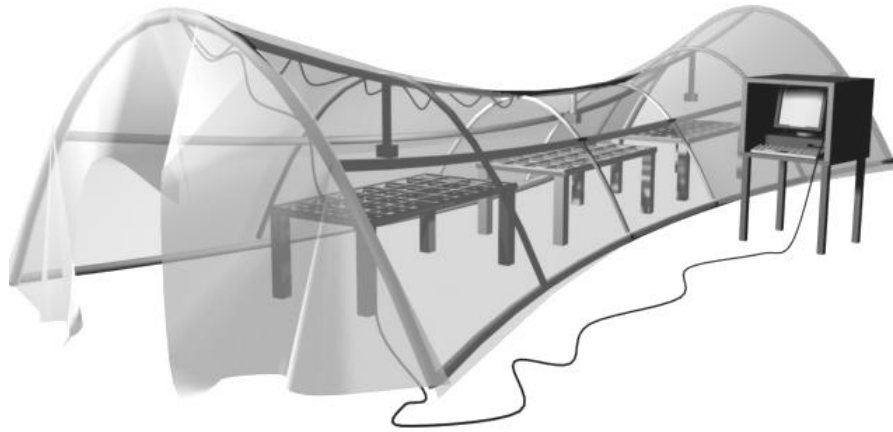
1 numaralı kısım dışarıdan çekilen havanın kurutulacak maddeye aktarımını sağlayan fan üfleme kanalını gösterirken 2 numaralı kısım güneş enerjili kurutma fırınının kapağını göstermektedir. 3 numaralı kısım fırın ve 4 numaralı kısım hava hızını ayarlayan hava ayar klapesini göstermektedir. 5 numaralı kısım havalı güneş kolektörünü gösterirken 6 numaralı kısım güneş enerjisini emen emici plakayı göstermektedir. 7 numaralı kısım havanın sistem içerisine çekilmesini sağlayan sistem fanı ve 8 numaralı kısım kurutma fırınının üzerine monte edildiği platformu göstermektedir.

Şekil 3.11’de havalı güneş kolektörü detayı gösterilmektedir. Havalı güneş kolektörünün detayında kolektörün 1 cm aralıklı çift camdan oluşan içerisinde 30° iç açıda 1 cm eğimle yükselen emici plakadan oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.11 Havalı güneş kolektörü detayı [4]

Güneş enerjili tünel kurutucu yardımıyla direk olarak güneş ışınlarına maruz bırakılan örneklerin kuruma zamanında %65 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda daha hijyenik, temiz ve nem açısından daha güvenli, renk ve kalite açısından daha iyi ürünler elde edilir. Bu sistemde yağmur, toz ve böcek gibi dış etkenlerin de etkisi azaltılmıştır. Kullanımına bağlı olarak yapılan yatırımın geri dönmesi 2 ile 4 yıl arası değişmektedir. Güneş enerjili tünel kurutucunun en büyük avantajı herhangi bir ön işlem ya da kimyasal maddenin kurutulacak ürünlere uygulanmamasıdır. Böylece bu tarz maddelere alerjisi olan kişilerde güvenli biçimde bu ürünleri tüketebilir. Dahası, ürün zararlı sayılabilecek elektromanyetik radyasyon dalgalarına maruz bırakılmamaktadır. Güneş enerjisi ile ısıtılan tünel kurutucu içerisindeki ürünlerin kurutulması esnasında içerideki kurutma havasının koşulları kolay kontrol edilebilmektedir. Plastik materyalden üretilen sera ortamında oluşturulan güneş enerjili tünel kurutucu, güneş enerjisi dışında herhangi bir enerjiye gerek duymamaktadır. Elektrik kaynağından faydalanma imkanının az ve düzensiz olduğu kırsal alanlarda güneş enerjili tünel kurutucu iyi bir alternatif olarak kullanılabilir. Temsili güneş enerjili tünel kurutucu Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Temsili güneş enerjili tünel kurutucu [6]

Güneş enerjili tünel kurutucu hasat kayıplarını azaltmanın yanında son ürün kalitesini önemli derecede artırıp geleneksel yöntemlere kıyasla daha ekonomik bir yöntemdir [6].

3.13 Dondurarak Kurutma İşleminin Önemi

Meyve ve sebzeler içerdiği nem yüzünden kolay bozulurlar. Kurutma meyve ve

sebzelerin güvenli muhafazası için kullanılan en yaygın yöntemdir. Gıdaların raf ömrünü uzatmak, ürün çeşitliliği artırmak, taşıma ve depolama sırasında hacmi azaltmak meyve ve sebzelerin kurutulması için asıl sebeplerdir. Meyve ve sebze gibi ısıya duyarlı maddelerin termal olarak bozulmaması, oksidasyonun engellenmesi ve enzimatik kararma reaksiyonlarının önlenmesi için özel kurutma teknikleri geliştirilmelidir. Tüketici için önemli olan gıdaların dış görünüşü, rengi ve tadıdır. Gıdaların işlenmesi esnasında içeriğindeki su miktarına göre bu değerler değişebilir hatta kaybolabilir.

Birçok yaklaşım gıda kalitesini artırmak için kullanılmaktadır. Dondurarak kurutma biyolojik değerin azalmaması, tadın korunması, yapısal olarak meyvenin bozulmaması açısından daha nazik ve etkili bir yöntemdir. Dondurarak kurutma son zamanlarda ortaya çıkan masraflı bir teknolojidir. Kurutma çalışmalarında enerji tüketimi, gıda kalitesi, termal ve fiziksel değişkenler göz önünde bulundurulur. Dondurarak kurutma genellikle biyoteknoloji, hafif kimyasalların ayrıştırılması, gıda ve eczacılıkta kullanılan bir yöntemdir. Sıcaklıktan etkilenen maddeler, hafif kimyasallar ve bazı ilaçlar geleneksel buharlaştırarak kurutma yöntemiyle kalitelerini kaybederler. Günümüzde, dondurarak kurutma yüksek katma değeri olan kimyasalların kurutulması için önemli bir yöntemdir.

3.14 Mikrodalga ve Isı Pompası Kurutma Sistemlerinin Avantajları

Kurularak muhafaza yöntemi mikrobiyolojik ve besleyici öğeler açısından gıdaların muhafazası için kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Meyve ve sebzelerin kurutulması ile su aktivite değeri düşürülen ürünler bozulmaya karşı direnç gösterir. Kurutma üründeki nem oranını buharlaştırma yöntemiyle uzaklaştırma metoduna dayanır. Bu şekilde mikroorganizma aktivitesi ve enzim aktivasyonu azaltıldığından ürün uzun zaman muhafaza edilir.

Yüksek sıcaklık değerleri kurutma işlemi için önemli derecede kalite kaybına sebep olmaktadır. İşlem sıcaklığını düşürerek kurutulmuş ürünün kalitesi artırılabilir ama bu koşullarda işletme giderleri kabul edilir olmaktan uzaktır. Her kurutma kendi açısından avantaj ve dezavantaja sahiptir. Sıcak hava metodu meyve ve sebze kurutma için sıkça kullanılır. Sıcak hava kurutmanın dezavantajı ise kurutma esnasında kalite kaybına sebep olması ve uzun zaman almasıdır.

Mikrodalga metodu, hızlı kurutmada ve meyve ve sebzelerin kalite kayıplarını azaltılmasında kullanılır. Mikrodalga enerjisi ürünlerdeki su molekülleri tarafından emilerek yüksek kuruma oranları ve hızlı buharlaşmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden mikrodalga kurutma yöntemi önemli enerji tasarrufu yanında %50 kurutma zamanında azalma ve ürünün kurutulması esnasında yüzey sıcaklığının daha düşük bir seviyede olmasına yardımcı olur.

Isı pompası kurutma yöntemi düşük enerji kullanımı ve atmosfere düşük gaz emisyonu yayma konusunda etkili bir kurutma yöntemidir. Isı pompası kurutma sistemi ısı pompası ve kurutma sistemi gibi iki mühendislik sisteminin birleşimidir. Isı pompası destekli kurutma sistemi kontrollü çevrede ısı ve sıcaklığın muhafaza edildiği düşük enerji tüketimi sağlayan bir kurutma sistemi ile yüksek kalitede kurutulmuş gıda elde etmek için uygun bir yöntemdir. Isı pompası kalitesi düşük olan enerjinin daha faydalı bir seviyeye çıkarılması için minimum enerjinin kullanıldığı sistemlerdir.

Kurutma işlemi fazla enerji tüketimine sebep olan bir işlemdir çünkü gizli ısıların ürünün kurutulması esnasında içeriğindeki suyun buharlaşması için ürüne verilmesi gereklidir. Kurutma, enerji tüketiminin yüksek olduğu bir işlem olduğundan, enerjinin verimli kullanılması üzerine çalışmalar önem kazanmıştır. Enerji verimliliği açısından düşünüldüğünde kurutma modellerinin performansı, özgül nem alma oranı (SMER), nem alma oranı (MER), özgül enerji tüketimi (SEC), enerji tüketimi ve enerji maliyeti göz önünde bulundurularak değerlendirilir. Gıda endüstrisinde, gıda üretimi esnasında yüksek duyu kalite ve besleyici değerler için geliştirilen ekonomik yöntemler önem kazanmaktadır [3].

3.14.1 Mikrodalga Teknolojisinin Kurutma İşleminde Kullanılması

Gıdalara verilen ısı enerjisi dışarıdan içeriye doğru maddeyi ısıtmakta ve bu süreç ısıtma için geçen zamanı artırmaktadır. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar hastalıkların tedavisinde ve birçok sanayi dalında yaygın kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalgalar sayesinde iletilen enerji geleneksel yöntemlere kıyasla sayısız avantaja sahip olmasının yanında enerji ve zamandan elde edilen kazanç bu teknolojinin önemini daha da artırmıştır. Mikrodalga, elektromanyetik bir dalga olup ısıtma ve kurutma alanında bu teknolojiye dayanarak çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Günümüzdeki gelişmeler ışığında mikrodalga kurutma üzerine etkisi incelenmiş meyve ve

sebzelerin kurutulmasında kullanılmaya başlanmıştır. Mikrodalga'nın diğer kurutma yöntemleri üzerine avantajı ısı enerjisini doğrudan materyalin içerisinde bulunan buharlaştırılacak olan suya vermesidir. Böylece kurutma işlemi daha verimli ve hızlı gerçekleşir. Aynı zamanda mikrodalga'nın materyali homojen biçimde ısıtmasının yanında ısı verimininde yüksek olması bu teknolojiyi daha tercih edilebilir konuma taşımıştır [8].

Kurutma esnasında karşımıza çıkabilecek olumsuzlukların önüne geçmek, kuruma zamanını düşürmek, hızlı ve enerji açısından verimli bir kurutma yapabilmek için mikrodalga kurutma yöntemleri geliştirilmektedir. Mikrodalga gıdaların kurutulması için hızlı bir yöntemdir. Mikrodalga'nın gıdaların kurutma işlemlerinde uygulanması son zamanlarda ilgi gören bir yöntemdir. Bu yüzden son yayınlanan bilimsel makalelerin birçoğu ve bilim adamları mikrodalga kurutma işlemini çalışmalarının odağına almıştır. Mikrodalga kurutma işlemi ucuz bir yöntem olduğundan araştırmacıların ilgisini fazlasıyla çekmektedir. Çok çeşitli gıdalar, meyve ve sebzeler mikrodalga ile kurutulmuştur [9]. Bunlara örnek verecek olursak: Maskan [44] – kivi, Zielinska ve Michalska [45] – yaban mersini, Dehghannya vd. [46] – ayva, Kroehnke vd. [47] – havuç, Laurindo vd. [48] – muz, Kowalski vd. [49] – çilek.

3.15 İnfrared Teknolojisinin (IR) Kurutma İşleminde Kullanılması

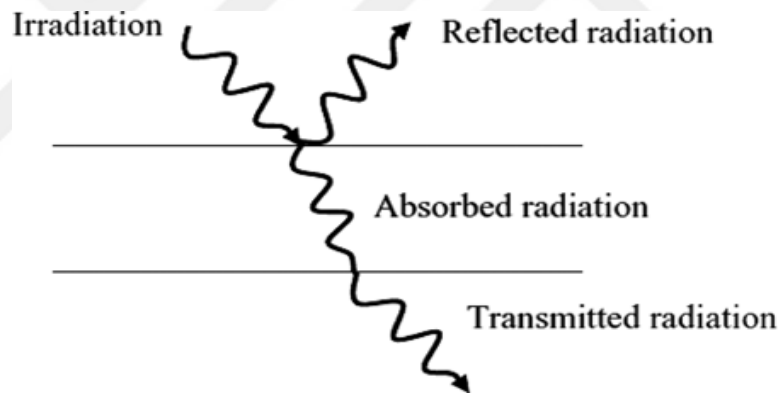
Nem içeriğinin mikroorganizmaların ve mantarların oluşmasını engelleyecek seviyeye çekilmesiyle meyve ve sebzeler başarılı biçimde muhafaza edilebilir. Birçok gıdanın mikrobiyal aktivitesi nem içeriği %10 değerinin altına düştüğü zaman azalır. Kurutma işlemi gıdaların kararlılığını artırmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Gıdanın su aktivite değerinin düşmesi mikrobiyal etkinliği düşürür böylece gıdada depolama sırasında fiziksel ve kimyasal değişimler en alt seviyeye iner.

Sıcak hava konvektif kurutma işlemi, gıda maddelerinin kurutulması için en yaygın biçimde kullanılan ticari yöntemdir. Ancak düşük enerji verimi, uzun kurutma zamanı ve düşük gıda kalitesi sıcak hava kurutma sisteminin sakıncalarıdır. Daha kaliteli ve istenilen seviyede ürün eldesi için radyo frekansı ve mikrodalga gibi dielektrik ısıtma ile kurutma, infrared gibi elektromanyetik kurutma, harici alanların bulunduğu darbeli elektrik alan kurutma, ultrason ve ultraviyole kurutma sistemleri ortaya çıkmıştır.

Mikrodalganın gıda kurutma işlemlerinde kullanılmasından sonra infrared ve radyo frekansı yardımıyla kurutma son zamanda ivme kazanmıştır.

İnfrared sistemi kullanarak gıda kurutma işlemi geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla daha avantajlı olduğundan bu işlem son zamanda popülerite kazanmıştır. Hızlı ve etkili ısı transferi, düşük işletme maliyeti, üründe homojen ısıtma, işlenmiş maddenin daha iyi organoleptik ve besleyici değere sahip olması infrared kurutma sisteminin önemli özellikleridir.

İnfrared kurutucu tarafından yayılan infrared enerji kurutulacak madde üzerinde izlediği yol Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Kurutma işleminin başlarında infrared enerji madde tarafından soğurulur ve bu durum madde içerisinde sıcaklık artışına sebep olur. Sıcaklık artışı ile birlikte madde içerisinden uzaklaşan nem miktarı zamanla azalır ve infrared enerji nem içeriğinin azalmasıyla soğurulmadan ya yansıtılır ya da sıcaklık artışına sebep olmadan maddeyi terk eder.



Şekil 3.13 İnfrared radyasyonun (IR) ürün tarafından emilmesi, yansıtılması ve emilmeden içinden geçmesi [43]

İnfrared kurutma yöntemi yüksek kalitede kurutulmuş gıda maddesi, meyve ve sebze elde etmek için üzerinde çalışılan potansiyel bir yöntemdir. İnfrared ve sıcak hava kurutma kombinasyonu birlikte iyi bir sinerji yakaladığından daha etkili kurutma sağlar. Materyal, infrared radyasyona maruz bırakıldığında elektromanyetik dalga ile taşınan ısı enerjisi materyalin yüzeyine çarparak içeriye doğru girer. Materyalin radyasyon enerjisini absorbe etmesi içeriğindeki moleküllerin hareketini artırır. Bu durum materyal yüzeyinde ve içerisinde ısı artışına sebep olur. Materyalin hızlı biçimde ısınması yüzeye doğru nem aktarım oranını artırır. Taşınan hava akımı yüzeyden nemi uzaklaştırır ve sıcaklığı düşürür. Bu durum kütle aktarımını artırır [20].

İnfrared kurutma işlemi etkili bir dehidrasyon yöntemidir. İnfrared radyasyon enerjisi, ısıtıcı kaynaktan gıdanın yüzeyine çevredeki havayı ısıtmadan doğrudan aktarılır. Radyasyon enerjisi doğrudan kurutulacak materyale etki eder ve materyalin içine doğru ilerler. Sonrasında bu enerji hissedilir ısı haline dönüşür. Gıda kurudukça su oranı azaldığından gıdanın radyasyon enerjisini emme derecesi azalır ve soğurduğu bu enerjiyi yansıtmaya başlar. Enerjiyi emme gücü, yüzey derinliği ve enerjiyi aktararak yansıtma gücü infrared ısıtma sisteminin dalga boyunun yoğunluğuna ve infrared radyasyona maruz kalan materyalin özelliklerine bağlıdır. İnfrared radyasyonun avantajları arasında yüksek ısı aktarım katsayısı, kurutma süresinin kısa olması ve materyalin sıcaklık kontrolünün kolaylığı sayılabilir. Bu avantajların ışığında konveksiyon ya da vakum kurutmanın infrared kurutma ile kombinasyonu oldukça popülerdir. İnfrared kurutma işleminde kurutma kinetiği radyasyonun yoğunluğu ve dalga boyuna, infrared enerji kaynakları arasındaki mesafeye, ısıtıcı radyasyona maruz bırakılan yüzeye ve hava hızına bağlıdır [23].

İnfrared enerji elektromanyetik radyasyon ile üretilir. Bu işlemde kullanılan dalga boyları 1-6 μm arasındadır. İnfrared radyasyon, elektrik ya da yanma gazı ile seramik plakanın ısıtılması ile üretilir. Madde tarafından alınan infrared radyasyon emilir, yansıtılır ya da aktarılır. Sadece emilen enerji kurutma işlemi sırasında efektif rol oynar. İnfrared radyasyon materyalin içerisinde bulunduğu çevrenin havasını ısıtmadan doğrudan materyalin içerisine girer ve sıcaklık artışına neden olur. Bu durum hissedilen ısıyı artırır. Kurutma işlemi sırasında infrared enerjinin Emilimi azalırken kurutulan maddenin enerjiyi yansıtması azalan nem içeriğinden kaynaklanır. İnfrared ile kurutulan tarım ürünlerinden son zamanlarda bilimsel çalışmalara konu olanlar arasında sebzeler, elma dilimi, soğan dilimi, tatlı patates, şeftali, muz dilimi, üzüm, longan meyvesi, çeltik, soya fasulyesi ve havuç sayılabilir [25].

3.15.1 İnfrared Kurutma Sisteminin Avantajları

İnfrared enerji ile ısıtma işleminin gıda sanayisinde kullanımı infrared enerji yayan kaynakların üretilmesindeki gelişme sayesinde her geçen gün daha da artmaktadır. Yüksek yayılım ve özgül baskın dalga boyu günümüz infrared kaynaklarını tanımlamaktadır.

Konvektif sıcak hava kurutma işlemine kıyasla infrared ısıtma sistemi bazı avantajlara sahiptir. Isı aktarımına karşı çıkan herhangi bir direnç yoktur. Isıtma sisteminin durağanlığı düşüktür. Bu yüzden enerji maliyeti düşürülebilir ve ısıtma zamanı azaltılabilir. Ürün sıcaklığı kolayca kontrol edilebilir. İnfrared enerjinin kurutma işleminde uygulanması yüksek hava hızına ihtiyacı azaltır böylece kurutulan ürünün oksijen ile teması azalır. İnfrared kurutma sisteminin ekonomik ve teknik avantajları son ürün kalitesi ve müşteri memnuniyetini beraberinde getirmelidir. İnfrared kurutma işlemi kahve kurutma işleminde kullanıldığında kuruma zamanının kısaldığı ve ürün kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Çin’de infrared kurutma sistemi içeriğinde uçucu madde bulunan otların kurutulmasında kullanılır. Kalite otların içerisinde bulunan uçucu maddelerin ne kadar çok ürün içerisinde kaldığı açısından değerlendirildiğinde infrared kurutma sistemi ile kurutulan otlar sıcak hava kurutma sistemi ile kurutulan otlara göre daha çok uçucu maddeyi bünyesinde bulundurur. Lewicki ve Nowak [26] yılında elma dilimlerinin kurutulması sırasında infrared (IR) ve sıcak hava kurutma yönteminin (HAD) etkisini incelemiştir. Son ürün sıcaklıkları eşit olacak biçimde kurutulan örnekler renk, mekanik özellikler ve yapılarındaki mikro gözenekler açısından değerlendirilmiştir. Kurutma sonrası örneklerden alınan kesitlerde infrared ile kurutulan örneklerde gözenekler arası boşlukların daha fazla olduğu görülmüş olup bu sonuç sıcak hava ve infrared ile kurutma işleminin kurutma oranları arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmüştür. Sıcak hava kurutma işlemi ile kurutulan örneklerden alınan kesit üzerindeki gözenekler infrared enerji kaynağı ile kurutulan örneklerle göre homojen dağılmış bir görüntü vermiştir. Kromatik katsayılardaki değişimin ısının nasıl verildiğine bağlı olmayıp son sıcaklık değerine bağlı olduğu görülmüştür. Ürünün kurutulduktan sonraki sertliği ve gevrekliği de ısının nasıl transfer edildiğine değil son ürün sıcaklığına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bütün bu değişkenler tüketicinin ürünü kabul edilebilir olarak algılamasında önemli unsurlardır.

Nemin ürün tarafından tekrar geri emilmesi aynı zamanda kalitenin bir ölçüsüdür. Galler soğanının tekrar su alma yeteneği incelendiğinde infrared kurutma işlemi vakumlu ortamda gerçekleştirildiğinde en iyi sonuç alınmaktadır. Ancak soğanın rengi en iyi şekilde korunmak istendiğinde infrared kurutma sistemi bir hava akımıyla kombine edilmelidir. Maydanoz kurutulurken infrared sistem kullanıldığında C vitamini değerinde, içeriğindeki uçucu madde miktarında ve tadında en az değişim gerçekleşir.

infrared kurutma sisteminin gıda içerisindeki gıdanın tadına olumlu açıdan etki eden enzimleri etkilediğini gösteren bazı göstergeler vardır [26].

3.16 Gıdanın Kurutulmasına ve Kalitesine Etki Eden Değişkenler

Genelde kurutma kinetiği materyalin sıcaklığının artmasıyla ve kurutma ortamının bağıl neminin azalmasıyla artar. Ancak kurutma sıcaklığının çok yüksek olması sıcaklığa karşı duyarlı fitokimyasalların termal bozulmasına sebep olduğundan çok istenmemektedir. Kurutulan gıdaların boyutlarının azaltılması kurutma zamanını azaltır. Genelde, taze meyve sebzeler kurutma öncesi haşlama ön işlemine tabi tutulur. Haşlama ön işlemi taze meyve ve sebzelerin kısa süreli ısıya maruz bırakılmasıdır. Burada amaç gıdanın içeriğinde bulunan enzimi inaktive etmek ve gıdanın mikrobiyal saflığını iyileştirmektir. Geçmişte kurutulan ürünün kalite açısından dikkate alınmadığı açıktır ancak günümüzde kalitenin ürüne katkısı oldukça önemlidir. Kalite kavramı; kurutulmuş gıdanın güvenliğini ve duyu özelliklerini kapsamaktadır. Bugünlerde renk, doku, tat, besleyici içerik, su emme yeteneği, mekanik özellikler ve gıdanın mikroyapısı gibi birçok gıda özelliği kurutulmuş gıdaların kalitesinin değerlendirilmesine yardımcı olur. Gıdanın rengi, tekrar su alma yeteneği ve kırılmaya karşı dayanımı kurutma sırasında ısının gıdaya nasıl aktarıldığına bağlı değildir. Gıdanın tekrar su alma kapasitesi taze materyallerin özelliklerine, tekrar su alma süresine, kurutma işleminin doğruluğuna ve gıdanın depolama koşullarına bağlıdır. Kuruma oranı ve materyalin son sıcaklığı kurutma işleminde karşımıza çıkan iki önemli değişkendir. Yüksek kuruma oranı materyalin dokusuna zarar verir ve kırılgan olmasına sebep olur. Kurutma işlemi sırasında kuruma oranı, gıdanın nem içeriğinin azalmasıyla ve sıcaklık seviyesinin düşürülmesiyle azalmaktadır. Materyal sıcaklığı özellikle kurutma işleminin son kısımlarında kimyasal değişime sebep olur ve bu durum esmerleşme reaksiyonuna sebep olur. Günümüzde düşük maliyetli, basit ve kesin ölçüm tekniği ile gıdanın kalitesi ve kurutma işleminin verimliliğinin ölçülmesine ihtiyaç vardır [23].

3.17 Meyve ve Sebzelerin Kurutulmasında Endüstriyel Sistemlerin Gerekliliği

Meyve ve sebzeler içeriğinde yüksek nem ve organik materyaller barındırdığından zamanla kimyasal ve mikrobiyolojik bozulmaya uğrar. Ürünlerin kurutma işlemine alınincaya kadar güvenli biçimde muhafaza edilmesi konusunda çeşitli sorunlar ortaya çıkar. Meyve sebze yetiştirmeyen ya da yeteri kadar üretilmeyen ülkelerde meyve ve

sebzeler değişik kurutma yöntemleri uygulanarak muhafaza edilmektedir. Kurutma işlemi ile meyve ve sebzelerin mikrobiyolojik ve enzim aktivite değerleri azaltılarak gıda bozulmaya karşı güvenli hale getirilir.

