

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PORTAKAL VE LİMON DİLİMLERİNİN
KURUTULMASI: FARKLI KURUTMA
YÖNTEMLERİNİN ETKİSİ

Mustafa DÖNMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

Kasım, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PORTAKAL VE LİMON DİLİMLERİNİN KURUTULMASI:
FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİNİN ETKİSİ**

Mustafa DÖNMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 22.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İlknur KÜÇÜK, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail İNCİ, Üye

İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa

Danışmanım Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Portakal ve Limon Dilimlerinin Kurutulması: Farklı Kurutma Yöntemlerinin Etkisi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa DÖNMEZ

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarının başlangıcından itibaren bilgi ve tecrübeleriyle her daim desteklerini esirgemeyen, her türlü zor durumda yardımcı olan değerli tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ’a

Hem sosyal hem akademik hayatta her koşulda arkamda duran, varlıklarıyla bana güç veren aileme çok teşekkür ederim.



Mustafa DÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Hipotez	3
2 GENEL BİLGİ	4
2.1 Kurutma	4
2.1.1 Doğal Kurutma	5
2.1.2 Yapay Kurutma	6
2.2 Yapay Kurutmada Kullanılan Kurutucu Çeşitleri.....	8
2.2.1 Kabin kurutucular	8
2.2.2 Vakumlu kurutucular	8
2.2.3 İnfrared kurutma	10
2.2.4 Mikrodalga ile kurutma	10
2.2.5 Dondurarak kurutma	12
2.3 Kurutmaya Etki Eden Faktörler	12
3 PORTAKAL VE LİMON HAKKINDA GENEL BİLGİLER	14
3.1 Portakal	14
3.2 Limon.....	17
3.3 Kurutulmuş Portakal ve Limonun Kullanım Alanları	20
3.4 Portakal ve Limon Kurutulmasındaki Zorluklar.....	21
4 PORTAKAL VE LİMON KURUTMA HAKKINDA LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	23
4.1 Portakal Kurutulması Hakkında Literatür Araştırması	23
4.2 Limon Kurutulması Hakkında Literatür Araştırması.....	24
5 MATERYAL VE YÖNTEM	27
5.1 Materyal	27
5.2 Kullanılan Ekipmanlar	27
5.2.1 Kaba ve Hassas Terazî	27

5.2.2 Kabin Kurutucu	28
5.2.3 İnfrared Kurutucu	28
5.2.4 Etüv	29
5.3 Yöntemler	30
5.3.1 Kabin kurutucu ile örneklerin kurutulması	30
5.3.2 İnfrared kurutucuda örneklerin kurutulması	30
5.4 Nem Tayini	30
5.5 Matematiksel Modelleme	31
5.6 Regresyon analizi.....	32
5.7 Difüzyon Katsayısının ve Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	32
5.8 Renk Değerlerinin Hesaplanması	34
6 DENEYSEL SONUÇ VE ARAŞTIRMA	36
6.1 Portakal Dilimlerinin Kabin Kurutucuda Kurutulmasına Ait Sonuçlar.....	36
6.1.1. Kurutma eğrileri	36
6.1.2 Kurutma eğrilerin matematiksel modellenmesi	38
6.1.3 Efektif nem difüzivitesi	40
6.1.4 Aktivasyon enerjisi	41
6.1.5 Renk değerleri	42
6.2 Portakal Dilimlerinin İnfrared Kurutucu ile Kurutulmasına Ait Sonuçlar ..	44
6.2.1 Kurutma eğrileri	44
6.2.2 Kurutma işleminin matematiksel modellenmesi	46
6.2.3 Efektif difüzyon katsayısı	48
6.2.4 Aktivasyon enerjisi	50
6.2.5 Renk değerleri	51
6.3 Limon Dilimlerinin Kabin Kurutucuda Kurutulmasına Ait Sonuçlar	52
6.3.1 Kurutma Eğrileri	52
6.3.2 Kurutma işleminin modellenmesi	54
6.3.3 Efektif nem difüzivitesi	56
6.3.4 Aktivasyon enerjisi	57
6.3.5 Renk değerleri	58
6.4 Limon Dilimlerinin İnfrared Kurutucuda Kurutulmasına Ait Sonuçlar	59
6.4.1 Kurutma Eğrileri	59
6.4.2 Kurutma işleminin matematiksel modellenmesi	61
6.4.3 Efektif nem difüzivitesi	63