Türkiye iklim açısından uygun olduğu için kurutma işlemi doğal ve geleneksel yöntemler kullanılarak yapılır. İncir, kayısı ve üzüm bu yöntemle kurutulan ve ihracattaki payı yüksek olan ürünlerimizdendir. Meyve sebze ihracatında önemli pay sahibi ürünlerden elma, patlıcan, erik, kabak, vişne, fasulye ve bezelyenin kuruma potansiyeli ülkemiz ve ülkemize benzer iklime sahip Akdeniz ülkelerinde fazladır. Ülkemizin bu tip ülkelerle ihracat payı artışında rekabet edebilmesi için ürün kalitesini artırmalı ve ekonomik açıdan daha verimli sistemler kullanmalıdır. Ticareti yapılan kuru gıdaların %97 ve daha fazlası konvektif sıcak hava kurutma sistemi yardımıyla kurutulmaktadır. Sıcak hava yardımıyla kurutulmuş gıdalar piyasaya sürülmüş her an kullanıma hazır ve taze gıdalar kadar faydalıdır. Kurumaya etki eden etmenler; atmosfer basıncı, hava hızı ve kuruma sıcaklığıdır. Kuruma esnasında bu etmenlerin uygun bir biçimde seçilmesi son ürün kalitesi açısından oldukça önemlidir [5].

3.18 Kurutma İşleminde Endüstriyel Yöntemlerin Kullanılması ve Matematiksel Modellemenin Önemi

Kurutma işlemi diğer muhafaza yöntemlerine kıyasla maliyet açısından daha uygun ve işletme açısından daha kolay olduğundan gıdaların muhafaza edilmesi için en yaygın kullanılan ticari işlemdir. Kurutma işleminin asıl amacı depolama süresince gıdaların bozulmadan korunmasını sağlamak, paketleme ihtiyacını en aza indirmek ve taşıma sırasında masrafları azaltmaktır. Kurutma yöntemleri çok çeşitli olup güneş enerjisi yardımıyla kurutma işlemi en geleneksel ve en ekonomik kurutma işlemidir. Ancak güneş enerjisi yardımıyla kurutma işlemi uzun zaman gerektirdiğinden, hava durumuna bağlı olduğundan, besleyici değer kaybına sebebiyet verdiğinden ve iş gücü gereksinimini artırdığından çok tercih edilen bir yöntem değildir. Ürün kalitesini geliştirmek için güneş enerjisi yardımıyla açık havada kurutma işlemi yerini endüstriyel kurutma sistemlerine bırakmalıdır.

Kurutma işleminin en önemli kısmı kurutma işleminin ve deneysel sistemin matematiksel denklemler yardımıyla modellenmesidir. Modelleme işlemi sistemin birtakım eşitlikler yardımıyla mümkün olduğunca doğru biçimde tanımlanmasıdır.

Kurutulan ürünlerin kuruma karakteristikleri ve matematiksel modeller kurutma sistemlerinin tasarım, imalat ve işletme kısımlarında çok gereklidir. Matematiksel modellerin çoğu kurutma işlemini tanımlamak için oluşturulmuş olup ince tabaka kurutma modelleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller teorik, yarı teorik ve ampirik (deneysel) olarak kategorilere ayrılır. Birçok matematiksel model ve deneysel çalışma üzüm posası, domates posası, havuç posası, zeytin posası gibi meyve ve sebze posalarının kurutulması sırasında kuruma karakteristiklerini incelemek için kullanılmıştır [11].

Kurutulacak materyallerin kuruma davranışlarının tahmin edilmesi, yeni kurutucu tasarımları, kurutma parametrelerinin optimizasyonu ve kurutma işleminin kontrol edilmesi için matematiksel modeller kullanılır. Tarım ürünlerinin kuruma davranışlarının tanımlanması için kullanılan matematiksel modeller teorik, yarı-teorik ve ampirik modeller olarak kategorilere ayrılmıştır. Matematiksel modeller arasında yarı teorik modeller teori ve kullanım kolaylığı arasında uyum sağladığından tarım ürünlerinin kuruma davranışlarının tanımlanmasında araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Yarı teorik modeller Fick ikinci yasasının bazı basitleştirmeler sayesinde doğrudan çözümü ile elde edilir [12].

3.18.1 Kurutma İşleminde Matematiksel Modellerin Kullanılması

Kurutma işleminin ve kinetiğinin modellenmesi, kurutma sürecinin kontrolü ve kurutulacak gıda maddesi için uygun kurutma yöntemini seçme açısından önemlidir. Geliştirilen modeller optimum kurutma koşullarının belirlenmesinin yanında, yeni kurutma sistemlerinin tasarımı ve kurutma sırasında eş zamanlı gerçekleşen kütle ve ısı aktarımını tahmin etmek için kullanılır. Matematiksel model verileri, yüksek kalite ürün eldesinde ve enerjiyi verimli kullanan kurutma sistemi tasarımında kullanılır. İnce tabaka kurutma modelleri tarım ürünleri ve posaların kurutulmasını tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu modeller teorik, yarı teorik ve ampirik (deneysel) modeller olarak sınıflandırılır. Fick ikinci yasasının çözümü buğday ve fıstık gibi gıda ürünlerinin ince tabaka kurutma işleminde teorik model olarak kullanılır. Page, Newton, Henderson & Pabis ve Logaritmik modeller sadece modelin geliştirildiği ürün ve kurutma koşullarında geçerlidir. Pleg, Weibull ve Midilli ve Küçük gibi basit deneysel modeller tek katmanlı

kurutma ve su emilimi gibi işlemler için kullanılır, ayrıca kurutma kinetiğini yeterince açıklayabilmektedir [22].

Kurutma işleminin kütle aktarımı kinetiğini tanımlamak için ampirik ve yarı-ampirik matematiksel modeller deneysel verilerle doğrulanmalıdır. Ampirik ve yarı ampirik modeller kurutulacak örneklerin klasik olmayan geometrik şekillerinde de kullanılır. Bu modellerin bazıları Newton, Page, Modifiye Page, Henderson & Pabis, Two-term, Two-term exponential, Logaritmik, Wang & Singh ve Midilli & Küçük modelidir [19]. Menlik vd. [50] elmaların dondurarak kurutulması işleminde deneysel verileri en iyi tanımlayan modelin Page model olduğunu açıklamıştır. Çelen vd. [9] elma dilimlerinin kurutulmasını mikrodalga enerjisi kullanarak incelemiştir ve neticede elma dilimlerinin kurutulmasında Page modelinin ince dilim kuruma karakteristiğini diğer ampirik ve yarı-ampirik modellere göre daha iyi biçimde açıkladığı görülmüştür.

3.19 Kurutma İşlemi Sırasında Gıdada Meydana Gelen Değişimler

Kurutma işlemi ile mikrobiyal aktivite ve su aktivitesi düşer ayrıca fiziksel değişimler en alt düzeye iner. Kurutma işleminden etkilenen yapısal özellikler nem içeriği, gözeneklilik, büzülme, yoğunluk ve gıdanın nem transferini gerçekleştirdiği yüzey alanıdır. Gıdalarda kurutma işlemi sırasında nem transferi sonucu birçok fiziksel ve yapısal değişiklikler görülebilir. Kurutma sırasında taşınım özellikleri ve kurutulan örneğin ebatlarının değişimi gıda maddelerinde şekil ve boyut değişimine sebep olur. Çeşitli gıdalarda fiziksel ve yapısal değişimleri inceleyen literatürde birçok çalışma mevcuttur [51, 52].

3.19.1 Hacim ve Gözeneklilik

Meyvelerin gözenekliliği genellikle sıcaklık, nem içeriği, havanın nemi, hava hızı, kurutma yöntemi ve ilk gözenekliliğine bağlıdır. Gıdaların kalite açısından değerlendirilmesi için yoğunluk ve gözeneklilik gibi fiziksel ve yapısal özellikler önemlidir. Bu özellikler geçirgenlik, difüzyon ve termal iletkenlik gibi diğer özellikler üzerinde çok fazla öneme sahiptir.

Kurutma sırasında gıdada meydana gelen değişimler arasında en önemli değişim hacim azalmasıdır. Bu yüzden mikroyapıdaki büzülme ve gözenek oluşumu gibi değişimler su kaybının birer sonucu olup ısıtma işlemi gıdanın içerisinde bulunan hücrelerde basınca sebep olur. Konvektif sıcak hava kurutma işlemi sırasında suyun uzaklaştırılması ile gıda

içerisindeki hücreler ısının sebep olduğu basınç yüzünden parçalanır ve gıdanın iç yapısında çatlaklar oluşur. Bu çatlaklara hücre duvarında meydana gelen mikrostres sebep olur. Kurutma sırasında su kaybı arttıkça daha fazla büzülme meydana gelir ve içeride oluşan basınç gözeneklerden ortamı terk eder. Kurutma işlemi süresince gıda içerisinde meydana gelen değişimler farklı boyut ve şekilde oluşan gözenekliliği artırır. Gıdaların hücresel boşluklarındaki suyun buharlaşarak uzaklaşması sonucu gözeneklerin oluştuğu literatürdeki birçok çalışmada yer almaktadır. Dahası, gözeneklerin oluşumunda gıdanın ilk gözenek oranı, ilk nem içeriği, bağıl nem, bileşenlerinin oranı, kurutma yöntemi ve koşulları etkilidir. Gözenek oluşumuna sebep olan faktörleri iç ve dış olmak üzere ikiye ayırmıştır. Bağıl nem, sıcaklık, gıdanın kurutulduğu ortam atmosferi, basınç, elektromanyetik radyasyon ve hava dolaşımı dış faktörler arasında sayılırken gıdanın kurutma öncesi ilk yapısı ve kimyasal bileşimi iç faktörler arasında yer almaktadır. Materyalin hacmindeki değişme kütle kaybı ile doğru orantılı ise kurutma sırasında meydana gelen büzülme ideal kabul edilir. Aksi takdirde, materyalin hacminin azalması hacimsel su kaybından az ise gözenekler ortaya çıkar [53].

3.19.2 Büzülme

Nem kaybı yüzünden oluşan büzülme işlemi kuruma işleminin başından sonuna kadar devam eder. Büzülme sonucunda gıdanın hücre duvarı parçalanarak su geçişine izin vermektedir. Büzülme oranı kullanılan kurutma metoduna göre değişiklik göstermektedir. Sıcaklık, hava hızı ve basınç kuruma esnasında gerçekleşen büzülme üzerinde önemli etkiye sahiptir. Ancak büzülme çok istenen bir durum değildir çünkü son kullanıcı tarafından istenmeyen bir durumdur.

3.19.3 Renk Değişimi

Kurutma parametreleri ürünün rengi üzerine de etki eder. Renk değişimi aynı zamanda tat değişikliğini de beraberinde getirir. Kurutma esnasında ortaya çıkan esmerleşme reaksiyonları ve organik bozulmaların engellenmesi için kurutma süreçlerinde belirli yöntemler geliştirilmiştir. İstenmeyen esmerleşme reaksiyonlarını engellemek ve nem transfer hızını artırmak için kullanılan ön işlemler vardır. Kurutulacak gıdanın sitrik asit ile muamele edilmesi bunlardan biridir. Limonun doğal olarak içeriğinde bulunan sitrik

asit ($C_6H_8O_7$) ön işlemda kullanılmaktadır. Sitrik asit, ekşi bir tada sahip olmasının yanında antioksidan etkiye de sahiptir [5].

3.20 Kurutma İşlemi Sırasında Meydana Gelen Değişimlerin Gözlemlenmesi

Gıda kurutma işlemi karmaşık ve kesin olmayan bir işlem olup süregelen mekanizması henüz anlaşılamamaktadır. Kurutma sırasında meydana gelen istenmeyen fiziko-kimyasal değişimler yüzünden bazen görüntü olarak düşük kalitede ürün elde edilir. Tüketiciler tarafından ilk kalite unsuru olarak kabul gören gıdanın görünümü araştırmacıları gıda işleme sırasında gıdanın orijinal rengini muhafaza etme ve iyileştirmeye sevk etmiştir. Bu durum gıdanın renk parametre değerinin görsel izlenmesi ve değerlendirilmesinde hassas, güvenilir, kesin ve hızlı tekniklerin ısı ve ısı olmayan gıda işleme yöntemlerinde kullanılmasının asıl sebebidir. Gıdaların işlenmesi sırasında meydana gelen renk değişiminin gözlemlenmesi, bu süreçte gerçekleşen kimyasal ve biyokimyasal değişimlerin analiz edilmesi için kullanılan kimyasal yöntemlere göre kurutma işlemi sırasında meydana gelen değişimlerin gözlenmesi açısından daha basit ve ucuz bir yöntemdir.

Kurutma işleminde nemin buharlaşması sırasında meydana gelen esmerleşme reaksiyonları ve orijinal pigment bozulması en önemli gözlemlenebilir fiziko-kimyasal değişimlerdir. Gıda maddelerinde ortaya çıkan esmerleşme enzimatik ve enzimatik olmayan olarak ikiye ayrılır. Polifenol oksidaz (POD) enzimatik esmerleşmeye sebep olurken Mailard reaksiyonunun sebep olduğu esmerleşme, karemelizasyon ve askorbik asit bozulmaları enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları olarak karşımıza çıkar. Kurutma işleminin ilk adımında enzimatik renk değişimi polifenol oksidaz enzimi aktive olduğunda sıklıkla görülür. Kurutma işlemi sonlarına doğru Mailard reaksiyonlarının etkin olduğu renk değişimleri gözlenir. Kurutma öncesi uygulanan ön işlemler Mailard reaksiyonlarını engelleyerek enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonların oluşumunu etkiler. Dahası, ön işlemler nemin buharlaşmasını hızlandırır, ürünün renk ve duyuşal yapısında iyileşme sağlar. Nadian vd. [14] ön işlemlerin kurutulmuş meyve ve sebzelerin kalitesini önemli ölçüde geliştirdiğini göstermiştir. Gıdalar ısı işlem görerek kurutulurken uygulanan kimyasal ön işlem enzimatik ve enzimatik olmayan reaksiyonların engellenmesi için bir çözüm yoludur. Kimyasal ön

işlemin sebep olduğu renk değişimlerinin takibini yapmak işlenmiş gıdalarda besleyici değerin ne kadarının kalıp kalmadığının tayin edilmesi adına faydalı bir yöntemdir.

Enzimatik esmerleşme sonucu renk değişimi; biyokimyasal indeks gibi esmerleşme göstergeleri yardımıyla, polifenol oksidaz aktivitesiyle ya da yüzey rengi gibi fiziksel göstergelerle açıklanabilir. Fiziksel gösterge olarak gıdanın yüzey rengini ölçmek için kolorimeter (renk ölçer) laboratuvarlarda en kapsamlı şekilde kullanılan ekipmandır. Ek olarak, kurutma işleminde renk değişimini eş zamanlı ve sürekli gözlemleyecek bilgisayar görüntüleme sistemi (CVS – Computer Vision System) geliştirilmiştir. Önemli sayıda çalışmada gıdaların kurutma esnasında renk değişimini incelemek için bilgisayar görüntüleme sistemi eş zamanlı olarak kullanılmıştır. Bilgisayar görüntüleme sistemi kurutma teknolojisinde sadece renk analizi yapmak için değil kurutma işlemini daha iyi anlamak ve kontrol etmek için de önemli potansiyele sahiptir. Renk değişiminin nasıl olduğunu gösteren kurutma işlemleri ürün kalitesinin nasıl bozulduğuna dair oldukça iyi bilgi verir ve ürünün kalitesinin iyileştirilmesi için olanak sağlar [14]. Renk değerleri üzerinde durulmasının asıl sebebi renk değerlerinin birçok gıda için değerlendirme etkeni olarak kullanılmasıdır. Çünkü tüketiciler alacakları ürünü öncelikle rengine sonrasında tadına ve aromasına bakarak seçmektedir [54].

Konvektif kurutma işleminde hava hızı ve sıcaklığı oldukça yüksek ve nemi düşük olduğunda dış etkenler kurutma işlemini sınırlayamaz. Su molekülleri birçok tarım ürününde bulunan materyalin gözenekli yapısından geçerek ortamdan uzaklaşır. Kurutma işlemi; işletme koşullarından, gıdanın karakteristiğinden ve termo-fiziksel özelliklerinden etkilenen karmaşık bir işlemdir. İlk olarak nem gıda içerisine homojen olarak dağılmıştır. Kurutma işlemi başladığı zaman, gıda ve hava arasında nem yoğunluğu farkından kaynaklanan bir nem profili ortaya çıkar.

Kurutma işlemini kontrol etmek ve son ürünün kararlı bir yapıya sahip olmasını sağlamak için gıdanın en önemli bileşeni olan nem miktarının değişimini ölçmek önemlidir. Pratikte biyolojik maddelerin içerdiği nem profilinin ölçümü zordur çünkü su değişimi zor olmasının yanında ürün suyun uzaklaşmasıyla büzülmektedir. Nem dağılımı önemli olduğundan nem profilinin deneysel olarak belirlenmesi için literatürde çeşitli öneriler bulunmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalarla domuz ve tavşan eti içerisinde bulunan nem içeriğini pişirme işlemi sırasında ölçmek için düşük seviye infrared yansıtması (NIR-Near Infrared Reflectance) sistemi kullanılmıştır. Bu sistem

aynı zamanda tavuk kızartma sırasında ortaya çıkan su kaybının görüntülenmesi için de kullanılır. Öte yandan manyetik rezonans görüntüleme sistemi (MRI – Magnetic Resonance Imaging) ile çeltiğin, armudun ve makarnanın lokal nem tayini yapılmıştır. Bu teknik gıdanın içeriğine zarar vermediğinden yaygın kullanılmaktadır.

3.21 Kurutma İşleminde Kombine Kurutma Sistemlerinin Kullanımı

Elma gıda maddeleri için önemli bir materyal olup dünya genelinde tarımı yapılan bir meyve türüdür. Elma, yapısında %80-85 civarında nem bulunan bir gıdadır. Uygun olmayan muhafaza yöntemi ve depolama koşulları %10-30 arasında gıda kaybına yol açar. Kurutma işlemi, gıdaların muhafaza edilmesi için insanoğlu tarafından kullanılan en eski yöntemdir. Gıdaların kurutulması nem oranını azaltarak raf ömrünü uzatmayı amaçlar. Gıdanın kurutulması sırasında en önemli görev gıdanın rengine, görünümüne, tadına ve kimyasal bileşenlerine çok zarar vermeden enerji tüketimini azaltmak ve gıdanın nem içeriğini istenilen seviyeye çekmektir.

Fonksiyonel ve atıştırmalık gıdaların hazırlanması genellikle dondurarak kurutma yöntemi ya da liyofilizasyon (FD – Freeze Drying) ile yapılır. Dondurarak kurutma dondurulmuş gıdalardan buzun süblimasyonu ile gerçekleştirilir. Gıdanın işlenmesi sırasında kullanılan düşük sıcaklık ve sıvı suyun olmayışı gıdada bozulma ve mikrobiyal reaksiyonların gerçekleşmesini önlemiştir. Dondurarak kurutma işlemi üç adımdan oluşur. Bu adımlar dondurma, süblimasyon ve desorpsiyon işlemleridir. Bu yöntemle büzülme olayı ortadan kalkar. Ayrıca tat ve vitamin nitelikleri taze gıdadaki gibi korunur. Dondurarak kurutma işlemi gıdanın tüm yapısal özelliklerini korusa da pahalı ve uzun kurutma zamanı gerektiren bir işlemdir.

Son zamanlarda dondurarak kurutma işlemi; sıcak hava kurutma, infrared kurutma, mikrodalga ve mikrodalga-vakum gibi diğer kurutma yöntemleri ile birleştirilmektedir. Yüksek nem içeriğine sahip gıdalar kombine etkinin yarattığı sinerji ile daha etkili kurutulmaktadır. Sıcak hava-dondurarak kurutma ve infrared-dondurarak kurutma gibi hibrit kurutma işlemleri kurutma işleminin etkinliğini artırmak için başarılı biçimde kullanılmaktadır. İnfrared-dondurarak kurutma işlemine tabi tutulan kurutulmuş gıdalar sadece dondurarak kurutma işlemine kıyasla daha iyi renk, daha yüksek büzülme oranı ve daha iyi gevrekliğe sahip olup tekrar su alma kapasitesi daha zayıftır. Kumar vd. [55] sıcak hava kurutma (HAD – Hot Air Drying) ön işlemi geleneksel

dondurarak kurutma işleminde kullanıldığında kuruma zamanı yarıya inmektedir. İnfrared ve sıcak hava kurutma işlemlerinin dondurarak kurutma işlemi için optimize edilmesi kurutma verimini artıran, kuruma zamanını azaltan ve ürün kalitesini destekleyen yenilikçi bir gelişmedir. Sıcak hava kurutma işlemi meyve ve sebze kurutulmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu işlemde ısı ürüne sıcak havadan iletim (konveksiyon) yoluyla aktarılır ve buharlaşan nem havaya yine iletim yoluyla aktarılır. Ancak bu sistemin dezavantajı uzun kuruma zamanı olup 60°C sıcaklıkta dahi materyal bozulmaya uğramaktadır. İnfrared kurutma (IR - İnfrared) yönteminde ısı kaynağından yayılan elektromanyetik radyasyon örneğin içine etki ederek sıcaklık yükselişine ve nemin buharlaşıp gıdadan ayrılmasına sebep olur. Kurutma işlemi sırasında infrared ışınlar nemli örneğin içerisinde belirli derinliğe kadar etki ederek çevre havayı ısıtmadan sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Sonrasında gıda içerisindeki nemin difüzyon oranı yükselir. Gıdanın nem içeriği buharlaşarak düşmeye başladığında radyasyon etkinliği azalır. İnfrared kurutma işleminin kendine özgü özellikleri sayesinde gıda işleme konusunda sıcak hava kurutma işlemine göre daha fazla tercih edilmektedir. İnfrared kurutma işlemi homojen ısıtma imkânı, yüksek ısı aktarım katsayısı, düşük kurutma zamanı, düşük enerji tüketimi ve daha iyi ürün kalitesi gibi birçok avantaja sahiptir [24].

3.22 Kurutma İşleminde İnfrared Enerji Kaynağı Kullanılarak Modern Ön İşleme ve Kurutma Yöntemi

Yüksek kalite işlenmiş meyve ve sebzeler insan sağlığına etki etmekle kalmamalı aynı zamanda tüketiciye taze ürünlerden daha fazla ulaşılabilir olmalıdır. Bu tarz ürünler öncelikle haşlamaya maruz bırakılarak içeriğindeki enzimler sıcak su ya da buhar ile inaktive edilerek daha sonra düşük su aktivite değeri sağlanana kadar sıcak hava ile ısıtılır ve buharlaşma sağlanır. Böylece raf ömrü uzun ve daha kaliteli arzu edilen ürünler elde edilir.

Geleneksel haşlama ve kurutma yöntemleri; düşük enerji verimi, uzun işlem zamanı, kalite bozulması ve çevresel problemler gibi sorunlara sebep olur. Yeni eş zamanlı infrared haşlama ve kurutma işlemi (SIRDBD – Simultaneous İnfrared Dry Blanching and Dehydration) meyve ve sebzelerin haşlanması için infrared sistemi kullanarak kuru bir haşlama yöntemi sunar ve bir miktar nemin uzaklaşmasını sağlar. Yöntem haşlama

ve buharlaşma işlemlerini tek adımda toplamış olup oldukça pratiktir. Bu yöntemle enerji ve işlem verimi daha iyi sağlanır. Eş zamanlı infrared haşlama ve kurutma işlemi (SIRDBD) armut, havuç, mısır ve elma gibi çeşitli meyve ve sebzeleri kolayca haşlayabilir.

Infrared kurutma işlemi homojen ısıtma, yüksek ısı aktarım katsayısı, düşük işlem zamanı, daha az enerji tüketimi ve daha kaliteli ürün eldesi gibi avantajlara sahiptir. Birçok çalışma infrared sistem kullanılarak yapılan haşlama ön işleminin haşlama yapılan diğer yöntemler arasında en kaliteli ürün eldesi sağladığını göstermiştir. Yapılan çalışmalardan biri olan infrared ile haşlanmış bezelyelerin sıcak su ile haşlanmış bezelyeler kadar askorbik asit değerlerini koruduğu daha iyi tat ve aroma imkânı sunduğu gözlemlenmiştir [56]. Diğer bir çalışmada infrared haşlama ile yabani marul haşlanmış, sıcak su ve buharla haşlamaya kıyasla sonuç olarak tüketiciye daha hoş görünen daha sıkı bir doku elde etmiştir [57].

Infrared enerji, gaz yakıtlı sistem kullanılarak ya da elektrikli kalorifer ısıtıcı yardımıyla üretilebilir. Doğal gaz ya da propan ile ateşlenerek termal radyasyon enerjisi yaymak için katalitik infrared yayıcı üzerine monte edilen ızgaralı katalizör yüzey katalitik reaksiyon sırasında katalitik infrared (CIR – Catalytic Infrared) yayıcı sistemi ateşler. Üretilen radyasyon enerjisi orta seviyeden yüksek seviyeye kadar olan maksimum dalga boyu ile suyun emilimini sağlayan üç maksimum seviyeyle uyum sağladığından gıdaların hızlı biçimde ısınmasına ve nemin uzaklaşmasına yardımcı olur. Çalışma sırasında sürekli infrared ısıtma modunda çalıştırılan sistemin sabit radyasyon yoğunluğunda çalışmasını sağlayan durum doğal gazın devamlı olarak katalitik infrared yayıcı (CIR) sisteme beslenmesi sayesinde gerçekleşir. Sürekli ısıtma sisteminin avantajı yüksek enerjiyi gıdanın yüzeyine daha çabuk taşıyarak gıdanın daha çabuk ısınması, nemin daha çabuk uzaklaşması ve gıda içerisindeki enzimin daha çabuk inaktivasyonu olarak söyleyebiliriz [58].

Eş zamanlı infrared haşlama ve kurutma işlemi (SIRDBD) meyve ve sebzeleri haşlama ve kısmen kurutma için yeni bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sayede yüksek kalite ürünler elde edilebilir. Bu teknoloji meyve ve sebze içeriğinde bulunan enzimleri inaktive etmek ve nemi uzaklaştırmak için katalitik infrared sistemi (CIR) kullanır.

Geleneksel olarak haşlama ve kurutma işlemi iki adımda gerçekleştirilir. İlk olarak gıdalar buhar ya da sıcak su ile haşlanır sonrasında sıcak hava ile kurutulur. Bu iki

işlemde düşük enerji ve işlem verimi, düşük son ürün kalitesi ve çevre kirliliği gibi birçok dezavantaj vardır. Diğer açıdan kombine tek adımda eş zamanlı kesikli infrared haşlama ve kurutma işlemi (SIRDBD) geleneksel iki adımda gerçekleşen işleme kıyasla daha basit bir işlem olup yüksek enerji ve işlem verimi sağlar.

Katalitik infrared yayıcı (CIR) sistemi içerisinde bulunan platin katalizör doğal gazı ya da propan gazını oksitleyerek dalga boyu 3-6 μm olan orta ya da yüksek düzey infrared radyasyon yayar. Bu olay nemin kolay biçimde uzaklaşmasını sağlar. Böylece gıda içeriğinde bulunan nemin hızla ısınması ve uzaklaşması armut, havuç, mısır, muz ve çilek gibi meyve ve sebzelerde haşlama ve kurutma işlemlerinin başarılı biçimde yerini bulduğunu göstermektedir.

Eş zamanlı infrared haşlama ve kurutma işlemi (SIRDBD) devamlı ve kesikli olmak üzere iki türde çalıştırılabilir. Devamlı kurutma sırasında doğal gazı sürekli olarak katalitik infrared radyasyon yayıcı sisteme (CIR) besleyerek radyasyon yoğunluğu sabit tutulur. Devamlı ısıtarak yüzeye yüksek enerji sağlandığından çabuk sonuç almak ve nemin uzaklaşmasını sağlamak ya da enzim inaktivasyonu gerçekleştirmek için devamlı ısıtma daha avantajlı bir sistemdir.

Sandu [59], dilim kalınlığı fazla olan ürünlerde infrared radyasyonun sınırlı nüfuz sorununu çözmek için kesikli ısıtma işlemi uygulamayı önermiştir. Kesikli ısıtma işlemi, doğal gaz besleme sistemini açıp kapatarak ürün sıcaklığını sabit tutmaya dayanır. Arzu edilen işlem sıcaklığı sabit tutulduğundan kesikli ısıtma sistemi ile enerji tasarrufu sağlanabilir ve ürün kalitesi geliştirilebilir [60].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

4.1 Materyal

Granny Smith türü elma İstanbul'da yerel marketten satın alınarak kurutma işlemi öncesi $4\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta LG marka buzdolabında 1 gün boyunca bekletilmiştir. Elmaların ortam ile nem dengesine gelmesi ve içeriğindeki nemin homojen biçimde dağılmasını sağlamak için buzdolabından çıkarılan elmalar 2 saat boyunca oda koşullarında (1 atm., 25°C) bekletilmiştir. Sonraki adımda elmalar su ile yıkanarak kâğıt havlu ile durulanmıştır. Sonrasında elma 4 parçaya bölünerek kabukları soyulmadan çekirdek kısımları ayrılmıştır. Parçalara ayrılan elmalar 4, 7 ve 10 mm kalınlığında laboratuvar dilimleyici ile dilimlenmiştir.

4.2 Sitrik Asit ve Askorbik Asit Çözeltisi Hazırlanması

Sitrik asit ve askorbik asit (Merck, Almanya) toz halde hassas terazi (Mettler, model BB3000, Grefensee, Switzerland) yardımıyla her biri 2,5 g gelecek şekilde tartılarak 500 ml hacminde beher içerisine koyulmuştur. Beher içerisindeki toz halde askorbik asit ve sitrik asit karışımının üzeri 500 g ağırlığa ulaşınca kadar saf su ile tamamlanmıştır. Sonrasında iyi biçimde karıştırılan çözelti ön muamele işlemi için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan çözelti %0,5 askorbik asit ve %0,5 sitrik asit çözeltisidir (SA+AA kodlu).

4.3 Potasyum Karbonat Çözeltisi Hazırlanması

Potasyum karbonat (K_2CO_3) (Merck, Almanya) toz halde hassas terazi (Mettler, model BB3000, Grefensee, Switzerland) yardımıyla 20 g gelecek şekilde tartılarak 500 ml

hacminde beher içerisine koyulmuştur. Sonrasında beher içerisinde bulunan toz haldeki potasyum karbonat üzerine yine aynı hassas terazi ile tartımı yapılan 2,5 g zeytin yağı eklenmiştir. Beherin geri kalanı 500 g ağırlığa ulaşmaya kadar saf su ile doldurulmuştur. Hazırlanan çözelti iyi bir şekilde karıştırılarak ön muamele için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan çözelti %4 potasyum karbonat ve %0,5 zeytinyağı çözeltisidir (Potas kodlu).

4.4 Deneyde Kullanılan Cihazlar

4.4.1 Dijital Termometre

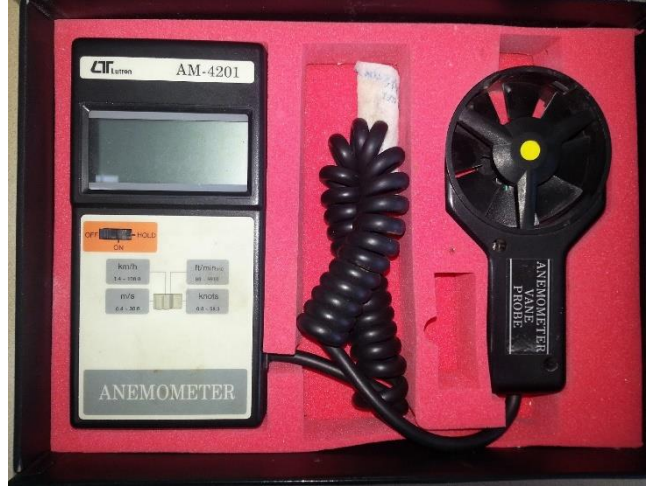
Deneyler sırasında haşlama ön işlemi için kullanılan suyun sıcaklığı Şekil 4.1’de görülen ve 0-600°C arasında çalışabilen 8 kanallı ve taramalı Meter Elektronik Fe-Konstant dijital termometreden yararlanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1 Dijital termometrenin genel görünüşü

4.4.2 Hava Akış Hızı

Kurutma deneyleri yapılırken havanın akış hızı, Şekil 4.2’de gösterilen TESTO 440 Vane Anemometre (AM-4201, Lutron, Taipei, Taiwan) ile $2 \pm 0,1$ m/s olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2 Anemometre

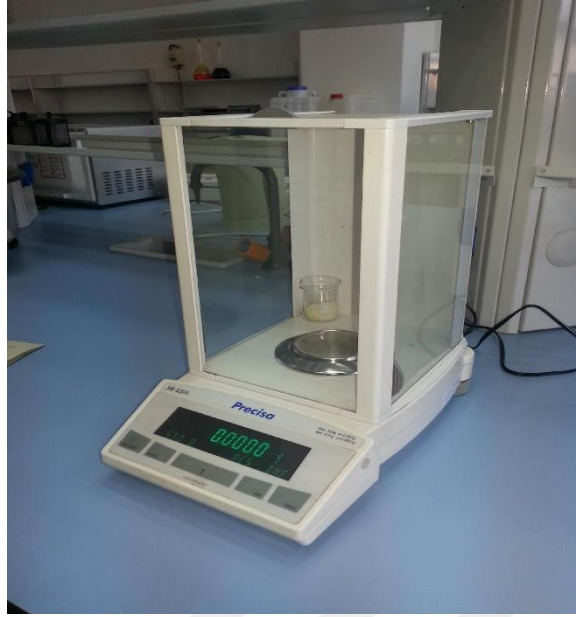
4.4.3 Terazı

Kurutulan örneklerin ağırlığı Şekil 4.3'te gösterilen Mettler marka (model BB3000, Grefensee, Switzerland) bir terazı ile yapılmıştır. Bu terazı 3 kg'a kadar olan ağırlıkları 0,1 g hassasiyetle ölçebilmektedir. Deney sırasında her 15 dakika aralıklarla ölçüm alınarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.3 Mettler marka terazinin genel görünüşü

Nem tayini ve rehidrasyon deneyleri için ağırlık ölçümleri ise daha hassas veriler elde edebilen Şekil 4.4'te gösterilen Precisa marka (XB 220 A model, Precisa Instruments AG, Dietikon, Switzerland) hassas terazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.4 Precisa marka terazinin genel görünüşü

4.4.4 Numune Muhafaza

Kurutma işlemi sonrası kurutma kabininden alınıp oda sıcaklığında 10 dakika bekletilen örnekler, düşük yoğunluklu polietilen (60 μ m kalınlığındaki LDPE) torbalara doldurulduktan sonra Şekil 4.5'te görülen KRUPS firması (Fransa) yapımı Vacupak 2 Plus cihazı kullanılarak ısıt yöntemiyle torbaların ağzı sıkıca kapatılarak muhafaza altına alınmıştır.



Şekil 4.5 Kurutulmuş ürünleri ısısal paketlemede kullanılan cihazın genel görünümü

4.4.5 Kurutucular

Kurutma deneyleri kabin kurutucu (APV & PASILAC, UK) ve infrared kurutucu (Snijders Moisture Balance 26680) yardımıyla yapılmıştır. Konvektif kurutma deneylerinin yapıldığı Şekil 4.6'da verilen kabin kurutucu, delikli bir tepsi içerisinde, çeşitli meyve ve

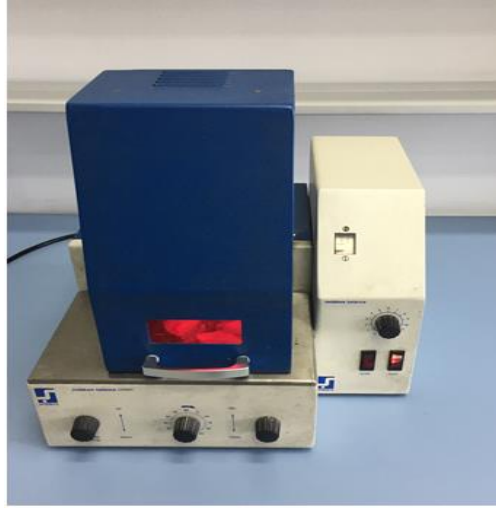
sebzelerin kurutulması için uygun, farklı sıcaklık aralıklarında hava akımı sağlayabilen pilot ölçekli bir kurutucudur.



Şekil 4.6 Kabin kurutucu

Kurutucu çelikten üretilmiş olup ısı kaybının önlenmesi için 50 mm kalınlığında izolasyon maddesi ile kaplanmıştır. Kabin içerisinde sürekli dolaşım halinde bulunan havanın hızı fan tarafından kontrol edilmektedir. Bu fan 0,37 kW gücünde bir elektrik motoruyla çalıştırılmaktadır. Kullanılacak olan havanın ısıtılması fanın karşısında bulunan 14 adet şerit halindeki ısıtıcılar yardımıyla yapılmaktadır. Kurutucu maksimum 200°C sıcaklıkta çalıştırılmaktadır. İstenilen sıcaklık değerleri, cihaz üzerinde bulunan kontrol panelindeki dijital sıcaklık göstergesi yardımıyla ayarlanabilmektedir. Kabin kurutucu 110 × 90 × 50 cm boyutlarındadır. Kurutucu içerisindeki raflar 90 × 50 cm ebatlarında olup 2 adet raf bulunmaktadır. Raflar metal yapıda olup örneklerin raflara yapışmasını önlemek için alüminyum folyo üzerinde kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.7’de verilen infrared kurutma sistemi 40 cm yüksekliğinde 15 cm genişliğinde kurutma kabininden oluşmaktadır. Örneklerin kurutucuya yerleştirilmesi için 6 cm yarıçaplı dairesel plaka kullanılmaktadır. İnfrared güç kaynağı lamba şeklinde olup kurutma kabininin tepesinde bulunmaktadır. Sistemin ısınması cihazın çalıştırılmasıyla birlikte elektromanyetik enerji yayan lamba sayesinde hızlı biçimde gerçekleşir. Aynı şekilde cihaz kapatıldığında elektromanyetik enerji yayan lamba devre dışı kalarak sistem hızlı bir şekilde soğumaktadır.



Şekil 4.7 İnfrared kurutucu

Kuruma süresinin ayarlanması için zaman ayarlayıcı infrared kurutucuda mevcuttur. Güç seviyesi 1 ve 12 sayıları arasında manuel olarak ayarlanabilir olup bizim çalıştığımız aralık 3 ve 7 arasındadır. Bu aralık 50 ile 104 W arasında güce tekabül etmektedir. İnfrared enerji seviyeleri dijital enerji ölçer (PeakTech 9035, Germany) yardımıyla ölçülmüştür.

4.5 Metotlar

4.5.1 Nem ve Kuru Madde Tayini

Elma dilimlerini kurutma işlemine başlamadan önce içerdikleri nem oranları etüv yardımıyla bulunmuştur. Elma dilimlerinin nem tayinini yapabilmek için Şekil 4.8’de görülen etüv (Selecta, Barcelona, Spain) içerisinde 5 saat boyunca $105\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $5,03\pm0,1$ g örnek kurutulmuştur.



Şekil 4.8 Nem tayini için kullanılan etüv

Kurutma işlemi sonrası etüvden çıkarılan örnekler desikkatörde soğumaya bırakılmış ve sonrasında tartım işlemi yapılmıştır. Netice olarak numunedeki nem oranı yaş bazda %85,45 olarak bulunmuştur.

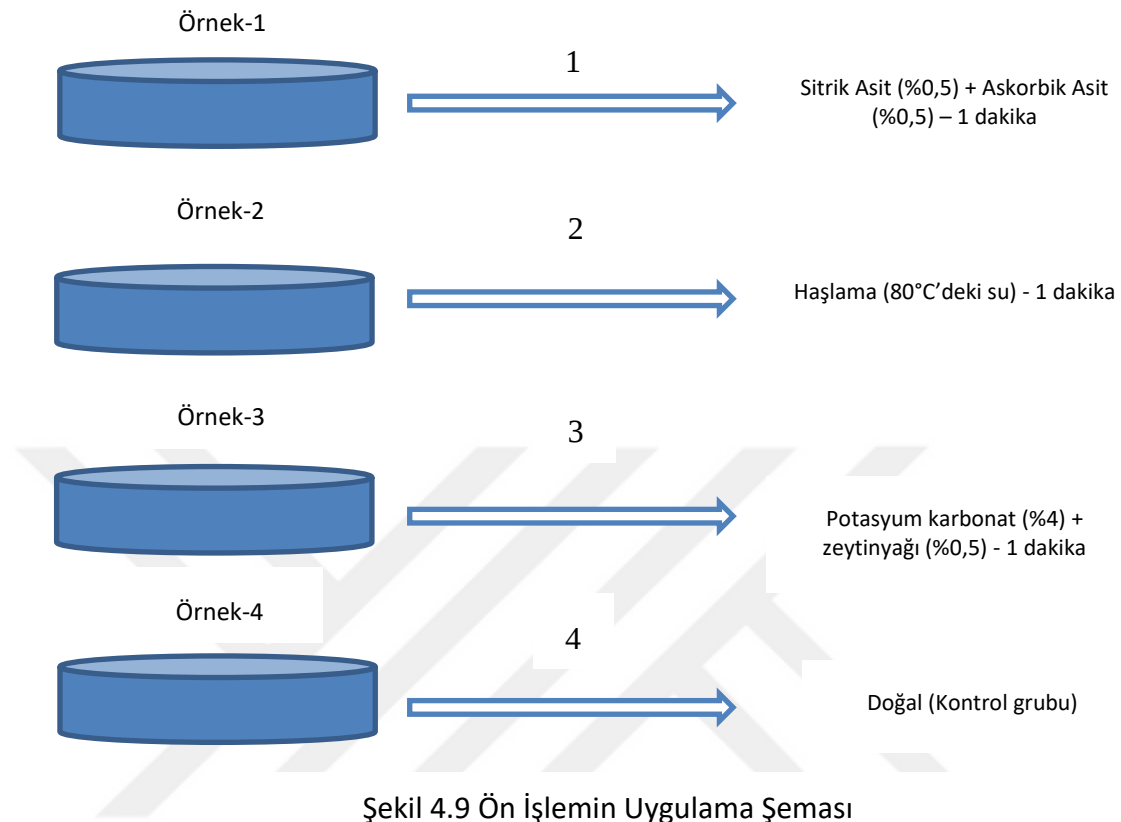
4.5.2 Deney Yöntemi

Elmanın kuruma süresi, kurutma havası sıcaklığına ve hava hızına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kurutulacak örneklerin farklı büyüklükte parçalara ayrılarak farklı sıcaklık ve süre zarfında ön işlem uygulayarak kuruma özelliklerini incelemek mümkündür. Bu sebeple, örnekler farklı sıcaklık değerlerinde %0,5 sitrik asit ve %0,5 askorbik asit karışımından oluşan çözeltisi içerisinde, %4 potasyum karbonat ve %0,5 zeytinyağı çözeltisi içerisinde ve haşlama amacıyla 80°C sıcaklıkta su içerisinde 1 dakika boyunca bekletilerek kurutma işlemine geçilmiştir. Uygulanan ön işlem yöntemleriyle kuruma süresinin kısaltılması ve kalitenin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ön işlem için kullanılan çözeltiler elma dilimlerinde nem transferini engelleyen tabakaya etki ederek doku geçirgenliğini artırmaktadır. Bu durum nem transferi hızlandırır. Nem transferinin hızlanmasıyla birlikte kuruma süresi azaldığından örnekler yüksek sıcaklığa daha az maruz kalmaktadır. Bu durum sıcaklıktan daha az etkilenmiş yüksek kalitede kurutulmuş ürün elde edilmesine olanak sağlamıştır. Ön işlem ile aynı zamanda gıda içerisinde bulunan enzimler inaktive edildiğinden kurutma sonrası son ürünün renk kayıpları en aza indirilmiştir [43].

Elma kurutma deneylerinde 4, 7 ve 10 mm dilim kalınlığında kesilen örneklerle uygulanan farklı ön işlem, kurutma sistemi ve sıcaklık değerlerinin kurutma işlemine etkisi gözlemlenmiştir. Kurutma deneylerinin ilkinde 50'şer gram dilimlenmiş elma örnekleri 4 gruba ayrılarak ön işlem için hazırlanmıştır. İlk grupta %0,5 sitrik asit ve %0,5 askorbik asit çözeltilerinin karışımından oluşan çözelti içerisinde 1 dakika boyunca bekletilen örnekler bulunmaktadır. İkinci grupta 80°C sıcaklıktaki su ile 1 dakika boyunca bekletilen ve haşlama diye tabir edilen örnekler hazırlanmıştır. Üçüncü grubu oluşturan örnekler %4 potasyum karbonat (K_2CO_3) ve %0,5 zeytinyağı çözeltisi ile 1 dakika boyunca muamele edilmiştir. Son olarak dördüncü grupta ön işlem uygulanmadan kontrol grubu diye adlandırılan örneklerden oluşmaktadır.

Şekil 4.9'da elma dilimlerinin kurutma işlemi öncesi enzimatik reaksiyonların ve yüksek sıcaklığın sebep olduğu renk değişimlerinin önlenmesi, kalite açısından problem

yaratan diğer etkenlerin azaltılması ve nem transferini hızlandırmak için uygulanan ön işlem yöntemleri uygulama sırasıyla görülmektedir.



Hazırlanan bütün örnekler 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda sıcak hava ile kurutulmaya bırakılmıştır. İkinci kurutma deneylerinde elma örnekleri ön işleme maruz bırakılmadan 7 mm dilim kalınlığında dilimlenerek 50, 62, 74, 88 ve 104 W gücünde infrared kurutucuda kurutulmuştur. Sonrasında aynı şekilde 7 mm kalınlığında hazırlanan örnekler kombine kurutma sistemi kullanarak kurumaya bırakılmıştır. Bu işlem için 1 saat boyunca infrared gücünün 74 W olduğu kurutucu içerisinde ön muamele edilen örnekler sonrasında 60°C sıcaklıkta çalıştırılan sıcak hava kurutma kabinine koyularak kurumaya bırakılmıştır. Bu sayede kombine kurutma sisteminin kurutma işlemine ve son ürünün kalitesi üzerine etkisi gözlemlenmiştir.

Kurutma kabininde yapılan bütün deneylerde kurutma hava hızı $2\pm0,1$ m/s olarak ölçülmüştür. Kurutulan ürünlerin ağırlık ölçümleri Şekil 4.3'te gösterilen terazi yardımıyla yapılmıştır. Kurutma işlemi sırasında örneklerin ağırlıkları 15 dakika aralıklarla ölçülmüş ve nem içeriği yaş bazda %15 seviyesine düşene kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Kurutma işleminin sonunda kurutulan örnekler düşük

yoğunluklu polietilen (60 µm kalınlığındaki LDPE) paketlere yerleştirildikten sonra ısı yöntemiyle paketlerin ağzı kapatılarak muhafaza altına alınmıştır.

4.6 Fiziksel ve İstatiksel Analiz

Gıda kurutma işlemi sırasında gıdanın nemi tamamen uzaklaştırılmaz. Kurutulmuş gıda içerisinde de bir miktar nem bulunmaktadır. Bu miktarın gıdanın sağlıklı biçimde muhafaza edilmesi için belirli seviyede olması gerekmektedir. Meyve ve sebzeler kurutulmuş halde bünyesinde %15 oranında nem bulundurabilirler. Bu seviyenin üstünde ise kurutulan gıdada mikrobiyal bozulmalar başlar. Bu değer sınır olarak kabul edilir [61]. Kurutma işlemi öncesi ve sonrasında yapılan ön işlem ve analizlerin hepsi gıdanın güvenli bir şekilde tüketime hazır hale getirilmesi ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılması içindir. Kurutma işlemi sırasında gıdada meydana gelen değişimlerin gözlemlenmesi, kalite değerlendirmesinin yapılması, difüzyon katsayılarının ve aktivasyon enerjilerinin hesaplanması için daha önce literatürde uygulanan renk analizi ve rehidrasyon testlerinin yanında matematiksel modelleme ve istatistiksel analiz yöntemleri uygulanmıştır.

4.6.1 Renk Ölçümü

Kurutulan elmaların renkleri Şekil 4.10’da verilen (CR-400 Model Colorimeter, Konica Minolta, Japan) renk ölçer ile ölçülmüştür.



Şekil 4.10 Renk ölçer [62]

Renk değişimleri L^* (parlaklık), a^* (kırmızılık) ve b^* (sarılık) cinsinden belirlenmiştir.

L^* , a^* ve b^* değerleri standardizasyon sonrası taze ve kurutulmuş elmalar için ölçülmüştür.

Renk farkı (ΔE), renk yoğunluğu (ΔC) ve Hue açısı (H°) sırasıyla (4.1), (4.2) ve (4.3) eşıtlüklerini kullanarak hesaplanmıştır [3].

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \quad (4.1)$$

$$\Delta C = \sqrt{(a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \quad (4.2)$$

$$\text{Hue angle} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (4.3)$$

4.6.2 Rehidrasyon Oranı

Kurutulmuş bir ürünün rehidrasyon oranı, ürünün suda belli koşullarda bekletilmesi sonucunda kazandığı su miktarı ile ölçülür. Rehidrasyon deneylerinin gerçekleştiği suyun sıcaklığı ve rehidrasyon süresi rehidrasyonu etkileyen önemli değişkenlerdir [63]. Rehidrasyon deneyleri 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimleri kullanılarak 20°C sıcaklıkta sabit tutulan su içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 3 gram olarak tartılan kurutulmuş örnekler, 500 ml kapasiteli beher içerisinde bulunan 400 gram su içerisinde 20°C rehidrasyon sıcaklığında bekletilmiştir. Örnekler beher içerisinde 6 saat bekletilmiş olup bekletildiği sürece her 1 saatlik süre zarfında sudan çıkarılarak yüzey nemi kâğıt havluyla alınmış ve Şekil 4.4'te gösterilen terazi ile örneklerin tartımı yapılmıştır.

Deneyler iki defa tekrarlanmış olup elde edilen verilerin ortalamaları alınarak hesaplamaya katılmıştır.

Örneklerin rehidrasyon oranı (4.4) eşıtlığı kullanılarak hesaplanmıştır [3].

$$R = (M_2 - M_1)/M_1 \quad (4.4)$$

M_1 değeri kuru elma diliminin ilk ağırlığı olup M_2 değeri ise su içerisinde bekletildikten sonraki ağırlık değeridir.