7 SONUÇ	67
KAYNAKÇA	69
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	73



SİMGE LİSTESİ

E_a	Aktivasyon enerjisi
L	Beyazlık/siyahlık renk parametresi
MR_{exp}	Deneysel nem oranı
N	Deneysel veri sayısı
D_{eff}	Efektif nem difüzivitesi
R	Evrensel gaz sabiti
m	IR kurutucuda kurutulacak maddenin kütlesi
p	IR kurutucunun gücü
IR	İnfrared
χ^2	Khi-kare
a	Kırmızılık/yeşillik renk parametresi
$RMSE$	Kök ortalama kare hatası
C	Kroma
m_d	Kuru madde miktarı
DR	Kurutma hızı
M_e	Kurutma koşullarındaki havanın denge su miktarı
M_0	Kurutma öncesinde ürünün içerdiği su miktarı
T	Kurutma sıcaklığı
MR	Nem oranı
R^2	Regresyon katsayısı
b	Sarılık/mavilik renk parametresi
D_0	Sonsuz sıcaklıkta difüziviteye eşdeğer sabit
m_w	Su miktarı
t	Süre
MR_{pre}	Tahmin edilen nem oranı
ΔE	Toplam renk farkı
M	Ürünün nem içeriği
M_{t_1}	Ürünün t_1 anındaki nem içeriği
M_{t_2}	Ürünün t_2 anındaki nem içeriği

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Kabin kurutucu	8
Şekil 2.2	Vakumda kurutma odası.....	9
Şekil 2.3	İnfrared kurutma cihazı şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.4	Mikrodalga fırın şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.1	Farklı türdeki portakal meyvelerine ait görüntüler.....	16
Şekil 3.2	Türkiye'de portakal üretim miktarının yıllara göre değişimi.....	17
Şekil 3.3	Farklı limon çeşitlerine göre ait görüntüler.....	19
Şekil 3.4	Türkiye'de limon üretim miktarının yıllara göre değişimi.....	20
Şekil 5.1	Kurutma yapılan portakal ve limon dilimleri.....	27
Şekil 5.2	Kaba ve hassas terazi.....	28
Şekil 5.3	Kabin kurutucu.....	28
Şekil 5.4	İnfrared kurutucu.....	29
Şekil 5.5	Etüv cihazı.....	29
Şekil 5.6	Renk ölçer.....	34
Şekil 6.1	Portakal dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri.....	37
Şekil 6.2	Kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi.....	38
Şekil 6.3	Portakal dilimlerinin deneysel nem oranının tahmini nem oranı ile kıyaslanması.....	40
Şekil 6.4	Sıcaklığa karşı efektif nem difüzivite değerleri.....	41
Şekil 6.5	Efektif nem difüzivitesi ile sıcaklık arasındaki Arrhenius tipi ilişki.....	42
Şekil 6.6	Taze ve kurutulmuş portakal dilimlerinin renk değerleri.....	43
Şekil 6.7	Değişik IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimlerine ait su içeriğinin kuruma süresine bağlı değişimi.....	45
Şekil 6.8	Değişik IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimleri için kurutma hızı eğrileri.....	46
Şekil 6.9	Farklı IR güç seviyelerinde kurutulmuş numunelerin deneysel ve tahmini nem oranlarının kıyaslanması.....	48
Şekil 6.10	Değişik IR güçlerinde kurutulan numunelerin efektif difüzyon katsayı değerleri.....	49
Şekil 6.11	IR güç seviyesinin D_{eff} üzerindeki etkisi.....	50
Şekil 6.12	İnfrared kurutucuda kurutulan portakal dilimlerinin renk analiz değerleri.....	51