4.6.3 Matematiksel Modelleme

Kurutma deneylerinde kullanılan örneklerin nem içeriği kuru bazda (4.5) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$M = \frac{m_w}{m_d} \quad (4.5)$$

Denklemden, M değeri nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), m_w değeri su miktarını (kg) ve m_d değeri kuru madde miktarını (kg) göstermektedir.

Kurutma hızı ise (4.6) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır [1]:

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (4.6)$$

Denklemden, DR kurutma hızı (kg su/(kg kuru madde×dak.)), M_t değeri t anındaki nem içeriği (kg su/kg kuru madde), M_{t+dt} değeri t+dt anındaki nem içeriği (kg su/kg kuru madde) ve t değeri ise süre (dak.) olarak ifade edilmektedir.

Nem oranı (MR) (4.7) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [64]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4.7)$$

Denklemden, M_t değeri herhangi bir anda su miktarını (kg su/kg kuru madde), M_0 değeri kurutmaya başlamadan önce ürünün içerdiği su miktarını (kg su/kg kuru madde) ve M_e değeri kurutucu havanın içerdiği su miktarını (kg su/kg kuru madde) belirler.

Deney sonuçlarından faydalanarak nem içeriğinin zamanla nasıl değiştiğini anlamak amacıyla Çizelge 4.1’de gösterilen Agbashlo vd., Page, Henderson & Pabis, Wang & Singh ve Midilli & Küçük olmak üzere toplamda beş adet yarı deneysel model test edilmiş ve bu modeller arasında istatistiksel açıdan kıyaslama yapılmıştır.

Çizelge 4.1 Elma dilimlerinin kurutulmasında kullanılan yarı deneysel modeller

Model Adı	Denklem	Kaynaklar
Agbashlo vd.	$MR = \exp(-at/(1+bt))$	[65]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[66]
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[67]
Wang & Singh	$MR = 1+at+bt^2$	[12]
Midilli & Küçük	$MR = a \exp(-kt^n)+bt$	[68]

Lineer olmayan regresyon yöntemi kullanılarak deney sonuçlarından elde edilen veriler ile model sabitleri hesaplanarak elma dilimlerinin kurutma işlemini en iyi tanımlayan model tespit edilmiştir.

4.6.4 Regresyon Analizi

İstatistiki doğrulama için Statistica programı (Statsoft, Inc., Tulsa, OK) kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Matematiksel modeller yardımıyla oluşturulan ve örneklerin kuruma kinetiği hakkında en doğru bilgiyi veren eğrinin seçilmesi için regresyon katsayısı (R^2) ölçüt olarak seçilmiştir. Bunun yanında ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) gibi istatistiki değerlendirme ölçütleri de denklemin doğrulanmasında yardımcı unsur olarak değerlendirmeye alınmıştır.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (4.8)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

Bu eşitliklerde, $MR_{exp,i}$ değeri deneysel boyutsuz nem oranını gösterirken $MR_{pre,i}$ değeri ise modeller yardımıyla hesaplanan tahmini boyutsuz nem oranını göstermektedir. Aynı şekilde denklemdaki N değeri yapılan gözlem sayısını ve z değeri sabitlerin sayısını göstermektedir.

Ortalama karesel hata değeri (RMSE), deneysel değerler ve modeller yardımıyla hesaplanan değerler arasındaki sapmayı göstermekte olup bu değer olabildiğince sıfıra yakın olması istenilen bir durumdur. Bunun yanında ki-kare (χ^2) değerinin de oldukça küçük olması deneysel veriler ve modeller ile hesaplanan değerlerin uyum içinde olduğunu göstermektedir.

4.7 Efektif Nem Difüzyon Katsayısı

Gıdaların kurutulması sırasında ince tabaka kurutma işlemi yaygın olarak uygulama alanı bulmuş ve bu kurutma işleminde boyutsuz nem oranını bulmak için Fick ikinci yasasının kararsız halde (4.10) difüzyon denkleminde verilmiştir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \cdot \nabla M) \quad (4.10)$$

Yukarıdaki denklemin çözümünde, kurutulacak örneğin geometrisi Crank [11] tarafından sonsuz uzunlukta uygun kalınlıkta bir levha olarak kabul edilmiş, örneğin kurutulmadan önce nem oranı her yerde homojen olarak kabul edilerek dokudaki büzülme ihmal edilmiştir. Bunun yanında difüzyon katsayısı sabit olarak kabul edilmiştir. Denklemin uygun sınır koşulları ile çözümü (4.11) eşitliğinde verilmiştir.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11)'de D_{eff} değeri efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), L değeri yarı dilim kalınlığı (m) ve t değeri süre (s) olarak verilmektedir. Kurutma süresinin uzun olduğu durumlarda yukarıdaki denklemin çözümünden elde edilen ilk terim boyutsuz nem oranının hesaplanması için kullanılır.

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4.12)$$

Eşitlik (4.12)'de görülen kurutma süresine karşı $\ln MR$ eğrinin eğimi efektif difüzyon katsayısının hesaplanmasında kullanılır. Eğrinin eğimi (4.13) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (4.13)$$

4.8 Aktivasyon Enerjisi

Aktivasyon enerjisi değeri, $\ln(D_{eff})$ ve $1/(T+273.15)$ arasında çizilen eğrinin eğiminden yararlanarak hesaplanır [11].

Efektif difüzyon katsayısı ve sıcaklık arasındaki ilişki Arrhenius tipi bir fonksiyon ile eşitlik (4.14)'te gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (4.14)$$

Bu eşitlikte D_{eff} değeri efektif difüzyon katsayısını (m^2/s), D_0 değeri sonsuz sıcaklıkta difüzivite değerini (m^2/s), E_a değeri aktivasyon enerjisini (kJ/mol), R değeri evrensel gaz sabitini ($kJ/mol \times K$) ve T değeri kurutma sıcaklığını ($^{\circ}C$) göstermektedir.

İnfrared kurutucuda gerçekleştirilen kurutma işlemleri sırasında kurutucu içerisinde sıcaklık ölçülemediğinden aktivasyon enerjisi hesabında eşitlik (4.15)'te verilen revize edilmiş Arrhenius denklemi kullanılmıştır. Bu eşitlikte difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi sıcaklık yerine infrared kaynağının gücünün kurutulan örnek miktarına oranı ile ilişkilendirilmiştir [69].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a \times m}{p}\right) \quad (4.15)$$

(4.15) eşitliğinde D_{eff} değeri efektif difüzyon katsayısını (m^2/s), D_0 değeri sonsuz sıcaklıkta difüzivite değerini (m^2/s), E_a değeri aktivasyon enerjisini (kJ/kg), m değeri kurutulacak maddenin kütlesini (kg) ve p değeri infrared kurutucunun gücünü (W) göstermektedir.

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Konvektif Kurutma

5.1.1 Nem İçeriğinin Kurutma Süresine Göre Değişimi

Kurutma deneylerinde 7 mm dilim kalınlığı olan elma dilimleri kullanılmıştır. Bu elma dilimlerinin kuruma kinetiği 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda $2\pm0,1$ m/s hava hızında gözlemlenmiştir. Kurutma öncesi uygulanan nem tayin yöntemi ile yaş bazda örneklerin nem oranı %85,45 ve kuru madde oranı %14,55 olarak bulunmuştur. Kurutma işlemi ile örneklerin nem oranı yaş bazda %15 oranına çekilmiştir. Uygulanan kurutma işlemi sonrası örneklerin kuruma süreleri Çizelge 5.1’de ve kuruma grafikleri ise Şekil 5.1-5.4’de verilmiştir.

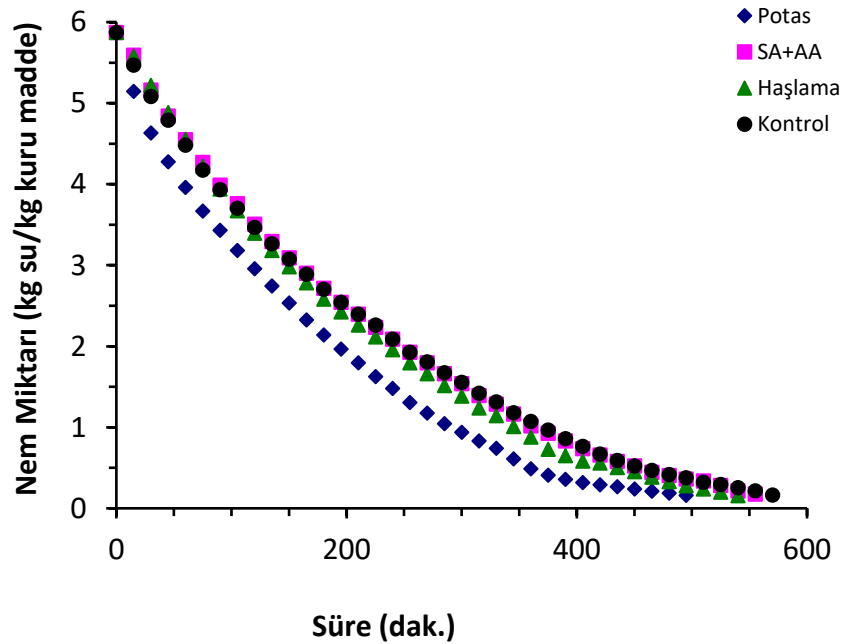
Çizelge 5.1 Elma dilimlerine uygulanan sıcaklık ve ön işlem yöntemine göre kuruma süreleri

Kuruma Sıcaklığı (°C)	Kuruma Süresi (dakika)			
	Potas	SA+AA	Haşlama	Kontrol
50	495	555	540	570
60	330	390	375	420
70	180	255	240	270
80	165	225	210	225

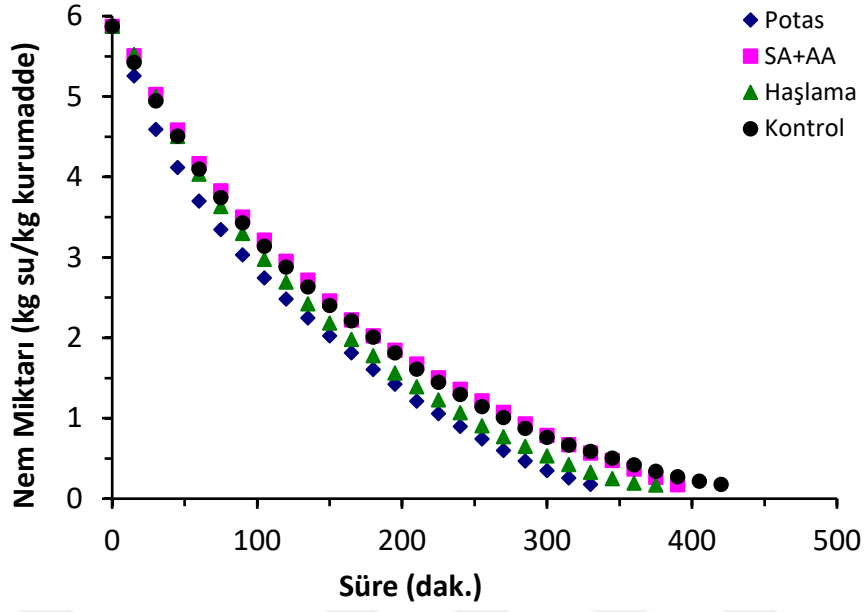
Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere, ön işlem uygulanarak kurutulmaya bırakılan örneklerin kuruma süreleri ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerle göre daha kısa olduğu

saptanmıştır. Örneğin 60°C sıcaklıkta kurutulan kontrol grubu örneklerin 420 dakikada kuruduğu gözlemlenirken bu durum potasyum karbonat çözeltisi ile muamele edilen örneklerde 330 dakika, sitrik asit ve askorbik asit çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerde 390 dakika ve haşlama yöntemiyle ön muamele edilen örneklerde 375 dakika olarak gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan potasyum karbonat çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin kontrol grubuna göre kuruma süresinde %22 oranında, haşlama ile ön muamele edilen örneklerin kontrol grubuna göre kuruma süresinde %11 oranında azalma olduğu gözlemlenirken bu durum sitrik asit ve askorbik asit çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerde %8 olarak bulunmuştur. Benzer sonuçlar diğer sıcaklıklarda uygulanan kurutma işlemlerinde de görülmektedir.

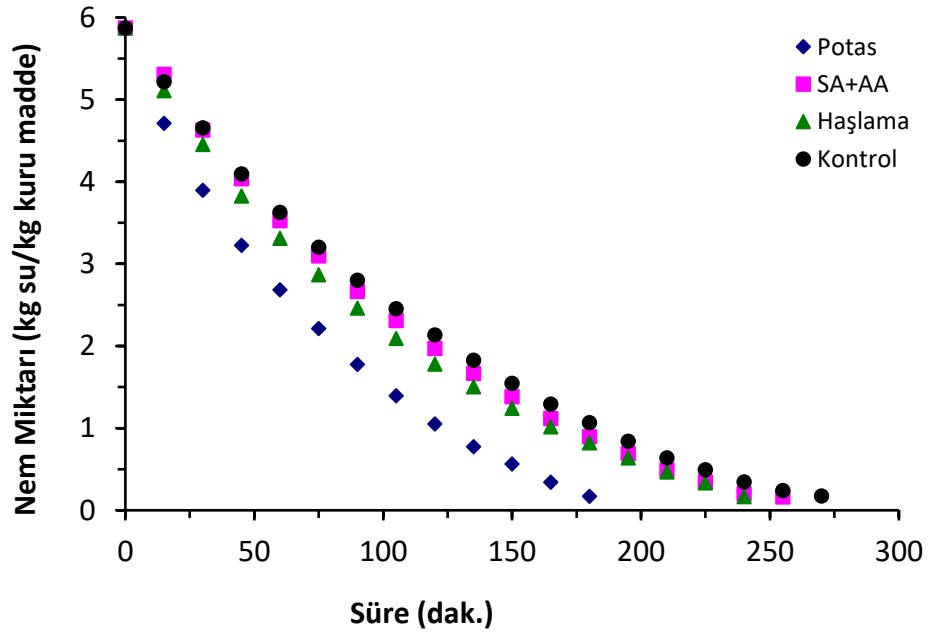
Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi 60°C ve 70°C sıcaklıklardaki kurutulan Potas, SA+AA, Haşlama ve Kontrol grubu örneklerin kuruma süreleri sırasıyla 330, 390, 375, 420 ve 180, 255, 240, 270 dakikadır. Kurutma hava sıcaklığındaki 10°C sıcaklık artışı yaklaşık olarak örneklerin kuruma sürelerinde %36-46 arasında bir azalma sağlamıştır.



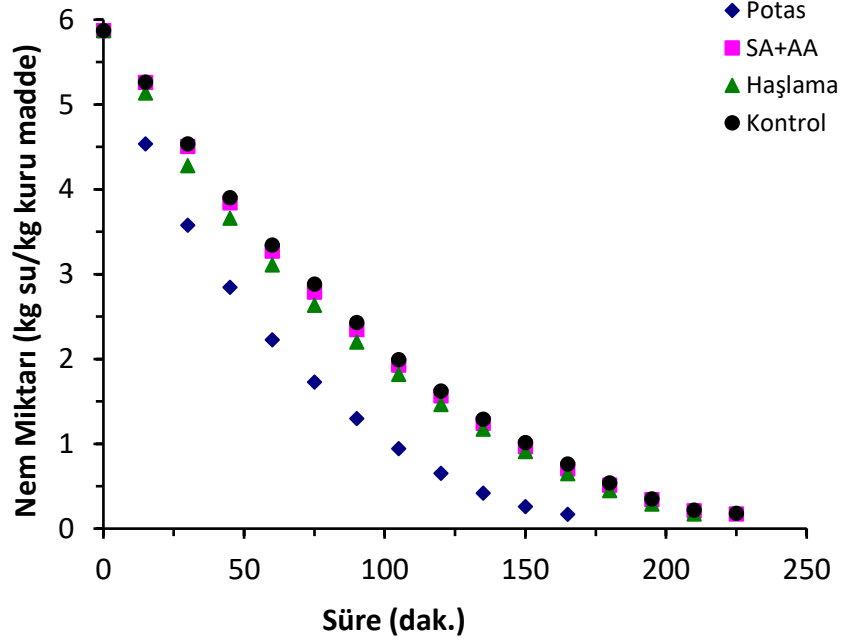
Şekil 5.1 Elma dilimlerinin 50°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi



Şekil 5.2 Elma dilimlerinin 60°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi



Şekil 5.3 Elma dilimlerinin 70°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi

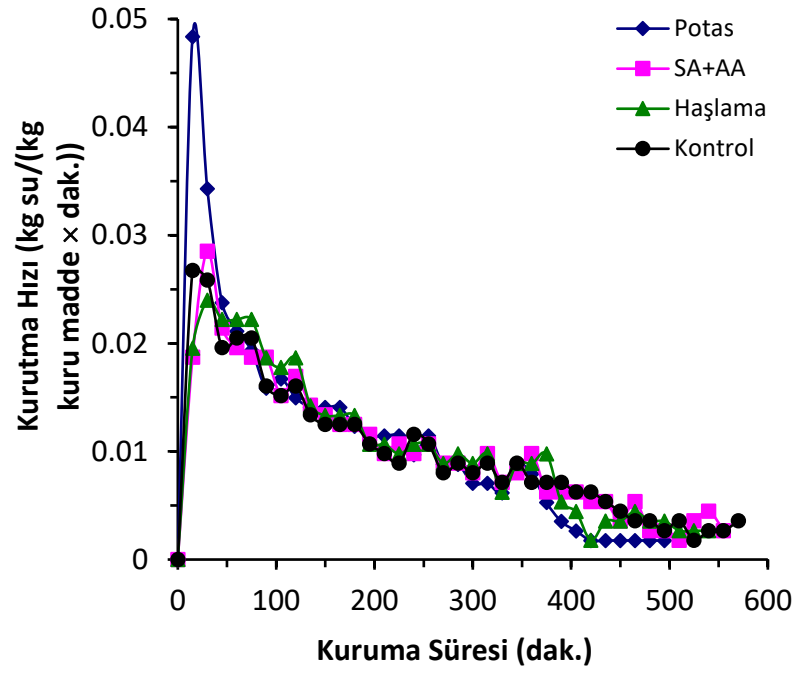


Şekil 5.4 Elma dilimlerinin 80°C sıcaklıkta kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi

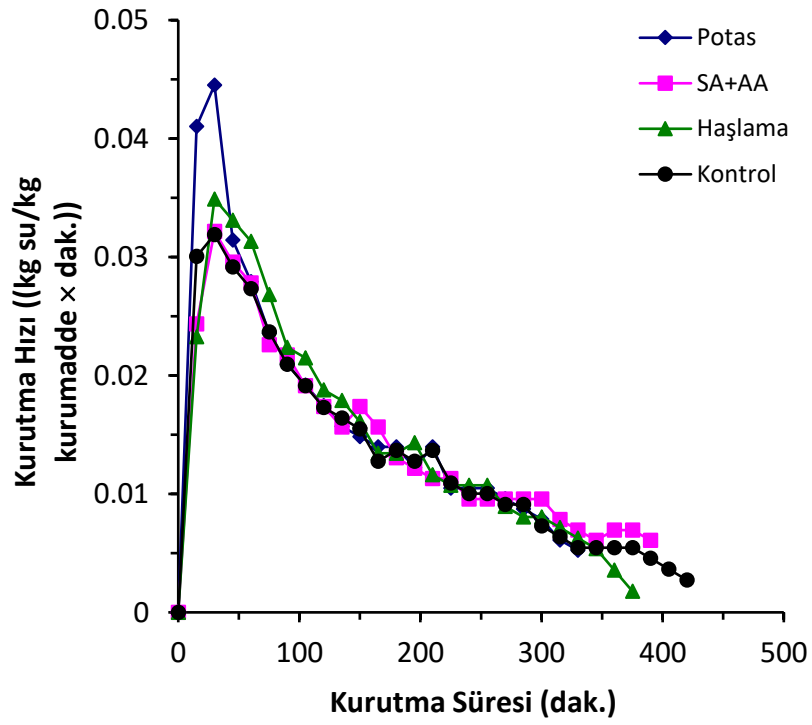
Bu şekillerden kurutulan elma dilimlerinin nem içeriklerinin artan kurutma süresi ile azaldığı görülmüştür. Kurutma süresinin azalması enerji tasarrufunu beraberinde getirmektedir. Kurutma süresi aynı zamanda kurutma hava sıcaklığından da etkilenmektedir. Yükselen hava sıcaklığı ile ürün ve ortam arasındaki kütle transfer katsayısı artmakta ve bu durum nem transferinin hızlanmasına sebep olmaktadır. Netice olarak artan nem transferi ile kuruma süresi azalmaktadır [70].

5.1.2 Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi

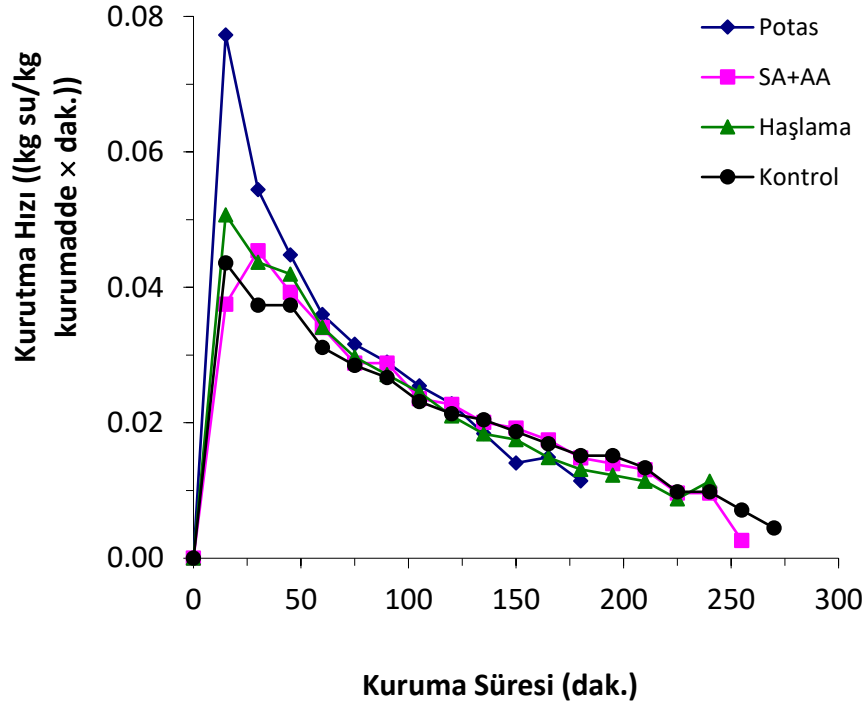
Kurutma hızlarının kuruma süresi ile değişimi Şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de verilmiştir. Çizilen kuruma hızı eğrileri azalan hız periyodunda olup sabit hızda kuruma periyoduna rastlanılmamıştır. Deneylerden elde edilen sonuçların benzeri Konya bölgesinde kontrollü koşullarda elma kurutma işleminde [71], Özgen [72] tarafından tasarlanan konvektif tip kurutucuda elma kurutma işleminde ve Tarhan vd. [73] tarafından yapılan Amasya elmasının kuruma süresi ve kalite üzerindeki etkilerini gözlemleme çalışmasında ortaya çıkmıştır.



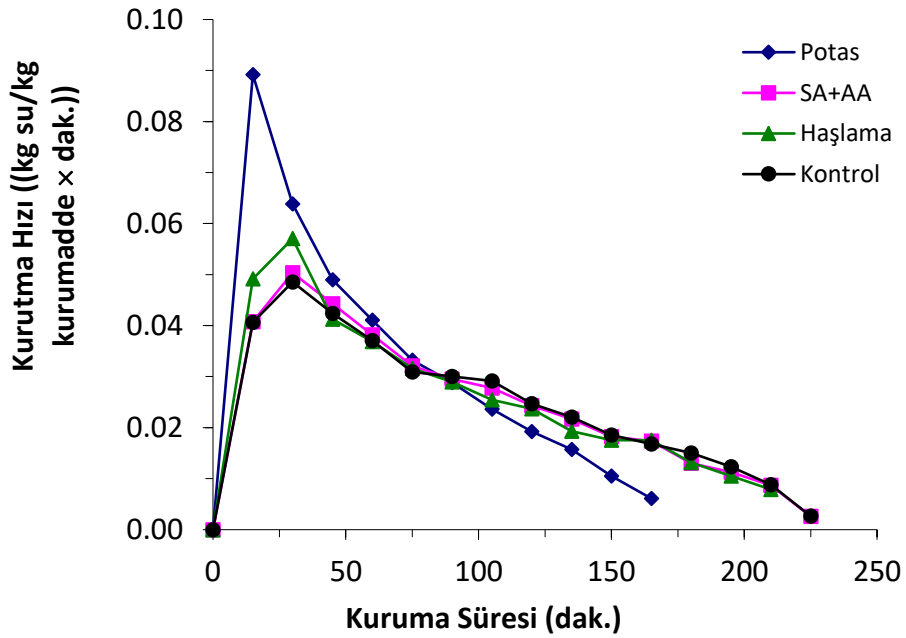
Şekil 5.5 Elma dilimlerinin 50°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi



Şekil 5.6 Elma dilimlerinin 60°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi



Şekil 5. 7 Elma dilimlerinin 70°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi



Şekil 5.8 Elma dilimlerinin 80°C sıcaklıktaki kuruma hızının kuruma süresi ile değişimi

Şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8'den anlaşılabacağı üzere artan kurutma sıcaklığı ile kuruma hızı artmış ve kuruma süresi kısalmıştır. Artan sıcaklık ile kuruma hızının artmasıyla en kısa

sürede kuruyan örnekler 80°C sıcaklıkta kurutulan örnekler olup bu durum yüksek sıcaklığın kuruma hızına etkisinin fazla olduğunun bir göstergesidir. Aynı zamanda deneyler esnasında uygulanan ön işlemlerin de kuruma hızını artırdığı görülmektedir. Jokic vd. [74] tarafından yapılan bir araştırmada, kabin kurutucuda 50, 60 ve 70°C sıcaklıkta ve kurutma hava hızının 1,5 m/s olduğu durumda organik elma dilimlerini ön işlem uygulayarak kuruttuğu çalışmada da benzer sonuçlar alınmıştır.

5.1.3 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak kuruma süresi ve nem içeriğinin değişim grafiği üzerinde eğri uydurarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Eğriyi uydururken lineer olmayan regresyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Matematiksel modelleme için kullanılan denklemler Çizelge 4.1’de verilmiş olup matematiksel modeller kullanılarak hesaplanan regresyon katsayısı (R^2), ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerleri Çizelge 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5’te verilmiştir.

Kullanılan matematiksel denklemlerin uygunluğunun kontrol edilmesinde regresyon katsayısının (R^2) yüksek, ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerlerin ise olabildiğince küçük olması istenir. Kurutma işlemi sırasında örneklerin kuruma kinetiğini en iyi tanımlayan denklemin seçiminde regresyon katsayısı (R^2) ana kriter olarak belirlenmiştir. Ortalama karesel hata değeri (RMSE) deneysel olarak elde edilen sonuçlar ve matematiksel denklemler yardımıyla hesaplanan değerler arasındaki sapmanın bir göstergesidir. Aynı zamanda ki-kare (χ^2) değerinin azalmasıyla deneysel ve hesaplanan nem oranı değerleri arasındaki uyumun arttığı görülmektedir [75].

Çizelge 5.2 Potas çözültisi ile ön muamele edilen örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri

Model	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri				R^2	χ^2	RMSE
		a	b	k	n			
Henderson & Pabis	50	0,983397	-	0,005954	-	0,9926	0,000574	0,123077
	60	1,009064	-	0,007656	-	0,9929	0,000595	0,090273
	70	1,010544	-	0,014140	-	0,9933	0,000669	0,072100
	80	1,010486	-	0,017252	-	0,9959	0,000430	0,057526
Page	50	-	-	0,005395	1,021766	0,9924	0,000590	0,118565
	60	-	-	0,005745	1,055967	0,9939	0,000513	0,087669
	70	-	-	0,009554	1,086372	0,9952	0,000094	0,024962
	80	-	-	0,012256	1,078034	0,9974	0,000276	0,045773
Midilli & Küçük	50	0,979785	-0,000188	0,008444	0,905080	0,9993	0,000067	0,034300
	60	1,005516	-0,000449	0,012906	0,847965	0,9996	0,000034	0,019634
	70	0,998688	-0,000714	0,017666	0,898424	0,9998	0,000017	0,010078
	80	0,998047	-0,000434	0,017993	0,958959	0,9997	0,000038	0,014891
Wang & Singh	50	-0,004467	0,000005	-	-	0,9822	0,001386	0,161559
	60	-0,005802	0,000009	-	-	0,9886	0,000957	0,119029
	70	-0,010596	0,000030	-	-	0,9963	0,000737	0,074583
	80	-0,012703	0,000042	-	-	0,9921	0,000842	0,076195
Aghbashlo vd.	50	0,005563	-0,000352	-	-	0,9939	0,000469	0,097650
	60	0,006795	-0,000621	-	-	0,9957	0,000355	0,074065
	70	0,012118	-0,001418	-	-	0,9974	0,000258	0,043372
	80	0,015123	-0,001420	-	-	0,9987	0,000132	0,030200

Çizelge 5.3 SA+AA çözültisi ile ön muamele edilen örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri

Model	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri				R^2	χ^2	RMSE
		a	b	k	n			
Henderson & Pabis	50	1,035054	-	0,004766	-	0,9925	0,000621	0,131871
	60	1,037767	-	0,006384	-	0,9995	0,000595	0,095473
	70	1,052291	-	0,010070	-	0,9881	0,001200	0,117760
	80	1,059244	-	0,011715	-	0,9871	0,001381	0,122903
Page	50	-	-	0,002180	1,135426	0,9964	0,000293	0,091680
	60	-	-	0,002994	1,138089	0,9968	0,000275	0,068944
	70	-	-	0,003290	1,223549	0,9967	0,000330	0,062364
	80	-	-	0,003227	1,259357	0,9978	0,000234	0,050712
Midilli & Küçük	50	1,001241	-0,000166	0,004109	0,993053	0,9995	0,000042	0,032956
	60	1,009719	-0,000270	0,006065	0,970920	0,9997	0,000024	0,018029
	70	1,002418	-0,000377	0,005937	1,066148	0,9997	0,000030	0,017101
	80	1,000745	-0,000301	0,005138	1,140360	0,9996	0,000038	0,016768
Wang & Singh	50	- 0,003491	0,000003	-	-	0,9963	0,000307	0,086728
	60	- 0,004700	0,000006	-	-	0,9960	0,000338	0,078127
	70	- 0,007145	0,000013	-	-	0,9963	0,000104	0,035317
	80	- 0,008244	0,000018	-	-	0,9995	0,000046	0,018960
Aghbashlo vd,	50	0,003829	-0,000591	-	-	0,9988	0,000096	0,051860
	60	0,005125	-0,000799	-	-	0,9986	0,000117	0,043847
	70	0,007330	-0,001732	-	-	0,9993	0,000067	0,029083
	80	0,008280	-0,002145	-	-	0,9995	0,000041	0,019020

Çizelge 5.4 Haşlama işlemi ile muamele edilen örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri

Model	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri				R^2	χ^2	RMSE
		a	b	k	n			
Henderson & Pabis	50	1,045117	-	0,005087	-	0,9926	0,000636	0,129958
	60	1,049446	-	0,007259	-	0,9931	0,000632	0,101256
	70	1,028309	-	0,010535	-	0,9936	0,000601	0,078615
	80	1,039549	-	0,012094	-	0,9905	0,000970	0,094887
Page	50	-	-	0,002063	1,156880	0,9971	0,000242	0,083601
	60	-	-	0,002974	1,165019	0,9976	0,000220	0,061975
	70	-	-	0,005513	1,131517	0,9973	0,000250	0,049562
	80	-	-	0,005045	1,182305	0,9967	0,000329	0,055459
Midilli & Küçük	50	1,003298	-0,000135	0,003584	1,034316	0,9993	0,000058	0,034274
	60	1,011396	-0,000194	0,005302	1,030600	0,9995	0,000045	0,025758
	70	1,000963	-0,000381	0,009187	0,990465	0,9999	0,000004	0,005543
	80	1,002422	-0,000464	0,008774	1,025899	0,9997	0,000032	0,014779
Wang & Singh	50	-0,003668	0,000004	-	-	0,9970	0,000256	0,078337
	60	-0,005208	0,000007	-	-	0,9966	0,000306	0,074401
	70	-0,007805	0,000016	-	-	0,9962	0,000355	0,062599
	80	-0,008753	0,000020	-	-	0,9979	0,000210	0,041589
Aghbashlo vd,	50	0,003992	-0,000661	-	-	0,9991	0,000077	0,044695
	60	0,005664	-0,000949	-	-	0,9989	0,000100	0,041517
	70	0,008603	-0,001264	-	-	0,9991	0,000082	0,028080
	80	0,009263	-0,001827	-	-	0,9991	0,000091	0,030279

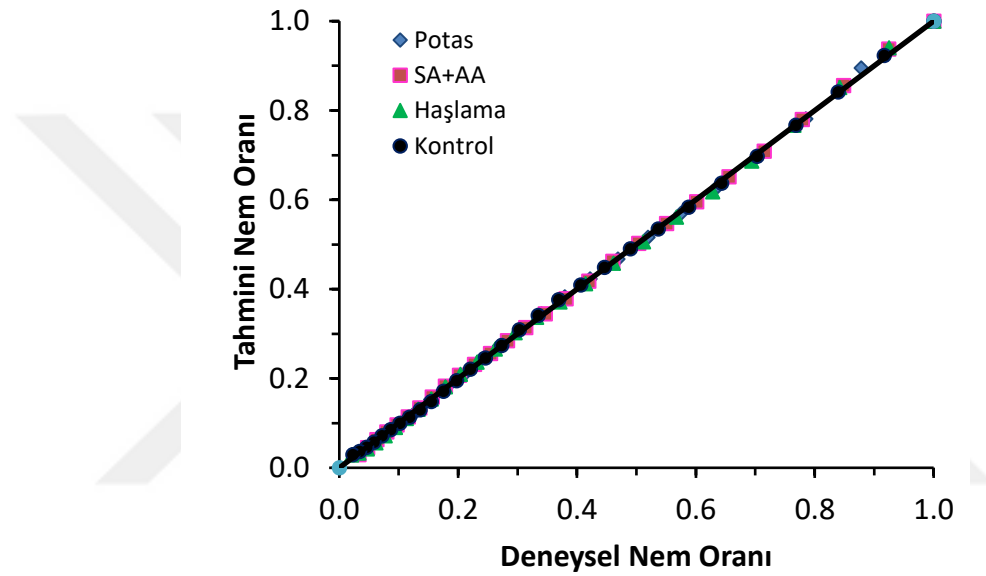
Çizelge 5.5 Kontrol grubu örneklerde kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri

Model	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri				R^2	χ^2	RMSE
		a	b	k	n			
Henderson & Pabis	50	1,018690	-	0,004690	-	0,9928	0,000576	0,127009
	60	1,028046	-	0,006489	-	0,9948	0,000439	0,091758
	70	1,041821	-	0,009400	-	0,9887	0,001095	0,118959
	80	1,060126	-	0,011431	-	0,9855	0,001557	0,128984
Page	50	-	-	0,002671	1,098508	0,9954	0,000365	0,103532
	60	-	-	0,003554	1,110095	0,9975	0,000019	0,017747
	70	-	-	0,003513	1,195008	0,9960	0,000378	0,070361
	80	-	-	0,003039	1,272273	0,9973	0,000309	0,055685
Midilli & Küçük	50	0,995632	-0,000191	0,005073	0,949762	0,9994	0,000048	0,033490
	60	1,002234	-0,000179	0,005925	0,988586	0,9997	0,000018	0,017378
	70	0,997075	-0,000397	0,006359	1,033978	0,9997	0,000025	0,015171
	80	0,999145	-0,000350	0,004897	1,140098	0,9997	0,000029	0,014488
Wang & Singh	50	-0,003507	0,000003	-	-	0,9969	0,000487	0,108801
	60	-0,004780	0,000006	-	-	0,9947	0,000446	0,093808
	70	-0,006767	0,000012	-	-	0,9985	0,000140	0,042384
	80	-0,008018	0,000016	-	-	0,9995	0,000047	0,019852
Aghbashlo vd,	50	0,003948	-0,000499	-	-	0,9979	0,000168	0,069121
	60	0,005424	-0,000667	-	-	0,9991	0,000073	0,037042
	70	0,008603	-0,001264	-	-	0,9992	0,000074	0,031898
	80	0,007941	-0,002211	-	-	0,9996	0,000031	0,016757

Çizelge 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5’da görüldüğü üzere 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda kurutulan örneklerin regresyon katsayısı (R^2), ortalama karesel hata (RMSE) ve ki-kare (χ^2) değerlerine bakıldığında Midilli & Küçük modelinin regresyon katsayısının (R^2) tüm sıcaklık koşullarında ve uygulanan ön muamele yöntemlerinde en yüksek olduğu ve

aynı zamanda ortalama karesel hata değeri (RMSE) ve ki-kare (χ^2) değeri kullanılarak diğer modellere göre daha küçük olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar yardımıyla Midilli & Küçük modelinin elma dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıkladığı anlaşılmıştır.

Konvektif kurutma işleminde 60° kurutma sıcaklığı göz önüne alındığında elma kurutma karakteristiğini en iyi tanımlayan modelin Midilli & Küçük tarafından geliştirilen model olduğu Şekil 5.9’da verilen hesaplanmış ve deneysel yollarla elde edilen nem oranı verilerin kıyaslanması sonucu elde edilen grafikten de anlaşılmaktadır.

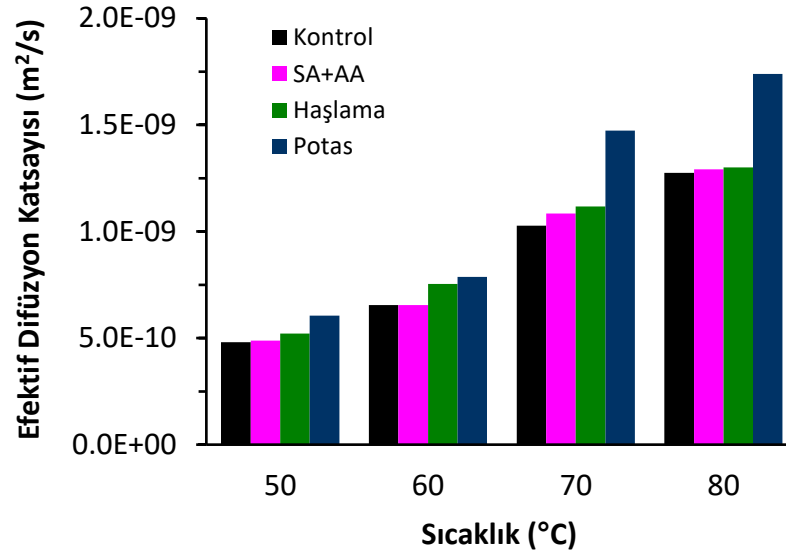


Şekil 5.9 60°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimleri için deneysel ve Midilli & Küçük modelinin kullanılmasıyla tahmin edilen nem oranı değerleri

Model sabitleri, lineer olmayan regresyon yöntemi ile hesaplandıktan sonra son halini alan model kullanılarak hesaplanan elma içerisindeki nem oranının zamanla değişimi deneysel veriler ile doğrulanmıştır.

5.1.4 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Kurutma işlemi sırasında ön işlem uygulanan ve ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerin difüzyon katsayısı her bir kurutma sıcaklığı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısının hesaplanması için (4.13) denklemi kullanılmış hesaplanan değerler kabin kurutucuda kurutulan örnekler için Şekil 5.10’da verilmiştir.

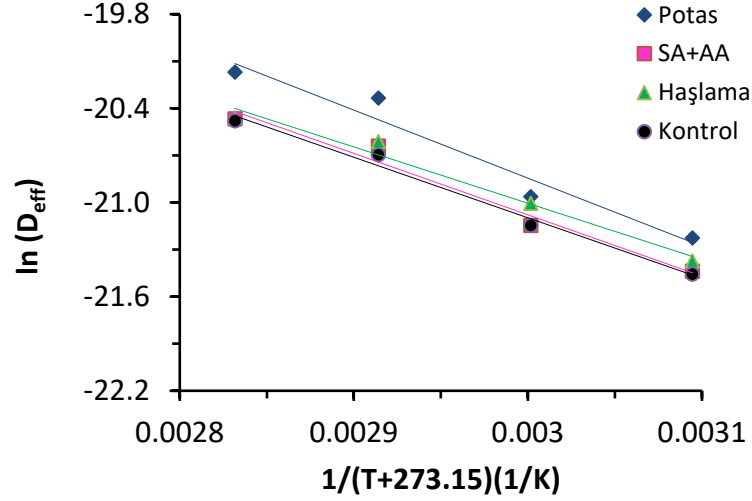


Şekil 5.10 Kabin kurutucuda kurutulan elma dilimlerinin efektif difüzyon katsayısının kurutma sıcaklığı ile değişimi

Kabin kurutucu içerisinde kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayısı değerlerinin kontrol grubu örnekler için $4,804 \times 10^{-10}$ ile $1,275 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında, potasyum karbonat ile ön muamele edilen örnekler için $6,046 \times 10^{-10}$ ile $1,739 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında, haşlama yöntemi ile ön muamele edilen örnekler için $5,218 \times 10^{-10}$ ile $1,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında ve son olarak sitrik asit ve askorbik asit karışımı ile ön muamele edilen örneklerin efektif difüzyon katsayılarının $4,886 \times 10^{-10}$ ile $1,292 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değiştiği yapılan çalışma ile ortaya çıkmıştır. Sıcaklık artışıyla birlikte efektif difüzyon katsayıları artmıştır. Şekil 5.10'da görüldüğü üzere en yüksek difüzyon katsayısı potas çözeltisi ile ön işleme tutulan ve kurutulan elmalarda gözlemlenmiştir. Ayrıca bunun yanı sıra değişik sıcaklıklarda kurutulan örneklerin difüzyon katsayıları en yüksek değerlere potas çözeltisi ile muamele edilen örneklerde ulaşmıştır.

5.1.5 Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Elma dilimlerinin kabin kurutucuda istenilen seviyeye kadar kurutulması için gereken aktivasyon enerjisi hesabında (4.14) denklemi kullanılmıştır. Kabin kurutucuda her bir deneysel çalışma için aktivasyon enerjisi hesabında kullanılacak $\ln(D_{\text{eff}})$ ile $1/(T+273.15)$ arasında çizilen eğriler Şekil 5.11'de verilmiştir. Kurutma işlemi için gerekli olan aktivasyon enerjisi değerleri, eğrilerin eğimlerinden yararlanarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.11 Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi

Aşağıdaki verilen denklemlerden (4.19, 4.20, 4.21 ve 4.22) yararlanarak ön muamele uygulanarak kurutulan ve ön muamele yöntemlerinden herhangi biri uygulanmadan kontrol grubu olarak kurutulan örneklerin difüzyon katsayılarının sıcaklıktan nasıl etkilendiği görülmektedir.

Potas

$$D_{eff} = 3.981 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{4337.3}{(T + 273.15)}\right) \quad R = 0,9537 \quad (4.19)$$

SA+AA

$$D_{eff} = 3.095 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{3911.9}{(T + 273.15)}\right) \quad R = 0,9728 \quad (4.20)$$

Haşlama

$$D_{eff} = 3.293 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{3587.8}{(T + 273.15)}\right) \quad R = 0,9767 \quad (4.21)$$

Kontrol

$$D_{eff} = 3.027 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{3860.2}{(T + 273.15)}\right) \quad R = 0,9865 \quad (4.22)$$

Netice olarak potasyum karbonat, sitrik asit ve askorbik asit karışımı, haşlama yöntemi ile ön muamele edilen ve kontrol grubu elma dilimi örneklerinin kabin kurutucuda kurutulması sonrasında aktivasyon enerjisi değerlerinin sırasıyla 36,1, 32,5, 29,8 ve 32,1 kJ/mol olduğu bulunmuştur. Çizelge 5.6'da, elma dilimleri için hesaplanan bu

aktivasyon enerjisi değerlerinin daha önce yapılan ve literatürde yer alan aktivasyon enerji değerleri ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

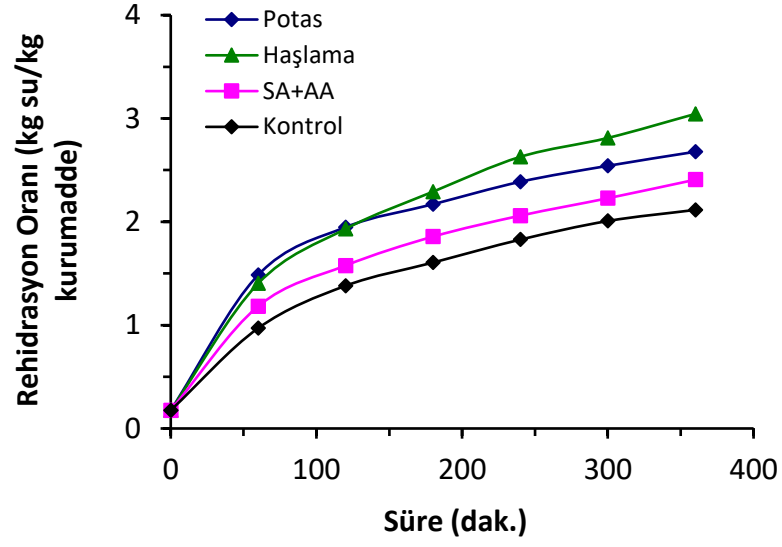
Çizelge 5.6 Literatürde kurutma çalışmasında kullanılan elma ve elma posalarının aktivasyon enerjileri

Kurutulan rnek	Kurutucu tipi	Kurutucu gücü (W)	Kurutucu sıcaklığı (°C)	Aktivasyon enerjisi (E _a)	Kaynaklar
Elma	Kabin kurutucu	-	50-70	19,8 (kJ/mol)	[12]
Elma	Kabin kurutucu	-	90-150	94,62 (kJ/mol)	[25]
Elma Posası	Kabin kurutucu	-	50-80	29,65 (kJ/mol)	[11]
Elma (Gala)	Mikrodalga bantlı kurutucu	1050-2100	-	17,9-156,65 (W/g)	[9]

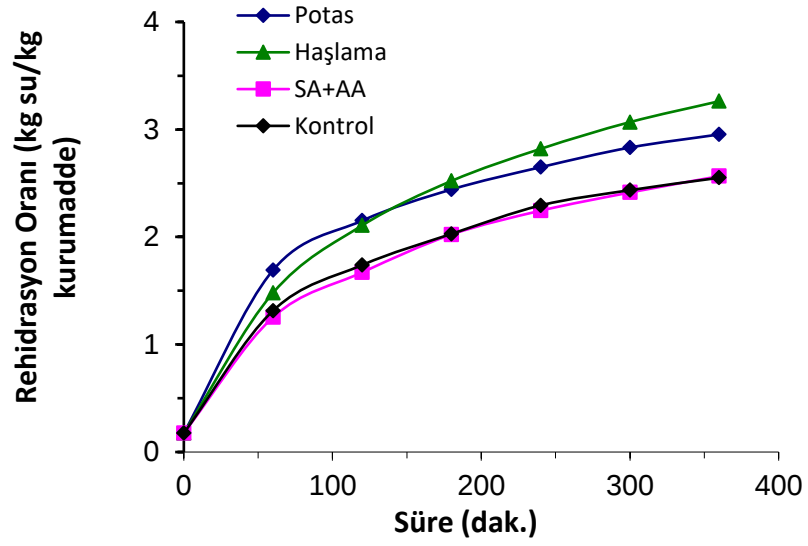
Kara ve Doymaz [11] tarafından yapılan bir çalışmada, kabin kurutucuda gerçekleştirilen elma posasının kurutulması işleminde elde edilen aktivasyon enerjisi değerinin bu çalışmadaki elma dilimlerinin kurutulması sırasında hesaplanan aktivasyon enerjisi değerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun çalışılan sıcaklık aralığının, kullanılan kurutucu tipinin ve kurutulan meyve türünün aynı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.1.6 Rehidrasyon Analizlerinin Yapılması

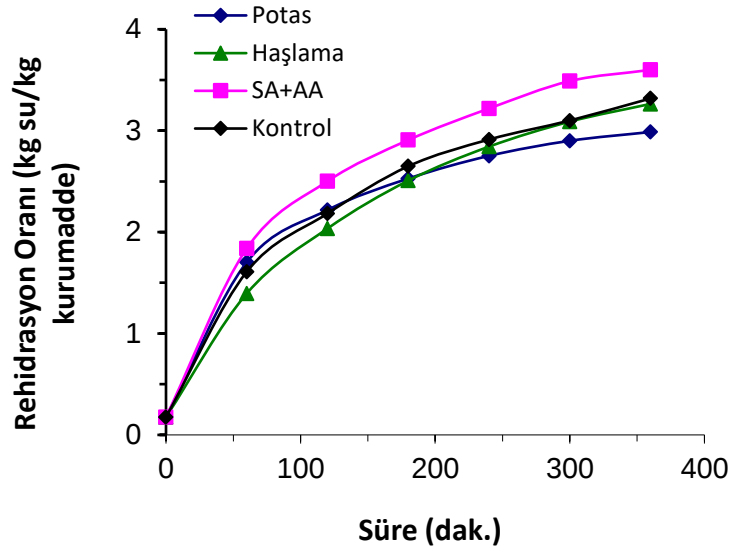
Hassas terazi yardımıyla $3\pm0,2$ gram olarak tartılan rnekler 20°C sıcaklıktaki saf su içerisinde 6 saat boyunca bekletilerek rehidrasyon deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında örneklerin belirli zaman dilimlerinde ağırlıkları kaydedilmiştir. Bu verilerden yararlanarak (4.7) denklemi kullanılarak rehidrasyon oranları hesaplanmıştır. Kurutulan örneklerin rehidrasyon oranlarının rehidrasyon süresi ile değişimi şekil 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15’de verilmiştir.