Şekil 6.13	Limon dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri.....	53
Şekil 6.14	Limon dilimlerinin çeşitli sıcaklıklardaki kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi.....	54
Şekil 6.15	Limon dilimlerinin deneysel ve tahmini nem oranlarının kıyaslanması.....	56
Şekil 6.16	Sıcaklığa karşı efektif nem difüzivite değerleri.....	57
Şekil 6.17	D_{eff} ile T arasındaki Arrhenius tipi ilişki.....	57
Şekil 6.18	Taze limon ve kabin kurutucuda kurutma sonrası limon dilimlerinin renk analiz değerleri.....	59
Şekil 6.19	Limon dilimlerinin infrared kurutucudaki kurutma süresi eğrileri.....	60
Şekil 6.20	Limon dilimlerinin infrared kurutucudaki kurutma hızının kuruma süresi ile değişim eğrileri.....	61
Şekil 6.21	Limon dilimlerinin farklı IR güç seviyelerinde kurutulması ile deneysel ve tahmini nem oranlarının karşılaştırılması.....	63
Şekil 6.22	Farklı IR güç seviyesinin efektif difüzyon katsayısı üzerindeki etkisi.....	64
Şekil 6.23	Efektif nem difüzivitesi ile IR güç seviyesi arasındaki Arrhenius tipi ilişki.....	65
Şekil 6.24	İnfrared kurutucuda kurutulan limon dilimlerinin renk değerleri.....	66

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Mikrodalga kurutmanın avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması..	11
Tablo 3.1	Portakal (100 g) için temel bileşen, vitamin ve mineral miktarları.....	15
Tablo 3.2	Limon (100 g) için temel bileşen, vitamin ve mineral miktarları.....	18
Tablo 5.1	Kurutma eğrileri modellerine ait matematiksel denklemler.....	31
Tablo 6.1	Portakal dilimlerinin kuruma süreleri.....	36
Tablo 6.2	Farklı sıcaklıklarda kurutulan portakal dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler.....	39
Tablo 6.3	Taze ve kurutulmuş portakal dilimlerinin renk analiz değerleri.....	43
Tablo 6.4	Portakal dilimlerinin infrared kurutucuda kurutma süreleri.....	44
Tablo 6.5	İnfrared kurutucuda kurutulan portakal dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler.....	47
Tablo 6.6	Farklı infrared güçlerinde kurutulan numunelerin efektif difüzyon katsayı değerleri.....	49
Tablo 6.7	Taze portakal ve infrared kurutma sonrası portakal dilimlerinin renk analiz sonuçları.....	51
Tablo 6.8	Limon dilimlerinin kuruma süreleri.....	52
Tablo 6.9	Farklı sıcaklıklarda kurutulan limon dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler.....	55
Tablo 6.10	Taze limon ve kabin kurutma sonrası limon dilimlerinin renk analiz değerleri.....	58
Tablo 6.11	Limon dilimlerinin infrared kurutucuda kurutma süreleri.....	59
Tablo 6.12	Farklı IR güç seviyesinde kurutulan limon dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler.....	62
Tablo 6.13	Limon dilimlerine ait belirlenen renk değerleri.....	66

Portakal ve Limon Dilimlerinin Kurutulması: Farklı Kurutma Yöntemlerinin Etkisi

Mustafa DÖNMEZ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

Tez kapsamında portakal ve limon dilimlerinin kabin kurutma ve infrared (IR) kurutma yöntemleriyle kurutulması incelenmiş ve bu süreçte kurutma davranışları ile renk parametrelerinin değişimi analiz edilmiştir. Araştırmanın ana amacı, farklı kurutma yöntemlerinin ve koşullarının portakal ve limonun kuruma kinetikleri ve renk özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemektir.

DeneySEL çalışmalarda, belirli boyutlarda kesilen portakal ve limon dilimleri kabin kurutma ve IR kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuştur. Kabin kurutma yönteminde 45, 60 ve 75°C sıcaklıklarında çalışılırken IR kurutmada 38, 50, 62 ve 74 W güç değerleri uygulanmıştır. Kurutma boyunca nem kaybı, kuruma süresi parametreleri izlenerek kaydedilmiş olup kurutma sonrasında ürünlerin renk değişimleri değerlendirilmiştir. Kurutma kinetiği analizinde literatürde yer alan altı farklı matematiksel model kullanılmıştır. Buna ek olarak efektif nem difüziviteleri ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

Kabin kurutma yönteminde kurutma sıcaklığının artması ile artan nem kaybına bağlı olarak portakal ve limon dilimlerinin daha kısa sürede kuruduğu tespit edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kurutulan portakal ve limon dilimlerine ait kurutma verilerinin matematiksel modellenmesi sonucunda elde edilen R^2 , khi-kare ve RMSE değerleri karşılaştırılmış ve en uygun modelin Midilli & Küçük modeli olduğu belirlenmiştir. 45-75°C'de kurutulan portakal dilimlerinin efektif nem difüzyon katsayıları $1,65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $7,04 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişirken aktivasyon enerjisi değeri 44,26 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Aynı sıcaklıklarda kurutulan limon dilimlerinde ise efektif nem difüzyon katsayıları $1,32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $6,70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişirken aktivasyon enerjisi 49,75 kJ/mol olarak belirlenmiştir.

IR kurutucuda farklı güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimlerinin efektif difüzyon katsayıları $1,07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $1,99 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında, limon dilimlerinin efektif difüzyon katsayıları ise $1,20 \times 10^{-9}$ ile $2,32 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişmektedir. Bu kurutma yönteminde portakal ve limon için aktivasyon enerjileri sırası ile 1,12 kW/kg ve 1,20 kW/kg olarak hesaplanmıştır.

Bu tez çalışması, gıda mühendisliği ve teknolojisi alanında portakal ve limon gibi narenciye ürünlerinin kurutulmasında kullanılan yöntemlerin optimizasyonu ve ürün kalitesinin korunması açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bulgular hem akademik çalışmalara hem de endüstriyel uygulamalara değerli katkılar sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Portakal, limon, kurutma, matematik modelleme.

Drying of Orange and Lemon Slices: Impact of Different Drying Methods

Mustafa DÖNMEZ

Department of Chemical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

Within the scope of the thesis, the drying of orange and lemon slices using cabinet drying and infrared (IR) drying methods was examined and the drying behavior and changes in color parameters were analyzed in this process. The main aim of the research is to determine the effects of different drying methods and conditions on the drying kinetics and color properties of oranges and lemons.

In experimental studies, orange and lemon slices cut in certain sizes were dried using cabinet drying and IR drying methods. In the cabinet drying method, temperatures of 45, 60 and 75°C were used, while in IR drying, power values of 38, 50, 62 and 74 W were used. During drying, moisture loss and drying time parameters were monitored and recorded, and color changes of the products were evaluated after drying. Six different mathematical models in the literature were used in the drying kinetics analysis. In addition, effective moisture diffusivities and activation energies were calculated.

It has been determined that in the cabinet drying method, orange and lemon slices dry in a shorter time due to increased moisture loss as the drying temperature increases. R^2 , chi-square and RMSE values obtained because of mathematical modeling of drying data of orange and lemon slices dried at different temperatures were compared and the proposed by Midilli & Küçük was determined to be the most suitable. While the effective moisture diffusivities of orange slices dried at

45-75°C varied between $1.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $7.04 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, the activation energy value was calculated as 44.26 kJ/mol. In lemon slices dried at the same temperatures, the effective moisture diffusivities varied between $1.32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $6.70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, while the activation energy was determined as 49.75 kJ/mol.

The effective diffusion coefficients of orange slices dried at different power levels in the IR dryer are between $1.07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.99 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, and the effective diffusion coefficients of lemon slices are between $1.20 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $2.32 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. In this drying method, activation energies for orange and lemon were calculated as 1.12 kW/kg and 1.20 kW/kg, respectively.

This thesis study provides important information in the field of food engineering and technology in terms of optimizing the methods used in drying citrus products such as oranges and lemons and preserving product quality. It is expected that the findings will make valuable contributions to both academic studies and industrial applications.

Keywords: Orange, lemon, drying, mathematical modelling.