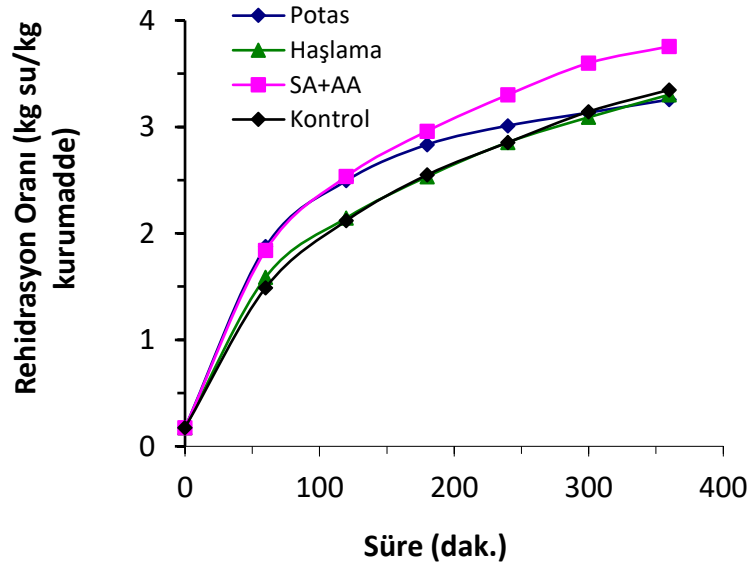
Şekil 5.12 50°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi



Şekil 5.13 60°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi



Şekil 5.14 70°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi



Şekil 5.15 80°C sıcaklıkta kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi

Şekil 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15’de rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimini gösteren grafiklerden kurutma sıcaklığının ve uygulanan ön işlemin rehidrasyon oranı üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir.

Haşlama yöntemiyle ön muamele edilen elma dilimleri 50 ve 60°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Bu esnada yapısında bulunan gözenekler şok etkisiyle kademeli bir şekilde açıldığından rehidrasyon yeteneği askorbik asit ve sitrik asit karışımı ve potasyum karbonat çözeltisi ile ön muamele yöntemine göre daha iyi olduğu Şekil 5.12

ve Şekil 5.13'te görülmektedir. Wang vd. [76] elma dilimlerinin kurutulmasında dondurarak kurutma yöntemini ön işlem uygulamadan ve haşlama ön işlemi uygulayarak gerçekleştirmiştir. Neticede haşlama ön işlemi uygulanarak kurutulan örneklerin rehidrasyon oranlarının ön işlem uygulanmayanlardan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 60°C sıcaklığın üzerinde gözeneklerin bulunduğu hücrelerin esnekliği sıcaklık etkisiyle azaldığından ve yüksek sıcaklık dokuda sertleşmeye sebep olduğundan rehidrasyon yeteneğinin azaldığı Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlar Sahoo vd. [77] yaptığı çalışmada da gözlemlenmiştir. Kurutulan örneklerin rehidrasyon oranları kontrol grubu için 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıkta 2,64, 3,01, 3,67 ve 3,69 olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık arttıkça rehidrasyon oranının arttığı gözlemlenmiştir. Contreas vd. [78] elma kurutarak yaptığı çalışmada 30 ve 50°C sıcaklıkta konvektif kurutma işlemini kullanmış ve rehidrasyon oranlarını sırasıyla 4,11 ve 4,32 olarak hesaplamıştır. Yaptığımız çalışmada sıcaklık artışı ile rehidrasyon oranının arttığı ön işlem uygulanan elma örneklerinde de gözlemlenmiştir. Abano ve Sam-Amoah [79] Gros Michel tipi muz dilimlerini kuruttuğu çalışmada, askorbik asit ve sitrik asit ile ön muamele edilen örneklerin 60°C sıcaklığın üzerinde kurutulduğunda diğer ön işlem yöntemleri ile ön muamele edilen örneklere göre rehidrasyon yeteneğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

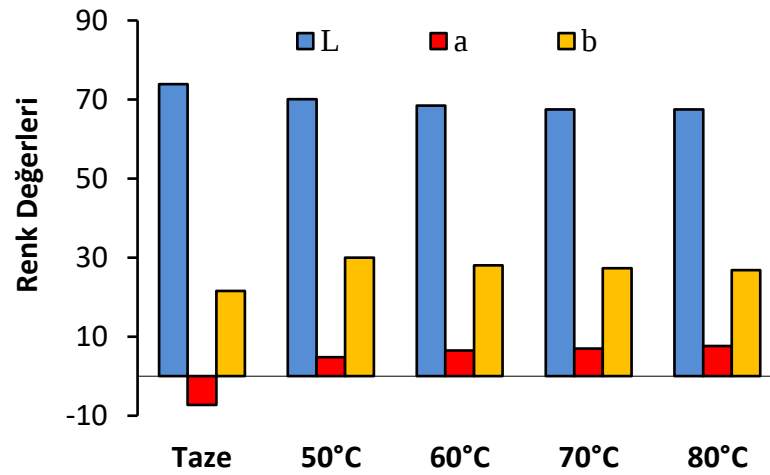
5.1.7 Renk Analizlerinin Yapılması

Taze elma örneklerinin ortalama renk değerleri L^* , a^* ve b^* sırasıyla 73,93, -7,25 ve 21,56 olarak ölçüldü. L^* değeri örneğin parlaklığını gösterirken, a^* değeri kırmızılığı ve b^* değeri ise sarılık değerini göstermektedir. Farklı sıcaklıklarda kurutulan örneklerin renk parametreleri olan L^* , a^* ve b^* değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

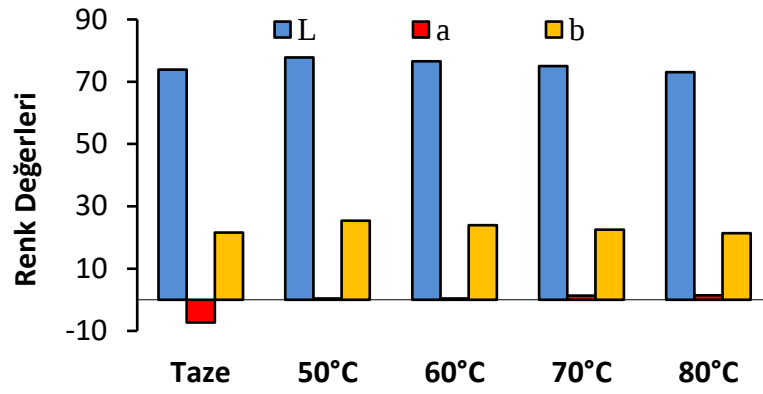
Çizelge 5.7 Taze elma ile birlikte farklı sıcaklık ve ön işlem uygulanarak kurutululan elma dilimlerinin renk analizi sonrası L^* , a^* ve b^* değerleri

Renk Değerleri	T (°C)	Potas	Haşlama	SA+AA	Kontrol	Taze Elma
L^*	50	70,08	71,50	77,84	70,43	73,93
	60	68,46	70,83	76,57	69,64	
	70	67,49	70,64	74,99	68,25	
	80	67,45	69,54	73,07	67,80	
a^*	50	4,81	3,79	0,36	3,70	-7,25
	60	6,48	5,43	0,43	5,94	
	70	6,96	5,81	1,28	6,05	
	80	7,66	5,85	1,45	8,20	
b^*	50	30,00	28,89	25,35	28,89	21,56
	60	28,01	25,20	23,96	28,00	
	70	27,32	24,51	22,47	27,32	
	80	26,81	22,57	21,40	25,89	

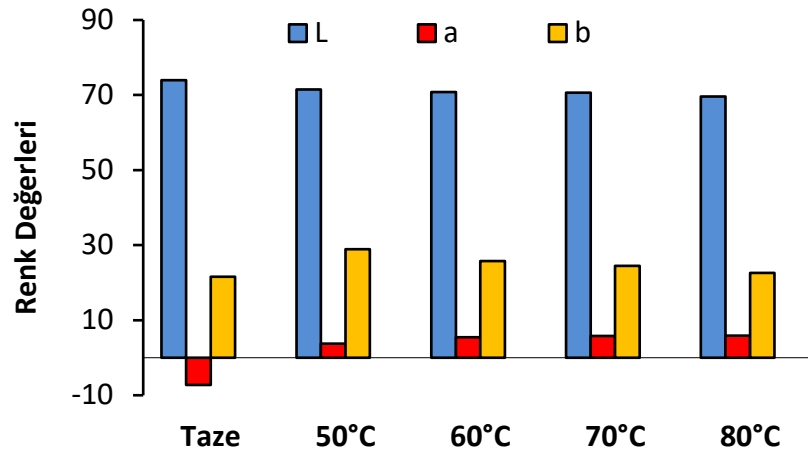
Çizelge 5.7’de verilen L^* , a^* ve b^* değerleri grafik şeklinde Şekil 5.16, 5.17, 5.18 ve 5.19’da ayrıntılı biçimde verilmiştir.



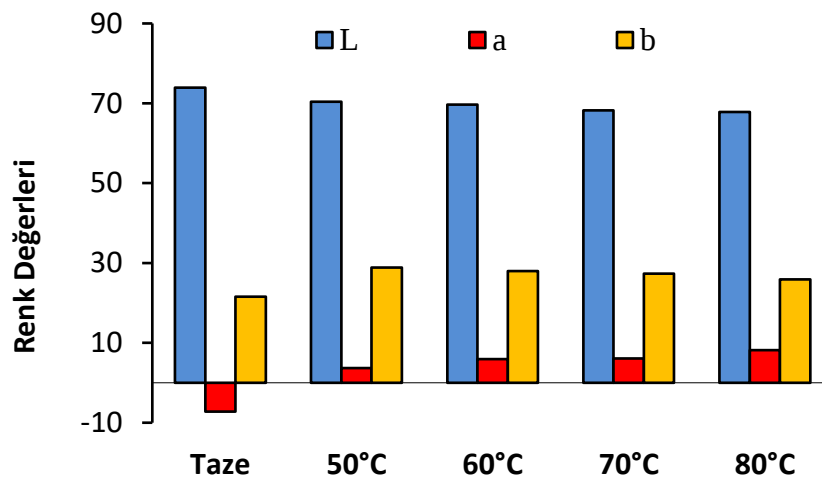
Şekil 5.16 Potas çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi



Şekil 5.17 SA+AA çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi



Şekil 5.18 Haşlama işlemi ile muamele edilen örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi



Şekil 5.19 Kontrol grubu örneklerin farklı sıcaklıklarda renk değişimi

Renk analizleri sonucunda L* (parlaklık), a* (kırmızılık) ve b* (sarılık) değerlerinin taze elmaya en yakın değerler verdiği durumun sitrik asit ve askorbik asit çözeltisi ile ön

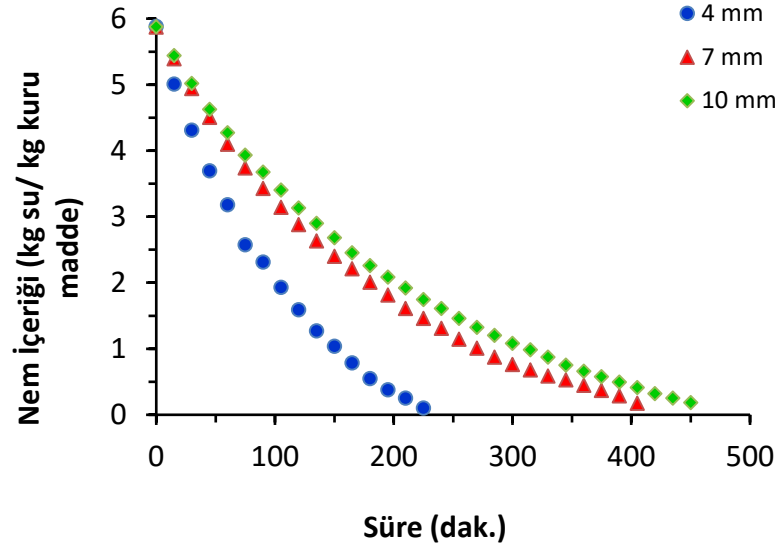
işleme sokulan örneklerin 50°C sıcaklıkta kabin kurutucuda kurutulmasıyla elde edildiği Şekil 5.17’de görülmektedir. Sıcaklık arttıkça örnekte termal bozulma meydana geldiğinden örneğin yüzeyinde sarı renk değerleri kırmızı renk değerlerine dönmeye başlar. Bu durumda ürünün parlaklığı da azaldığından L* değerinde azalma meydana gelir. Bu durumla birlikte a* değerinde artış meydana gelirken b* değerinde artan sıcaklıkla birlikte azalma meydana gelir. Notin vd. [80] yaptığı elma kurutma çalışmasında sitrik asit ve askorbik asit ile ön muamele edilen örneklerin kurutma işlemi sonrası taze elmanın renk değerlerine en yakın değeri verdiğini göstermiştir.

Aynı zamanda Tunde-Akintunde vd. [81] yaptığı dolmalık biberi kurutma çalışmasında artan sıcaklıkla birlikte L* (parlaklık) değerinin azaldığı üründe kararma meydana gelerek sarı rengin kırmızıya döndüğü a* (kırmızılık) değerinin arttığı ve b* (sarılık) değerinin azaldığı görülmüştür.

Bu çalışma, sitrik asit ve askorbik asit karışımı ile ön muamele ve haşlama işlemi ile ön muamele yöntemlerinin kontrol grubu örneklerle göre kurutma sonrası ürünün rengini muhafaza etmesi için kullanılabileceğini göstermiştir [82].

5.2 Dilim Kalınlığının Kuruma Süresine Etkisi

Şekil 5.20’de görüldüğü üzere 4, 7 ve 10 mm dilim kalınlıklarında kesilerek konvektif kurutma yöntemi ile 60°C sıcaklıkta kabin kurutucu içerisinde kurutulmaya bırakılan ön işlem görmemiş elma dilimlerinin kuruma süreleri sırasıyla 225, 420 ve 450 dakika olarak bulunmuştur.



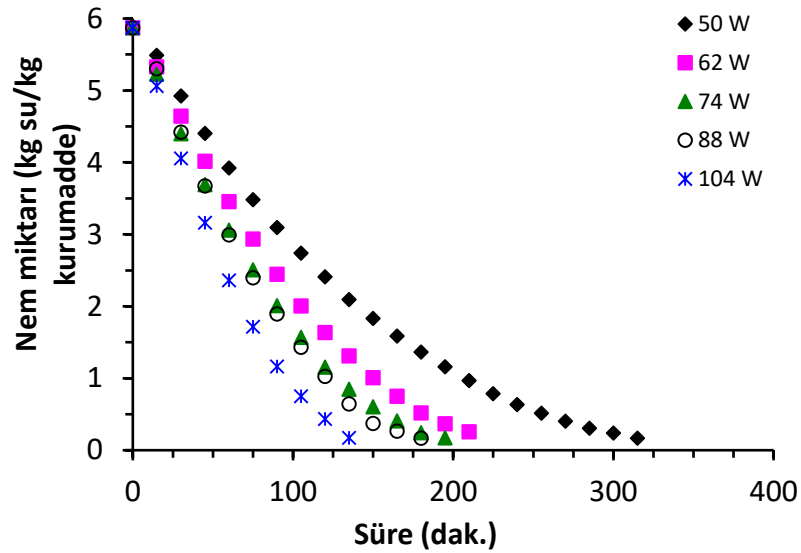
Şekil 5.20 60°C sıcaklıkta ön işlem uygulanmadan kurutulan farklı dilim kalınlıklarındaki elma dilimlerinin kuruma süresi

Dilim kalınlığı arttıkça kuruma süresinde de gözle görülebilen bir fark olduğu açıkça gözlemlenmiştir. Dilim kalınlığının artmasıyla birlikte elma dilimleri içerisindeki nemin buharlaşması için elmanın yüzeyine kadar alacağı yol arttığından dilim kalınlığının artmasıyla birlikte kuruma süresi de artmıştır. Meisami-asl vd. [75] yaptığı çalışmada hava hızının 0,5 m/s olduğu tünel kurutucu içerisinde dilim kalınlıkları 2, 4 ve 6 mm olan elma dilimlerini kurutmak için 50°C kurutma sıcaklığında yaptığı çalışmada kuruma sürelerini sırasıyla 220, 400 ve 600 dakika olarak bulmuştur. Dilim kalınlığının artmasıyla birlikte kuruma süresinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu çalışma 60°C sıcaklıkta 4, 7 ve 10 mm dilim kalınlığında elma dilimleri kullanarak yaptığımız çalışma ile paralellik göstermektedir. Sacilik ve Elicin [83], 5 ve 9 mm dilim kalınlığında organik elma dilimlerini 40, 50 ve 60°C sıcaklıkta kurutmuştur. Elma dilimlerinin nem oranı 4,57 kg su/kg kuru madde değerinden 0,12 kg su/kg kuru madde değerine düşene kadar geçen zaman 5 mm dilim kalınlığında hazırlanan elma dilimleri için 40, 50 ve 60°C sıcaklıkta sırasıyla 400, 300 ve 240 dakika olarak bulunmuştur. Bu değer 9 mm kalınlığında elma dilimleri için 640, 560 ve 460 dakika olarak bulunmuştur. Yapılan bu çalışmadan dilim kalınlığının artışıyla birlikte kuruma süresinin uzadığı görülmektedir.

5.3 İnfrared Kurutma

5.3.1 Nem İçeriğinin Kurutma Süresine Göre Değişimi

Dilim kalınlığı 7 mm olarak kesilen ve ön işlem uygulanmayan elma dilimleri infrared kurutucu içerisinde 50, 62, 74, 88 ve 104 W infrared seviyesinde kurumaya bırakılmıştır. Şekil 5.21'den anlaşılabacağı gibi infrared seviyesinin artışı ile birlikte kuruma süresi azalmaktadır. Bunun sebebi infrared gücü artışıyla birlikte kurutma sıcaklığı artmakta ve bunun sonucu olarak kurutma hızı artmaktadır. İnfrared seviyesinin artışı ile gıda içerisinde daha yüksek sıcaklığa ulaşıldığından su daha hızlı bir şekilde gıdadan uzaklaşmakta ve kuruma süresi azalmaktadır. Enerji kaynağının güç seviyesindeki artış yüzey sıcaklığını artırmakta ve gıdanın yüzeyi ile diğer kısımlar arasında sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu durum ısının gıda içerisinde kondüksüyon yoluyla iletilmesine sebep olmakta ve sıcaklık farkı azalana kadar ısı transferine devam edilmektedir. Nem transferinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olan bu durum kuruma süresini olabildiğince azaltmaktadır. İnfrared kurutucuda kurutma işleminde kuruma süresi 104 W seviyesinde 135 dakika iken 50 W seviyesinde 315 dakika olarak bulunmuştur. Kuruma süresinin kabin kurutucuya kıyasla infrared kurutucuda az olması enerjinin minimum kayıpla doğrudan örneğe elektromanyetik dalgalar yardımıyla verilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sayede enerji ortamı ısıtmadan doğrudan kurutulacak örneğe aktarılmaktadır. Netice olarak enerji kayıpları kabin kurutucuya göre daha az olduğundan kuruma süresi kısalmaktadır [43].

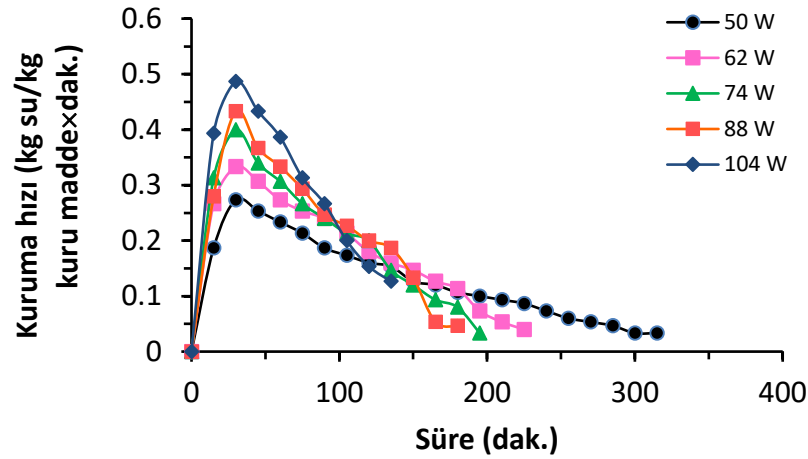


Şekil 5.21 Elma dilimlerinin infrared kurutucu ile kurutulurken nem içeriğinin kuruma süresine göre değişimi

Nunes vd. [84] gerçekleştirdiği kurutma işlemlerinde 5 mm kalınlığında elma dilimleri infrared yoğunluğunun 0,22, 0,31 ve 0,49 W/cm² olduğu infrared kurutucu içerisine yerleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde en kısa kuruma süresi 0,49 W/cm² infrared yoğunluğunda 1,13 saat olarak bulmuştur. Yine aynı çalışmada 5 mm dilim kalınlığında elma dilimlerinin kabin kurutucu içerisinde 55-75°C sıcaklıklar arasında kurutulması için geçen sürenin 0,5-5 m/s arasında değişen hava hızlarında 10-60 saat arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar yaptığımız çalışma ile uyum içerisindedir.

5.3.2 Kuruma Hızının Kuruma Süresi ile Değişimi

Şekil 5.22'den anlaşılabacağı üzere artan infrared seviyesi ile kuruma hızı artmış ve kuruma süresi kısalmıştır. Yüksek infrared radyasyonu ile örneklerin yüzey sıcaklığında meydana gelen artış içeriden dışarıya doğru suyun difüzyonunu artırarak kuruma süresini kısaltmıştır [85].



Şekil 5.22 Elma dilimlerinin kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi

Mitrevski vd. [86] elma dilimlerini 20, 40, 60 ve 80 kPa vakum altında ve 120, 140, 160, 180 ve 200°C sabit sıcaklıkta tutulan infrared kurutucu içerisinde kurutmuştur. Elma dilimlerinin kuruma süresi artan sıcaklığın etkisiyle zamanla düşmüştür. Yüksek sıcaklıkta kuruma hızının fazla olması kuruma süresinin azalmasında etkin rol oynamıştır. Vakum basıncı düşük olduğunda kuruma süresi azalmakla birlikte kuruma süresini etkileyen asıl etmen kurutma sıcaklığı olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuç çalışmamızı desteklemektedir.

5.3.3 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak kuruma süresi ve nem içeriğinin değişim grafiği üzerinde eğri uydurarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Eğriyi uydururken lineer olmayan regresyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Matematiksel modelleme için kullanılan denklemler Çizelge 4.1’de verilmiş olup modelleme sonrasında hesaplanan regresyon katsayısı (R^2), ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerleri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

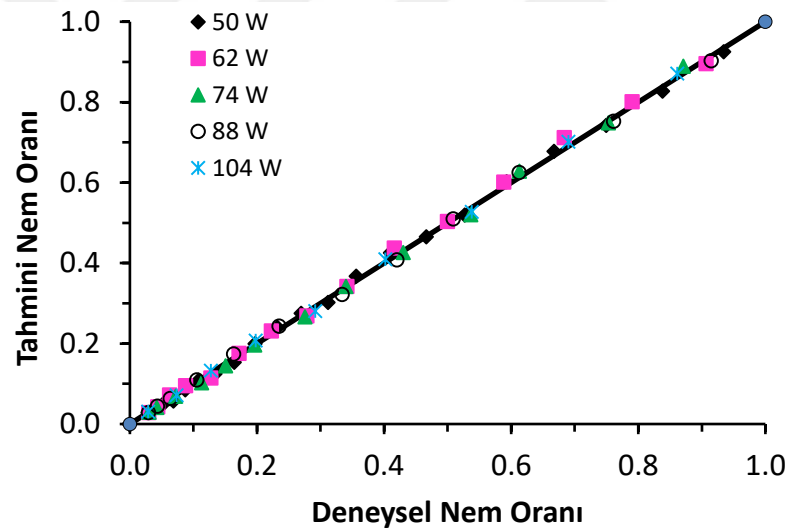
Kullanılan matematiksel denklemlerin uygunluğunun kontrol edilmesinde regresyon katsayısının (R^2) yüksek, ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerlerinin ise olabildiğince küçük olması istenir. Kurutma işlemi sırasında örneklerin kuruma kinetiğini en iyi tanımlayan modelin seçiminde regresyon katsayısı (R^2) ana kriter olarak belirlenmiştir. Ortalama karesel hata değeri (RMSE) deneysel olarak elde edilen sonuçlar ve matematiksel denklemler yarımıyla hesaplanan değerler arasındaki sapmanın bir göstergesidir. Aynı zamanda ki-kare (χ^2) değerinin azalmasıyla deneysel ve hesaplanan değerler arasındaki uyumun arttığı görülmektedir [75].