1 GİRİŞ

Günümüzde gıdaların saklanması için birçok farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerdeki ana amaç gıdaların mikroorganizma ve enzim aktivitelerinin durdurulması ya da yavaşlatılması işlemidir. Gıda maddeleri üzerinde farklı türlerde mikroorganizmalar üremekte ve bu gıdalar bir yandan kendileri için temin etmesi gerektiği gıdaları yaşadıkları yapılardan temin ederken, metabolizma da oluşan yan ürünlerini de sisteme verirler. Bu esnada eş zamanlı olarak her gıdanın bileşiminde var olan farklı enzimlerin aktifliği de devam etmektedir. Tüm bu sürecin sonunda önemli fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelir ve bu yüzden gıdaların insanlar tarafından tüketilmesine mâni olacağı bir hale dönüşebilmektedir. Bu bahsedilen olay da bozunma olarak adlandırılmaktadır. Gıdaların uzun zaman bozulmaya uğramadan muhafaza edilmeleri için farklı muhafaza yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler genel olarak fiziksel, biyolojik ve kimyasal olmak üzere üç başlıkta toplanmaktadır Kurutma, meyve ve sebzelerin işlenmesinde sık kullanılan bir aşamadır. Diğer yandan kurutmanın, her işleme metodu gibi üründe kaliteyi negatif yönde etkileyecek birtakım reaksiyonları hızlandırıcı bir etkisi bulunmaktadır. Bu gibi etkileri önlemek, gıdanın besin değerini, aromasını ve lezzetini korumak amacıyla kurutma işleminin kontrollü yapılması gıdanın kalitesini etkileyecek önemli bir parametredir.

Latince ismi ‘Citrus sinensis’ olan portakal, İpek Yolunun Anadolu’dan geçtiği dönemlerde Hindistan’ın da yer aldığı arazide var olan ve o bölgeden ticareti yapılan ancak Ümit Burnu’nun keşfinin yapılp ticaret yönlerinin değişmesiyle Portekiz ve Avrupa’ya ulaşmış bir gıdadır. Türkiye sınırlarına ilk kez Portekiz üzerinden girdiği için Portekiz meyvesi olarak betimlenen ‘Portakal’ meyvesi ismini almıştır.

Portakal, turunçgil ailesinin tercih edilmesi açısından ilk sıradaki üründür. Türkiye ılıman orta kuşakta bulunduğu için portakalın üretim koşullarına uygun yapıya sahiptir. En çok üretimin yapıldığı iller Adana, Antalya, Mersin ve Hatay olarak sayılabilmektedir. Portakal, boyları yaklaşık olarak 2-3 metre, yapraklarının yapısı sert olan ağaçlarda yetişmektedir.

Limon, *Citrus limon* (L.) Burm. f. Latince adıyla bilinmekte olan, turunçgillerin sınıfında bulunan, ılıman iklim koşullarının görüldüğü yerlerde farklı türlerde üretimi olan, yaprak dökme özelliği olmayan bir ağacın ürünüdür. Hindistan ve Çin en çok üretimi yapılan ülkelerdir. Taze ağırlığı yüksek oranda su içermekte olan limonların (yaklaşık %87) tohumlarının metabolik aktiviteleri, diğer bitkisel kaynaklı gıdalara göre daha yüksektir. Hasat sonrası da devam eden bu metabolik aktivite nedeniyle meyvelerin çoğu çabuk bozulan ürünler haline gelmektedir.

Devamlı limon tüketilmesi, kalp rahatsızlıkları, yaşlı insanlarda kalsiyum yetersizliği, hipertansiyon gibi farklı rahatsızlıkları önleme ve tedavi etmeye yardımcı özelliklere sahiptir. Türkiye’de üretimi olan turunçgillerin yaklaşık %21’i limondur.