Çizelge 5.8 İnfrared kurutucu ile ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerin verileri için kullanılan modeller, hesaplanan model sabitleri, R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri

Model	İnfrared Gücü (W)	Model sabitleri				R^2	χ^2	RMSE
		a	b	k	n			
Henderson & Pabis	50	1,021967	-	0,004186	-	0,9753	0,000814	0,115032
	62	1,034562	-	0,007019	-	0,9862	0,000362	0,074289
	74	1,041162	-	0,008654	-	0,9814	0,000423	0,095687
	88	1,072469	-	0,018569	-	0,9730	0,001107	0,162497
	104	1,092871	-	0,006589	-	0,9743	0,001341	0,135478
Page	50	-	-	0,003048	1,116347	0,9964	0,000349	0,063982
	62	-	-	0,004041	1,145698	0,9982	0,000205	0,014116
	74	-	-	0,003861	1,206023	0,9979	0,000319	0,050624
	88	-	-	0,003256	1,268716	0,9961	0,000422	0,069879
	104	-	-	0,003132	1,212879	0,9949	0,000531	0,105833
Midilli & Küçük	50	0,997256	-0,000201	0,005422	0,956112	0,9991	0,000045	0,026852
	62	0,983289	-0,000245	0,005199	0,990548	0,9994	0,000017	0,012895
	74	0,994113	-0,000338	0,005911	1,055691	0,9995	0,000013	0,010168
	88	0,989631	-0,000402	0,005071	1,040459	0,9993	0,000024	0,014881
	104	0,989777	-0,000309	0,006102	1,021170	0,9992	0,000021	0,011364
Wang & Singh	50	-0,004016	0,000003	-	-	0,9952	0,000429	0,085792
	62	-0,005013	0,000017	-	-	0,9965	0,000338	0,068964
	74	-0,007569	0,000032	-	-	0,9980	0,000213	0,031115
	88	-0,008926	0,000029	-	-	0,9949	0,000491	0,102358
	104	-0,009246	0,000021	-	-	0,9932	0,000523	0,108523
Aghbashlo vd,	50	0,004156	-0,000599	-	-	0,9981	0,000081	0,045763
	62	0,006278	-0,000613	-	-	0,9987	0,000069	0,026158
	74	0,004687	-0,000827	-	-	0,9990	0,000056	0,021878
	88	0,007029	-0,001158	-	-	0,9972	0,000097	0,054230
	104	0,008044	-0,001456	-	-	0,9963	0,000106	0,066579

Çizelge 5.8’de görüldüğü üzere 50, 62, 74, 88 ve 104 W infrared güçlerinde kurutulan örneklerin regresyon katsayısı (R^2), ortalama karesel hata (RMSE) ve ki-kare (χ^2) değerlerine bakıldığında Midilli & Küçük modelinin regresyon katsayısının (R^2) tüm infrared güç seviyelerinde en yüksek olduğu ve aynı zamanda ortalama karesel hata değeri (RMSE) ve ki-kare (χ^2) değerinin kullanılan diğer modellere göre daha küçük olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar yardımıyla Midilli & Küçük modelinin elma dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıkladığı anlaşılmıştır.

İnfrared kurutma işleminde farklı infrared güçleri göz önüne alındığında elma kurutma karakteristiğini en iyi tanımlayan modelin Midilli & Küçük tarafından geliştirilen model olduğu Şekil 5.23’de verilen hesaplanmış ve deneysel yollarla elde edilen verilerin kıyaslanması sonucu elde edilen grafikten de anlaşılmaktadır.



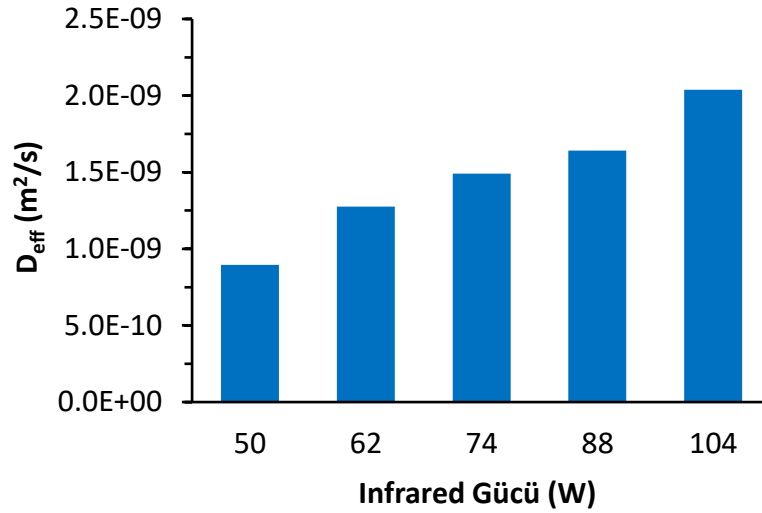
Şekil 5.23 Farklı infrared güç seviyelerinde kurutulan elma dilimlerinin deneysel ve Midilli & Küçük modelinin kullanılmasıyla tahmin edilen nem oranı değerleri

Model sabitleri, lineer olmayan regresyon yöntemi ile hesaplandıktan sonra son halini alan model kullanılarak hesaplanan elma içerisindeki nem oranının zamanla değişimi deneysel veriler ile doğrulanmıştır.

5.3.4 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Kurutma işlemi sırasında ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerin difüzyon katsayısı farklı infrared güç seviyeleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısının

hesaplanması için (4.13) denklemi kullanılmış hesaplanan değerler infrared kurutucu için Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24 Elma dilimlerinin efektif difüzyon katsayısının infrared güç seviyesi ile değişimi

Infrared kurutucu ile ön işlem görmeden kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayısı değerleri 50, 62, 74, 88 ve 104 W gücünde çalıştırılan kurutucu için hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin sırasıyla $8,945 \times 10^{-10}$, $1,275 \times 10^{-9}$, $1,490 \times 10^{-9}$, $1,640 \times 10^{-9}$ ve $2,037 \times 10^{-9}$ m²/s olduğu çalışmalar neticesinde bulunmuştur. Çalışmalar sonucu elde edilen efektif difüzyon katsayılarının literatürde gıdaların kurutulması sırasında elde edilen (10^{-12} ve 10^{-8} m²/s) difüzyon katsayıları arasında olduğu görülmüştür [87].

Çizelge 5.9 Literatürde bulunan bazı elma kurutma işlemi sonrası elde edilen difüzyon katsayıları

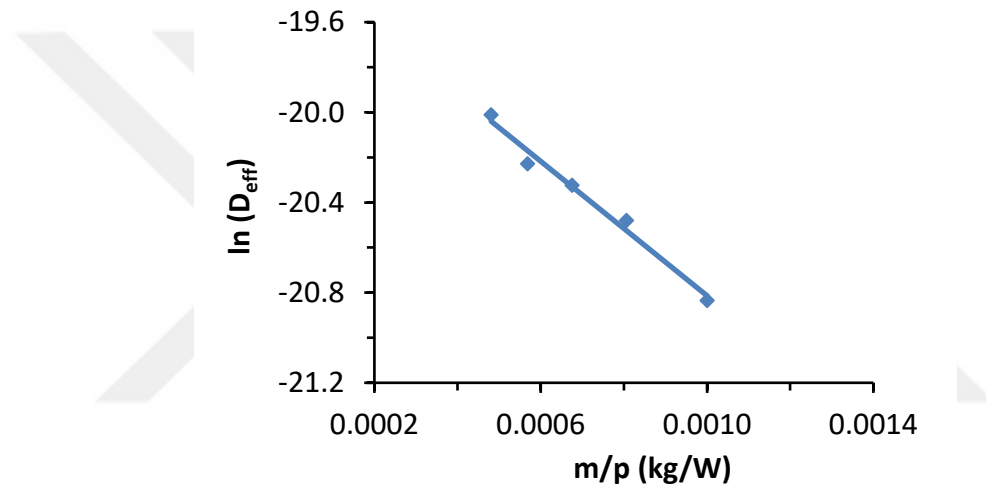
Kurutucu Tipi	Kurutucu Gücü (W)	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Hava Hızı (m/s)	Difüzyon Katsayısı (m²/s)	Kaynaklar
Mikrodalga	1050-2100	-	-	$1,191 \times 10^{-8}$ - $2,754 \times 10^{-7}$	[9]
Kabin	-	50-80	2	$1,73 \times 10^{-10}$ - $4,40 \times 10^{-10}$	[11]
Kabin	-	50-70	1,5	$7,03 \times 10^{-10}$ - $1,08 \times 10^{-9}$	[12]
Tepsi	-	50-80	-	$1,095 \times 10^{-10}$ - $2,283 \times 10^{-10}$	[88]

Çizelge 5.9'da verilen çalışmalarda bulunan difüzyon katsayılarının bu çalışmanın değerlerinden farklı olmasının sebebi deneylerde kullanılan elma çeşidinin farklılığından, kurutma hava hızının farklı olmasından, kullanılan ön işlem yöntemi ve

süresinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda farklılığa sebep olan diğer etkenler arasında kurutma sıcaklığı, infrared güç seviyesi ve kullanılan kurutucu tipi sayılabilir [89].

5.3.5 Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Elma dilimlerinin istenilen seviyede kurutulması için gereken aktivasyon enerjisi hesabında (4.15) denklemi kullanılmıştır. İnfrared kurutucuda her bir deneysel çalışma için aktivasyon enerjisi hesabında kullanılacak $\ln(D_{eff})$ ile m/p arasında çizilen eğri Şekil 5.25'te verilmiştir. Kurutma işlemi için gerekli olan aktivasyon enerjisi eğrinin eğimi üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 5.25 İnfrared kurutucunun güç seviyesinin efektif difüzyon katsayısına etkisi

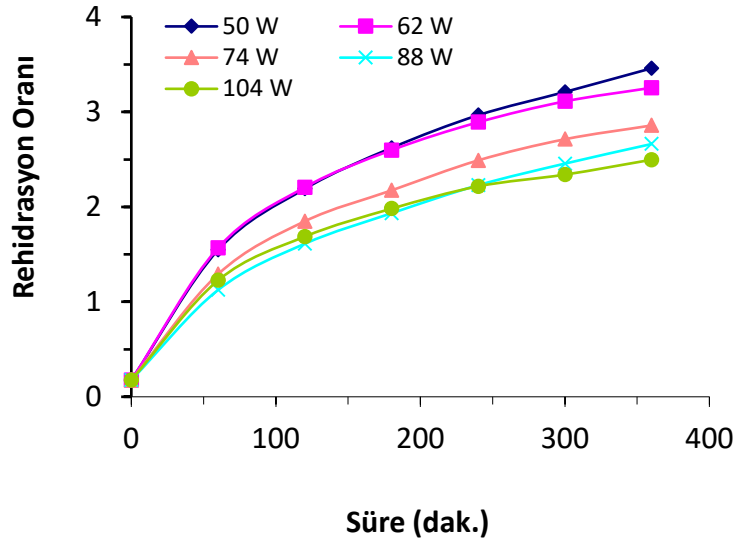
(4.23) denklemi yardımıyla ön muamele yöntemlerinden herhangi biri uygulanmadan kurutulan örneklerin difüzyon katsayılarının infrared gücünden nasıl etkilendiğini görebiliriz.

$$D_{eff} = 4.083 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{1491.2 \times m}{p}\right) \quad R = 0,9821 \quad (4.23)$$

İnfrared kurutucu içerisinde ön işlem uygulanmadan kurutulan elma dilimlerinin aktivasyon enerjisi değeri (4.23) denklemi yardımıyla 1,49 kJ/kg olarak bulunmuştur.

5.3.6 Rehidrasyon Analizlerinin Yapılması

Yapılan çalışma ile 50, 62, 74, 88 ve 104 W gücünde infrared kurutucu içerisinde kurutulan örnekler kurutma işlemi sonrasında hassas terazi yardımıyla $3\pm0,2$ gram gelecek şekilde tartıldıktan sonra 20°C sıcaklıkta sabit tutulan su içerisinde altı 6 saat boyunca bekletilerek rehidrasyon oranları incelenmiş ve (4.7) denklemi kullanılarak bu oranlar hesaplanmıştır. Kurutulan örneklerin rehidrasyon oranlarının rehidrasyon süresi ile değişimi Şekil 5.26’da verilmiştir.



Şekil 5.26 İnfrared kurutucu ile farklı infrared güç seviyelerinde kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimi

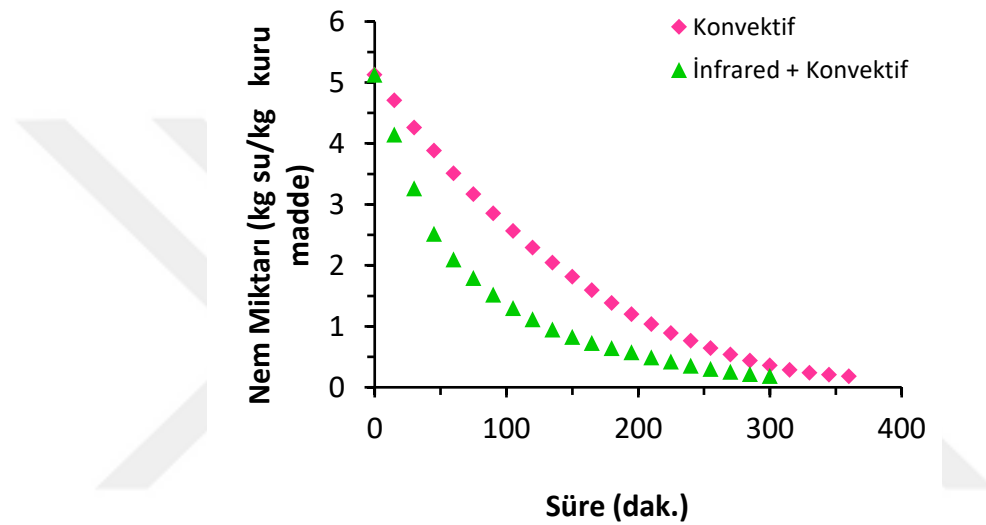
Şekil 5.26’da rehidrasyon oranının rehidrasyon süresi ile değişimini gösteren grafiklerden infrared güç seviyesinin rehidrasyon oranı üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca infrared kurutucuda kurutulan örneklerin rehidrasyon oranının infrared güç seviyesi artışı ile azaldığı görülmektedir. Güç seviyesinin artışı ile yüzey sıcaklığı artmakta olup bu durum dokunun sertleşmesine sebep olmaktadır. Neticede esnekliğini kaybeden dokuda su absorblama hızı yavaşlamaktadır. Aynı zamanda rehidrasyon işleminin başında örneklerin içerisinde bulunan boşluklar ve kapillerler su ile hızlı bir şekilde dolmakta olup rehidrasyon işleminin sonuna doğru itici kuvvet azaldığından süreç yavaşlamaktadır. Beigi [90] yaptığı çalışmada infrared kurutucu yardımıyla pelinotu yaprağı kurutmuş olup yaptığımız çalışma ile benzer sonuçlar elde etmiştir.

Kurutulan örneklerin rehidrasyon yeteneği zamanla azalmıştır. Bunun sebebi, örnek su aldıkça örneğin alabileceği maksimum su seviyesine yaklaşması ve itici kuvvetin

azalmasıdır. Netice olarak kurutulan örneklerin rehidrasyon yeteneği; kurutma sıcaklığı, infrared güç seviyesi, hava hızı, uygulanan ön işlem, rehidrasyon deneylerinin yapıldığı suyun sıcaklığı ve örneğin içeriğine bağlıdır [91].

5.4 Kombine Kurutma (İnfrared + Konvektif)

Şekil 5.27’de sıcak hava kurutucu ve sıcak hava-infrared kombine kurutucu ile kurutulan 7 mm dilim kalınlığında ön işlem uygulanmayan elma dilimlerinin nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi verilmiştir.



Şekil 5.27 Ön işlem uygulanmayan elma dilimlerinin konvektif ve infrared-konvektif kombine kurutma sisteminde nem miktarının kuruma süresi ile değişimi

Sıcak hava kurutucu içerisinde 60°C sıcaklıkta kurutulan örnekler sıcak hava-infrared kombine kurutucu sisteminde 1 saat infrared kurutucu içerisinde 74 W gücünde kurumaya bırakılarak sonrasında 60°C sıcaklıkta hazır bekletilen kabin kurutucu içerisine alınmıştır. Neticede kabin kurutucu içerisinde kurutularak istenilen nem seviyesine çekilen örnekler için kuruma süresi 360 dakika iken bu süre kombine kurutma sisteminde 300 dakika kadardır. Kombine kurutma sistemi ile kuruma süresi yaklaşık %17 oranında azalmıştır. Kuruma süresinin azalmasıyla enerjiden tasarruf edilmesi için bu tarz sistemler kurutma işleminde kullanılabilir. Hebbar (2010), daha önce yaptığı patates ve havuç kurutma deneylerinde infrared-konvektif kombine kurutma sisteminin kuruma süresini sadece sıcak hava kurutma sistemine göre %48 oranında azalttığını gözlemlenmiştir [92].

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bu çalışmada sıcak hava ısıtmalı kabin kurutucu ile infrared kurutucu elma dilimlerini kurutmak için kullanıldı. Bu çalışmanın amacı kurutulacak örnek olarak seçilen elma dilimlerinin kuruma karakteristiğinin kurutma işlemi sırasında sıcaklık, infrared güç kaynağının seviyesi ve ön işlemlerden nasıl etkilendiğini gözlemlemektir. Bu amaçla sıcak hava ile çalıştırılan kabin kurutucuda farklı sıcaklıklarda ve infrared kurutucu içerisinde farklı güçlerde çeşitli ön işlem yöntemleri ile kurutulan elma dilimlerinin bu durumdan nasıl etkilendiği, kuruma hızı ve süresinin nasıl değiştiği incelendi. Bununla birlikte kurutma işlemi süresince efektif difüzyon katsayısı ve kurutma işleminin gerçekleşmesi için gereken aktivasyon enerjisi hesabı yapıldı. Bunların dışında kurutulan örneklerin rehidrasyon oranları incelendi ve renk analizleri yapıldı. Son olarak deneysel yollarla elde edilen veriler ve matematiksel modeller yardımıyla hesaplanan nem oranları kıyaslanıp istatistiki değişkenler ile doğrulanarak elma dilimlerinin kurutulması için en uygun matematiksel model bulundu. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

A) Elma dilimleri için;

I. Kuruma hızlarının incelenmesi sonucunda;

a) Kabin kurutucu içerisinde 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda ve $2\pm0,1$ m/s hava hızında yapılan kurutma işleminde elma dilimlerinin kuruma süreleri analiz edildiğinde kabin kurutucuda kurutma hava sıcaklığının artışı ile kuruma süresinin azaldığı görülmektedir. Kurutma işleminde 60°C sıcaklıktan 70°C sıcaklığa çıkıldığında 10°C sıcaklık artışı ile

kullanılan ön işlem yöntemine göre numunelerin kuruma süresinde %36-46 arası bir azalma meydana gelmiştir. Aynı sıcaklıkta potasyum karbonat ve zeytinyağı ile ön muamele edilen örneklerin kuruma süresinin kontrol grubu örneklerle göre %22 daha az olduğu görülmüştür. Sitrik asit ve askorbik asit karışımı ile ön muamele edilen örneklerde bu durum %8 iken haşlama yöntemi ile ön muamele edilen örneklerde %11 olarak bulunmuştur. İnfrared kurutucu ile ön işleme maruz bırakılmadan kurutulan örneklerin kuruma süresi infrared seviyesi ile ters orantılıdır. İnfrared seviyesi 50 W değerinden 104 W değerine çıkarıldığında kuruma süresi 315 dakikadan 135 dakikaya düşmektedir. En düşük kuruma süresi kabin kurutucu ile 80°C sıcaklıkta potasyum karbonat ve zeytinyağı ile ön muamele edilen örnekler için 165 dakika iken infrared kurutucu için bu değer 104 W infrared seviyesinde 135 dakika olarak bulunmuştur. Buradan anlaşılabileceği üzere infrared kurutucu, meyve ve sebze kurutma işleminde sıcak hava kurutma sistemlerine alternatif olarak kullanılabilir. 1 saat infrared kurutucu içerisinde 74 W infrared gücünde bekletildikten sonra 60°C sıcaklıkta hazır bekletilen kabin kurutucu içerisine konan örneklerin kuruma süresinin sadece kabin kurutucu içerisinde 60°C sıcaklıkta bekletilen örneklerin kuruma süresine göre 60 dakika daha az olduğu gözlemlenmiştir. İnfrared-sıcak hava kurutma sistemine benzer kombine kurutma sistemi kullanılarak zamandan ve enerjiden tasarruf edilebileceği anlaşılmıştır. Aynı zamanda infrared kurutucu, kabin kurutucu ve infrared-sıcak hava kombine kurutucu sistemlerinde gerçekleştirilen kurutma işlemlerinin tamamında azalan hız periyodu görülmüş olup sabit hız periyoduna rastlanmamıştır.

b) Kurutma işleminde elma dilimleri ön işleme tabi tutulmadan kontrol grubu olarak, sitrik asit ve askorbik asit karışımından oluşan çözelti, potasyum karbonat ve zeytinyağı çözeltisi ve son olarak haşlama ön işlemi ile muamele edilerek kurutulmaya bırakılmışlardır. Ön işlem uygulanarak kurutulan örneklerin kuruma sürelerinin ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerle kıyasla daha kısa olduğu deneyler sonucunda anlaşılmıştır. 70°C sıcaklıkta kurutulan elma dilimlerinin kuruma süreleri dikkate alındığında kontrol grubu örneklerin kuruma süresi 270 dakika iken bu sürenin potasyum karbonat ve zeytinyağı çözeltisi ile ön muamele işleminden sonra kurumaya bırakılan örneklerde 180 dakika olduğu görülmüştür. Bu durum sitrik asit ve askorbik asit karışımından oluşan çözelti ile muamele işleminden sonra kurumaya bırakılan

örneklerde 255 dakika ve son olarak haşlama ön işlemi ile ön muamele edilen örneklerde 240 dakika olarak gözlemlenmiştir. Örneklerin kuruma süresindeki azalma enerji tasarrufunu da beraberinde getirmektedir.

II. Kuruma kinetiğinin incelenmesi sonucunda;

Laboratuvar ortamında yapılan kurutma işleminde elma dilimlerinin herhangi bir anda nem içeriğinin hesaplanmasında kullanmak amacıyla Aghbashlo, Midilli & Küçük, Page, Wang & Singh ve Henderson & Pabis matematiksel modelleri kullanılmıştır. Kuruma kinetiğini en iyi açıklayan model sabitleri çoklu regresyon analizi yapılarak hesaplanmıştır. Yapılan istatistiksel analiz sonucu hesaplanan regresyon katsayısı (R^2), ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerleri dikkate alınarak elma dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıklayan model seçilmiştir. Regresyon katsayısı 1 değerine en yakın, ki-kare (χ^2) ve ortalama karesel hata (RMSE) değerleri en düşük olan Midilli & Küçük modelinin elma dilimlerinin kuruma kinetiğini en iyi açıklayan model olduğu görülmüştür.

III. Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisinin incelenmesi sonucunda;

Haşlama ön işlemi ile ön muamele edilen, sitrik asit ve askorbik asit karışımından oluşan çözelti içerisinde ve potasyum karbonat ve zeytinyağı çözeltisi içerisinde bir süre bekletildikten sonra kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayılarının kontrol grubu örneklerle göre daha yüksek olduğu çalışmalar sonucu bulunmuştur. Kurutma sıcaklığının etkisi dikkate alındığında kabin kurutucuda sıcaklık artışı ile birlikte ön işlem gören ve görmeyen tüm örneklerde difüzyon katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Kabin kurutucu için kontrol grubu örneklerde difüzyon katsayısı değerleri $4,804 \times 10^{-10}$ ile $1,275 \times 10^{-9}$ ile m^2/s arasında değişirken bu durum sitrik asit ve askorbik asit çözeltisi karışımından oluşan çözelti ile ön muamele edilen örneklerde $4,886 \times 10^{-10}$ ile $1,292 \times 10^{-9} m^2/s$ ile arasında, haşlama ön işlemi ile ön muamele edilen örneklerde $5,218 \times 10^{-10}$ ile $1,3 \times 10^{-9} m^2/s$ arasında ve potasyum karbonat ve zeytinyağı çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerde $6,046 \times 10^{-10}$ ile $1,739 \times 10^{-9} m^2/s$ arasında değiştiği hesaplamalar sonucunda bulunmuştur. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere potasyum karbonat ve zeytinyağı çözeltisi ile yapılan ön muamele işlemi sonrası kurutulan örneklerin daha hızlı kurumuştur. Elma dilimlerinin istenilen seviyede kurutulması için aktivasyon enerjisi değeri kabin kurutucu içerisinde kurutulan kontrol grubu örnekler

için 32,1 kJ/mol olarak hesaplanırken, sitrik asit ve askorbik asit karışımından oluşan çözelti ile ön muamele sonrası kurutulan örneklerin, potasyum karbonat ve zeytinyağı çözeltisi ile ön muamele edilen örneklerin ve haşlama ön işlemi ile ön muamele edilen örneklerin aktivasyon enerjisi değerlerinin sırasıyla 32,5 kJ/mol, 36,1 kJ/mol ve 29,8 kJ/mol olduğu hesaplamalar sonucunda bulunmuştur.

Infrared kurutucu ile ön işleme maruz bırakılmadan kurutulan örneklerin difüzyon katsayılarının artan infrared güç seviyesi ile birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Difüzyon katsayılarının 50, 62, 74, 88 ve 104 W güç seviyelerinde sırasıyla $8,945 \times 10^{-10}$, $1,275 \times 10^{-9}$, $1,490 \times 10^{-9}$, $1,640 \times 10^{-9}$ ve $2,037 \times 10^{-9}$ m²/s olduğu hesaplamalar sonucu bulunmuştur. Hesaplamalar sonucunda infrared kurutucuda elma dilimlerini kurutma işlemi için aktivasyon enerjisi değeri 1,49 kJ/kg olarak bulunmuştur. Çalışmalar sonucunda infrared kurutucu ile 104 W güç seviyesinde kurutulan örnekler için en yüksek efektif difüzyon katsayısı $2,037 \times 10^{-9}$ m²/s olarak hesaplanmıştır.

Kabin kurutucuda potasyum karbonat ve zeytinyağı ile ön muamele edilen ve 80°C sıcaklıkta kurutulan örnekler için bu değer $1,739 \times 10^{-9}$ m²/s olarak hesaplanmıştır. Infrared kurutucu ile hesaplanan efektif difüzyon katsayısı değerinin kabin kurutucu ile hesaplanan efektif difüzyon katsayısı değerinden %15 fazla olması kurumanın daha hızlı olduğunun ve kurutma işleminde kullanılan enerji tüketiminin daha düşük olacağının göstergesidir.

IV. Dilim kalınlığının etkisi incelenmesi sonucunda

4, 7 ve 10 mm dilim kalınlığında örnekler kabin kurutucu içerisinde 60°C sıcaklıkta ön işlem uygulanmadan kurutulduğunda kuruma süreleri 225, 420 ve 450 dakika olarak bulunmuştur. Bu durum dilim kalınlığı ve kuruma süresinin ters orantılı bir şekilde değiştiğini göstermiştir.

V. Kombine kurutma sisteminin etkisi incelendiğinde

7 mm kalınlığında elma dilimleri 74 W gücünde çalıştırılan infrared kurutucu içerisinde 1 saat boyunca ön ısıtmaya bırakıldıktan sonra 60°C sıcaklıkta bekletilen kabin kurutucu içerisine alınarak istenilen düzeyde kurutulmuştur. İstenilen düzeyde kurutma işleminin gerçekleşmesi için sadece 60°C sıcaklıkta kabin kurutucu içerisinde kurutulan elma dilimleri ile kıyaslandığında kuruma süresinde %17 oranında bir düşüş olmuştur.

VI. Rehidrasyon oranlarının değişiminin incelenmesi sonucunda;

Kurutma işlemi sonrası nem almayacak şekilde düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) paketlerde muhafaza edilen kuru elma dilimlerinin 20°C'deki su içerisinde örneklerin 6 saat bekletilmesiyle rehidrasyon deneyleri yapılmıştır. Kurutma işlemi öncesi uygulanan ön işlem yönteminin ve kurutma sıcaklıklarının rehidrasyon oranlarını etkilediği görülmüştür. 50 ve 60°C sıcaklıklarda haşlama ön işlemi ile ön muamele edilen örneklerin diğer ön işlem yöntemleri ile muamale edilen örneklere göre daha yüksek rehidrasyon oranına sahip olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kurutulan üründe dokuların sertleşip esnekliğini kaybetmesine neden olur ve bu durum nem transferini olumsuz etkilediğinden rehidrasyon oranı düşmüştür. İnfrared kurutucu ile kurutulan ön muamele görmemiş elma dilimlerinin rehidrasyon oranı infrared seviyesi ile ters orantılı olarak değişmiştir. Artan infrared seviyesi ile birlikte yüzey sıcaklığı artmakta ve yüzeyde sıcaklık etkisiyle sertleşme meydana gelmektedir. Bu durum örneklerin iki yönlü nem transferini engellediğinden infrared seviyesi artışı ile birlikte rehidrasyon oranında düşüş yaşanmıştır.

VII. Renk Analizi

Renk analizi sonuçlarına göre haşlama ve SA+AA çözeltisi ile ön işlem uygulanan örneklerin L*, a* ve b* değerleri potas ve kontrol grubu örneklere kıyasla taze elmanın değerlerine daha yakın bulunmuştur. Sıcaklığın artmasıyla birlikte örneklerin yapısında meydana gelen termal bozulma ile kurutulan örneklerin parlaklık (L*) ve sarılık (b*) değerinde azalma meydana gelirken kırmızılık (a*) değerinde artış gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kırmacı, V., Menlik, T. ve Usta, H., (2013). "Using of Empiric and Semi-Empiric Models in The Modelling of An Experimental Study on Freeze Drying Behaviour of Apples", Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 1: 22-45.
- [2] Gürlek, G., Akdemir, Ö. ve Güngör, A., (2015). "Usage of Heat Pump Dryer in Food Drying Process and Apple Drying Application", Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 21 (9): 398-403.
- [3] Baysal, T., Özbalt, N., Gökbult, S. ve Çapar, B., (2015). "Investigation of Effects of Various Drying Methods on The Quality Characteristics of Apple Slices and Energy Efficiency", Journal of Thermal Science and Technology, 35 (1): 135-144.
- [4] Ceylan, İ., Aktaş, M. ve Doğan, H., (2006). "Apple Drying at Kiln by Solar Energy", Journal of Polytechnic, 9 (4): 289-294.
- [5] Heybeli, N. ve Ertekin, C., (2007). "Elma Dilimlerinin İnce Tabaka Halinde Kuruma Karakteristiği", Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 3 (3): 179-187.
- [6] Eliçin, A. K. ve Saçılık, K., (2005). "An Experimental Study for Solar Tunnel Drying of Apple", Tarım Bilimleri Dergisi, 11 (2): 207-211.
- [7] Yılmaz, G. M., (2015). The Effect of Ultrasound Pretreatment on Drying Characteristics of Apple Slices, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Özsoy, E., (2015). Mikrodalga Bantlı Kurutucuda Elma (Gala) Dilimlerinin Kuruma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [9] Çelen, S. Haksever, A. ve Moralar, A., (2017). "The Effects of Microwave Energy to the Drying of Apple (Gala) Slices", Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(1): 228-236.
- [10] Ceylan, İ., Aktaş, M. ve Doğan, H., (2005). "Apple Drying in Heat Pump Dryer", Journal of Thermal Science and Technology, 25 (2): 9-14.
- [11] Kara, C. ve Doymaz, İ., (2015). "Effective Moisture Diffusivity Determination and Mathematical Modelling of Drying Curves of Apple Pomace", Heat and Mass Transfer, 51: 983-989.

- [12] Beigi, M., (2016). "Hot Air Drying of Apple Slices: Dehydration Characteristics and Quality Assessment", *Heat and Mass Transfer*, 52: 1435-1442.
- [13] Beigi, M., (2016). "Influence of Drying Air Parameters on Mass Transfer Characteristics of Apple Slices", *Heat Mass Transfer*, 52: 2213-2221.
- [14] Nadian, M., Rafiee, S. ve Golzarian, M. R., (2016). "Real-Time Monitoring of Color Variations of Apple Slices and Effects of Pre-Treatment and Drying Air Temperature", *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10: 493-506.
- [15] Heras-Ramirez, M. E., Quintero-Ramos, A., Camacho-Davilla, A. A., Barnard, J., Talamas-Abdud, R., Torres-Munoz, J. V. ve Salas-Munoz, E., (2012). "Effect of Blanching and Drying Temperature on Polyphenolic Compound Stability and Antioxidant Capacity of Apple Pomace", *Food and Bioprocess Technology*, 5: 2201-2210.
- [16] Rodriguez, O., Eim, V. S., Simal, S. Femenia, A. ve Rossello, C., (2013). "Validation of a Diffusion Model Using Moisture Profiles Measured by Means of TD-NMR in Apples (*Malus domestica*)", *Food and Bioprocess Technology*, 6: 542-552.
- [17] Rodrigues, O., Llabres, P. J., Simal, S. Femenia, A. ve Rossello, C., (2015). "Intensification of Predrying Treatments by Means of Ultrasonic Assistance: Effects on Water Mobility, PPO Activity, Microstructure, and Drying Kinetics of Apple", *Food and Bioprocess Technology*, 8: 503-515.
- [18] Joshi, A. P. K., Rupasinghe, H. P. V. ve Khanizadeh, S., (2009). "Impact of Drying Process on Bioactive Phenolics, Vitamin C, and Antioxidant Capacity of Red-Fleshed Apple Slices", *Journal of Food Processing and Preservation*, 453-457.
- [19] Assis, F. R., Morais, R. M. S. C. ve Morais, A. M. M. B., (2017). "Osmotic Dehydration with Sorbitol Combined with Hot Air Convective Drying of Apple Cubes", *Journal of Food Sciences and Technology*, 54 (10): 3152-3160.
- [20] El-Mesery, H. Ve Mwithiga, G., (2015)., "Performance of a Convective, Infrared, and Combined Infrared-Convective Heated Conveyor-Belt Dryer", *Journal of Food Science and Technology*, 52 (5): 2721-2730.
- [21] Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S., Carcel, J. A. ve Garcia-Perez, J. V., (2015). "Ultrasound-Assisted Air-Drying of Apple (*Malus domestica* L.) and Its Effects on the Vitamin of the Dried Product", *Food and Bioprocess Technology*, 8: 1503-1511.
- [22] Seiiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., Hamdami, N., Talati, F. ve Moghaddam, M., (2010). "Convective Drying of Apple: Mathematical Modelling and Determination of Some Quality Parameters", *International Journal of Agriculture and Biology*, 12 (2): 171-178.
- [23] Grdzlishvili, G., Hoffman, P. ve Penicka, M., (2012). "Infrared Drying of Food Products", *International Congress of Chemical and Process Engineering*, 20, 1-12.

- [24] Antal, T., (2015). "Comparative Study of Three Drying Methods: Freeze, Hot air-assisted Freeze and Infrared-assisted Freeze Modes", *Agronomy Research* 13 (4), 863–878.
- [25] Samadi, S. H. ve Loghmanieh, I., (2013). "Evaluation of Energy Aspects of Apple Drying in the Hot-Air and Infrared Dryers", *Energy Research Journal*, 4 (1): 30-38.
- [26] Nowak, D. ve Lewicki, P. P., (2005). "Quality of Infrared Dried Apple Slices", *Drying Technology*, 23 (4): 831-846.
- [27] Hazervazifeh, A., Nikbakht, A. M., ve Moghaddam, P. A., (2016). "Novel Hybridized Drying Methods for Processing of Apple Fruit: Energy Conservation Approach", *Energy*, 103: 679-687.
- [28] Food and Agricultural Organization, Statistics Division, www.fao.org/faostat/en/#data/QC, 9 Ocak 2019.
- [29] T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü, (2017). *Bügem Faaliyetleri*, Ankara.
- [30] Food and Agricultural Organization, Chapter 13: Tree Fruit: Apple, Pear, Peach, Plum, Apricot And Plums, <http://www.fao.org/docrep/005/y2515e/y2515e15.htm>, 16 Ekim 2018.
- [31] Henriquez C., Cordova, A., Almonacid, S. ve Saavedra, J., (2014). "Kinetic Modeling of Phenolic Compound Degradation during Drum-drying of Apple Peel By-products", *Journal of Food Engineering*, 143: 146-163.
- [32] Martynenko, A. ve Zheng, W., (2016). "Electrohydrodynamic Drying of Apple Slices: Energy and Quality Aspects", *Journal of Food Engineering*, 168: 215-222.
- [33] Francini A., Romeo, S., Cifelli, M., Gori, D., Domenici, V. ve Sebastiani, L., (2017). "¹H NMR and PCA-based Analysis Revealed Variety Dependent Changes in Phenolic Contents of Apple Fruit after Drying", *Food Chemistry*, 221: 1206-1213.
- [34] Santacatalina, J. V., Contreras, M., Simal, S., Carcel, J. A. ve Garcia-Perez, J. V., (2016). "Impact of Applied Ultrasonic Power on the Low Temperature Drying of Apple", *Ultrasonic Sonochemistry*, 28: 100-109.
- [35] Schulze, B., Hubbermann, E. M. ve Schwarz, K., (2014). "Stability of Quercetin Derivatives in Vacuum Impregnated Apple Slices after Drying (Microwave Vacuum Drying, Air Drying, Freeze Drying) and Storage", *LWT-Food Science and Technology*, 57: 426-433.
- [36] Bondonno, N. P., Bondonno, C. P., Ward, N. C., Hodgson, J. M. ve Croft, K. D., (2017). "Review: The Cardiovascular Health Benefits of Apples: Whole fruit vs. Isolated Compounds", *Trends in Food Science & Technology*, xxx: 1-14.
- [37] Loha, C., Das, R., Choudhury, B. ve Chatterjee, P. K., (2012). "Evaluation of Air Drying Characteristics of Sliced Ginger (*Zingiber officinale*) in a Forced Convective Cabinet Dryer and Thermal Conductivity Measurement", *Journal of Food Processing and Technology*, 3 (6): 160-164.

- [38] Cushnie, T. P. T. ve Lamb, A. J. (2005). "Antimicrobial Activity of Flavonoids", *International Journal of Antimicrobial Agents*, 26, 343–356.
- [39] Guyot, S., Marnet, N., Sanoner, P. ve Drilleau, J. F. (2003). "Variability of The Polyphenolic Composition of Cider Apple (*Malus domestica*) Fruits and Juices", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7522–7522.
- [40] Heras-Ramirez, M. E., Quintero-Ramos, A., Camacho-Davilla, A. A., Barnard, J., Talamas-Abdud, R., Torres-Munoz, J. V. ve Salas-Munoz, E., (2012). "Effect of Blanching and Drying Temperature on Polyphenolic Compound Stability and Antioxidant Capacity of Apple Pomace", *Food and Bioprocess Technology*, 5: 2201-2210.
- [41] Kek, S. P., Chin, N. L. ve Yusof, Y. A. (2013). "Direct and Indirect Power Ultrasound Assisted Pre-osmotic Treatments in Convective Drying of Guava Slices", *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495–506.
- [42] Gamboa-Santos, J., Montilla, A., Soria, A. C. ve Villamiel, M. (2012). "Effects of Conventional and Ultrasound Blanching on Enzyme Inactivation and Carbohydrate Content of Carrots", *European Food Research and Technology*, 234(6): 1071–1079.
- [43] Riadh, M. H., Ahmad, S. A. B., Marhaban, M. H. ve Che Soh, A., (2015). "Infrared Heating in Food Drying: An Overview", *Drying Technology*, 33: 322-335.
- [44] Maskan, M., (2001). "Kinetics of Color Change of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying", *Journal of Food Engineering*, 48 (2): 169-175.
- [45] Zielinska, M. ve Michalska, A., (2016). "Microwave-Assisted Drying of Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) Fruits: Drying Kinetics, Polyphenols, Anthocyanins, Antioxidant Capacity, Color and Texture", *Food Chemistry*, 212: 671-680.
- [46] Dehghannya, J., Hosseinlar, S. ve Heshmati, M. K., (2018). "Multi-Stage Continuous and Intermittent Microwave Drying of Quince Fruit Coupled with Osmotic Dehydration and Low Temperature Hot Air Drying", *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45: 132-151.
- [47] Kroehnke, J., Szadsinska, J., Stasiak, M., Radziejaska-Kubzdela, E., Bieganska-Marecik, R. ve Musielak, G., (2018). "Ultrasound- and Microwave Assisted Convective Drying of Carrots - Process Kinetics, and Product's Quality Analysis", *Ultrasonics Sonochemistry*, 48: 249-258.
- [48] Monteiro, R. L., Carciofi, B. A. M., ve Laurindo, J. B., (2016). "A Microwave Multi-Flash Drying Process for Producing Crispy Bananas", *Journal of Food Engineering*, 178: 1-11.
- [49] Kowalski, S. J., Stasiak, M. ve Szadzinska, J., (2016). "Microwave and Ultrasound Enhancement of Convective Drying of Strawberries: Experimental and Modelling Efficiency", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103: 1065-1075.

- [50] Menlik, T., Özdemir, M. B. ve Kırmacı, V., (2010). "Determination of Freeze-Drying Behaviours of Apples by Artificial Neural Network", *Expert System with Applications*, 37 (12): 7669-7677.
- [51] Koç, B., Eren, İ. ve Kaymak Ertekin, F., (2008). "Modelling Bulk Density, Porosity and Shrinkage of Quince During Drying: The Effect of Drying Method", *Journal of Food Engineering*, 85:340–349.
- [52] Ratti, C., (1994). "Shrinkage During Drying of Foodstuffs", *Journal of Food Engineering*, 23:91–105.
- [53] Singh, F. Katiyar, V. K. ve Singh, B. P., (2015). "Mathematical Modeling to Study Influence of Porosity on Apple and Potato During Dehydration", *Journal of Food Science and Technology*, 52(9): 5442–5455.
- [54] Hristova, D., Georgiev, D., Brashlyanova, B. ve Ivanov, P., (2018). "Colour Parameters of Fresh and Dried Plum Fruit of Cultivar 'Tegera', After Application of Some Conventional and Organic Fertilizers", *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24 (Suppl. 2): 48-51.
- [55] Kumar, H.S.P., Radhakrishna, K., Nagaraju, P.K. ve Rao, D.V., (2001). "Effect of Combination Drying on The Physico-chemical Characteristics of Carrot and Pumpkin", *Journal of Food Processing and Preservation*, 25(6): 447–460.
- [56] Van Zuilichem, D.J., Riet, V.T.K. ve Stolp, W., (1985). "Food Engineering and Process Applications. In: Maguer, L.M. ve Jelen, P. (Eds.), *Transport Phenomena*, Vol. 1. Elsevier Applied Science, New York, 595-610.
- [57] Ponne, C.T., Baysal, T. ve Yuksel, D., (1994). "Blanching Leafy Vegetables with Electromagnetic Energy", *Journal of Food Science*, 59 (5): 1037–1041.
- [58] Zhu, Y. ve Pan, Z., (2009). "Processing and Quality Characteristics of Apple Slices under Simultaneous Infrared Dry Blanching and Dehydration with Continuous Heating", *Journal of Food Engineering* 90: 441–452.
- [59] Sandu, C., (1986). "Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A Process Analysis", *Biotechnology Process*, 2 (3): 109-119.
- [60] Zhu, Y., Pan, Z., McHugh, T. H. ve Barrett, D. M., (2010). "Processing and Quality Characteristics of Apple Slices Processed under Simultaneous Infrared Dry-blanching and Dehydration with Intermittent Heating", *Journal of Food Engineering* 97: 8–16.
- [61] Defraeye, T., (2017). "When to Stop Drying Fruit: Insights from Hygrothermal Modelling", *Applied Thermal Engineering* 110: 1128–1136.
- [62] CR-400 Chroma Meter, <https://sensing.konicaminolta.us/products/cr-400-chroma-meter-colorimeter/>, 22 Ekim 2018.
- [63] Krokida, M. K. ve Philippopoulos, C., (2007). "Rehydration of Dehydrated Foods", *Drying Technology*, 799-830.
- [64] Kumar, C. Karim, A., Saha, S. C., Joardder, M. U. H., Brown, R. ve Biswass, D., (2017). "Multiphysics Modelling of Convective Drying of Food Materials", *Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference*, 28-29 December 2012, Bangladesh.

- [65] Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M. ve Abdan, K., (2016). "Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review", *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 16: 599-618.
- [66] Saxena, J. ve Dash, K. K., (2015). "Drying Kinetics and Moisture Diffusivity Study of Ripe Jackfruit", *International Food Research Journal*, 22 (1): 414-420.
- [67] Ndukwu, M.C., Dirioha, C., Abam F. I. ve Ihediwa, V. E., (2017). "Heat and Mass Transfer Parameters in the Drying of Cocoyam Slice", *Case Studies in Thermal Engineering*, 9: 62-71.
- [68] Doymaz, İ., (2014). "Suitability of Thin-Layer Drying Models for Infrared Drying of Peach Slices", *Journal of Food Processing and Preservation*, 38 (6): 2232-2239.
- [69] Mineai, S., Motevali, A. Najafi, G. ve Seyedi, S. R. M., (2011). "Influence of Drying Methods on Activation Energy, Effective Moisture Diffusion and Drying Rate of Pomegranate Arils (*Punica Granatum*)", *Australian Journal of Crop Science*, 6 (4): 584-591.
- [70] Guine, R. P. F., Cruz, A. C. ve Mendes, M., (2014). "Convective Drying of Apples: Kinetic Study, Evaluation of Mass Transfer Properties and Data Analysis Using Artificial Neural Networks", *International Journal of Food Engineering*, 10 (2): 281-299.
- [71] Mengeş, H. O., (1999). Konya Bölgesinde Yetiştirilen Bazı Meyvelerin Kontrollü Şartlar Altında Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [72] Özgen, F., (2014). "Elmanın Kurutulmasında Kullanılan Konvektif Tip Bir Kurutma Sisteminin Tasarımı", *Mühendis ve Makina*, 55 (656): 42-49.
- [73] Tarhan, S., Ergüneş, G., Güneş, M. ve Mutlu, A., (2009). "The Effect of Various Drying Conditions on The Drying Time and Quality of "Amasya" Apple Cultivar", *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2 (2): 1-6.
- [74] Jokic, S., Lukinac, J., Velic, D., Bilic, M., Magdic, D. ve Planinic, M., (2018). "Optimization of Drying Parameters and Color Changes of Pretreated Organic Apple Slices", *Department of Process Engineering, Faculty of Food Technology, University J. J. Strossmayer of Osijek, Croatia*.
- [75] Meisami-asl, E., Rafiee, S., Keyhani, A. ve Tabatabaeefar, A., (2009). "Mathematical Modeling of Moisture Content of Apple Slices (Var. Golab) During Drying", *Pakistan Journal of Nutrition*, 8 (6): 804-809.
- [76] Wang, H., Fu, Q., Chen, S., Hu, Z. ve Xie, H., (2018). "Effect of Hot-Water Blanching Pretreatment on Drying Characteristics and Product Qualities for the Novel Integrated Freeze-Drying of Apple Slices", *Journal of Food Quality*, Article ID 1347513.
- [77] Sahoo, N. R., Bal, L. M., Pal, U. S. ve Sahoo, D., (2015). "Impact of Pretreatment and Drying Methods on Quality Attributes of Onion Shreds", *Food Technology and Biotechnology* 53 (1): 57-65.

- [78] Contreas, C., Martin-Esparza, M. E. ve Martinez-Navarrete, N., (2012). "Influence of Drying Method on the Rehydration Properties of Apricot and Apple", *Journal of Food Process Engineering*, 35, 178-190.
- [79] Abano, E. E. ve Sam-Amoah, L. K., (2011). "Effects of Different Pretreatments on Drying Characteristics of Banana Slices", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6 (3): 121-129.
- [80] Notin, B., Steger-Mate, M., Juhasz, R., Ficzek, G., Toth, M. ve Barta, J., (2011). "Effect of Pre-Treatment Solutions of Dried Apple Slices from Several Cultivars", *Review of Faculty of Engineering, University of Szeged*, 129-137.
- [81] Tunde-Akintunde T. Y., Oyelade O. J. ve Akintunde B. O., (2014). "Effect of Drying Temperatures and Pre-treatments on Drying Characteristics, Energy Consumption, and Quality of Bell Pepper", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16 (2): 108-118.
- [82] Pathare, P. B., Opara, U. L. ve Al-Said, F. A., (2013). "Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review", *Food and Bioprocess Technology*, 6: 36-60.
- [83] Sacilik, K. ve Elicin, A. K., (2006). "The Thin Layer Drying Characteristics of Organic Apple Slices", *Journal of Food Engineering*, 73, 281–289.
- [84] Nunes, C. A. S., Riberio, T. I. B. ve Nunes, J. M. S. A., (2015). "Comparative Analysis of Dehydration Methods for Apple Fruit", *Journal of Agricultural Sciences*, 38 (3), 282-290.
- [85] Sun, J., Hu, X., Zhao, G., Wu, J., Wang, Z. ve Liao, X, (2007). "Characteristics of Thin-Layer Infrared Drying of Apple Pomace With and Without Hot Air Pre-drying", *Food Science and Technology International*, 13 (2): 91-97.
- [86] Mitrevski, V., Bundalevski, S., Lutovska, M., Geramitcioski, T. Ve Mijakovski, V., (2016). "Vacuum Far-Infrared Drying of Apple", *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 20, 1-3.
- [87] Costa, M. C., Silva, A. K. N., Rodrigues, P. R., Silva, L. H. M. ve Rodrigues, A. M. C., (2018). "Prediction of Moisture Transfer Parameters for Convective Drying of Shrimp at Different Pretreatments", *Food Science and Technology*, 1-7.
- [88] Nag, S. ve Dash, K. K., (2016). "Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics and Moisture Diffusivity Study of Elephant Apple", *International Food Research Journal*, 23 (6): 2594-2600.
- [89] Costa, M. V., Silva, A. K. N., Rodrigues, P. R., Silva, L. H. M. ve Rodrigues, A. M. C., (2018). "Prediction of Moisture Transfer Parameters for Convective Drying of Shrimp at Different Pretreatments", *Food Science and Technology*, 1-7.
- [90] Beigi, M., (2018). "Effect of Infrared Drying Power on Dehydration Characteristics, Energy Consumption, and Quality Attributes of Common Wormwood (*Artemisia absinthium* L.) Leaves", *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20: 709-718.

- [91] Doymaz, İ. ve Aktaş, C., (2018). "Determination of Drying and Rehydration Characteristics of Eggplant Slices", Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (3): 833-841.
- [92] Vishwanathan, K. H., Hebbar, H. U. ve Raghavarao, K. S. M. S., (2010). "Hot Air Assisted Infrared Drying of Vegetables and Its Quality", Food Science and Technology Research, 16 (5): 381-388.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet SOYDAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.09.1989, Balıkesir
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mehmetsoydan.engineer@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Kimya Mühendisliği	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü	2013
Lise	Fen Bilimleri	Zühtü Özkardaşlar Anadolu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016	System Handle Furniture	Kimya Mühendisi
2014	Bahçeşehir Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Soydan, M. ve Doymaz, I., (2018). "Effect of Pretreatments on Drying Behaviours of Apple Slices", 1st. International Balkan Chemistry Congress, 17-20 September, 2018, Edirne, p. 117.
2. Soydan, M. ve Doymaz, I., (2018). "Infrared Drying of Apple Slices and Mathematical Modelling", 1st. International Symposium on Graduate Research in Science, 4-6 October, 2018, İstanbul, p. 47.