Bu çalışmada, ülkemizde tüketimi oldukça yüksek olan portakal ve limon dilimlerinin kurutulması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kabin kurutucu ve infrared kurutucu sistemlerinde farklı sıcaklıklarda kurutma işlemleri yapılmıştır. Portakal ve limonun renk analizi ve rehidrasyon kapasitesi üzerine çalışma yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada amaç, farklı sıcaklık koşullarında (45, 60 ve 75°C), farklı kurutma teknikleri kullanılarak (infrared, kabin) kurutulan portakal ve limon dilimlerinin (7 mm) kurutma davranışlarının ve renk özelliklerinin araştırılmasıdır. Bu çalışma sonrası, farklı kurutma koşulları ve sıcaklıklarında kurutulan portakal ve limon numuneleri için en uygun matematiksel model seçilerek uygun kurutma yöntemi belirlenecektir. Portakal ve limon dilimleri, kabin kurutucu sistemde 45, 60 ve 75°C’de infrared kurutucuda ise 38, 50, 62 ve 74 W gibi farklı güç seviyelerinde ön işlem içirmeden kurutulmuştur. Deney sonuçlarındaki verilere dayanarak kabin ve infrared kurutma için kurutma kinetiği, efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjileri için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu bulunan değerler literatürde yer alan 6 farklı kurutma modeli kullanılarak hesaplanmış ve en uygun olan model belirlenmiştir. Çalışmalar sonucu elden edilen veriler ışığında kullanılan hava sıcaklıklarının ve kurutma tipinin son ürünlerdeki renk parametreleri sonuçlarına etkisi gözlemlenmiştir.

1.2 Hipotez

Yapılan bu çalışmada, 0,7 cm kalınlığında kesilen portakal ve limon dilimleri ön işlem olmadan 45, 60 ve 75°C’de kabin kurutucuda ve 38, 50, 62 ve 74 W güç seviyeleri olmak üzere infrared kurutucu cihazında kurutulmuştur.

Numunelerdeki nem içerik değerleri %15’e düşene kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Deney sonuçlarına göre alınan veriler ışığında kurutma eğrileri çizilmiştir. Deneysel çalışma sırasında elde edilen verilere literatürde yer alan kurutma modellerinden altı model seçilmiş ve bu modeller test edilmiştir. Bu işlem sonucunda en uygun model belirlenmiştir. Diğer yandan efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Renk analizi çalışmalarında ise kurutulmuş olan portakal ve limon dilimlerinden alınan veriler taze portakal ve limon dilimlerinden alınan verilerle karşılaştırılmış ve sonuçları yorumlanmıştır.

2.1 Kurutma

Gıda malzemelerinin kurutularak muhafaza edilme biçimi, insanlığın doğadan edindiği ve bu dönemlerden itibaren kullanılmakta olan en eski gıda saklama yöntemlerinden birisidir. Bu uygulama, doğada genel olarak kendi kendine gerçekleşebilmekte ve örnek olarak türlü tahıllar ve baklagiller tarlalarda bir etki olmadan kendi kendine kuruyarak dayanımı yüksek bir hale bürünmektedir. Doğada olan kurutma, güneş ısısı ile çalışmakta olduğundan, kurumanın her ortamda ve her zaman diliminde çalışması mümkün değildir.

Kurutmanın tarihi geçmişinin M.Ö. yıllara kadar dayandığı bilinmektedir. Bu dönemlerde ilk başlarda et, balık ve hububat gibi ürünler daha sonrasında meyve ve sebze kurutulmaya başlanmıştır. Orta Çağ'da Japonya'da kurutma işlemi ile kurutulan bazı gıdalar tercih edilmeye başlanmış ardından meyve, et, deniz yosunları ve balık gibi gıdalar kurutularak saklanmaya başlanmıştır. 17. yy'da kurutma işleminde ateş kullanılmaya başlanmış ancak ön işlemlerde yaşanan sorunlar ve bitmiş üründe görünen kusurlardan ötürü 19. yy.'a kadar kalite oranı yüksek ürün elde edilememiştir. 18. yüzyıla gelindiğinde doğal kurutma yöntemlerinin yanında yapay kurutma olarak adlandırılan yöntemler de kullanılmaya başlanmıştır ancak bu denemelerde de hedeflenen kalitede ürün elde edilememiştir.

Gıda kurutma çalışmalarında 19. Yüzyılda ciddi adımlar atılmış ve 1856 yılında vakum yöntemi ile konsantre süt üretimi gerçekleştirilmiştir. Yirminci yüzyıllara gelindiğinde silindir kurutma ve püskürtme üzerine çalışmalarda yoğunlaşma olmuş, 1954 yılına gelindiğinde ilk hazır içme sütü üretilip 1960'ta dondurarak kurutma yöntemi ile ilk hazır kahve üretilmiştir. 1970 yılında ise kalite oranı yüksek olan soğan tozu üretimi gerçekleştirilmiştir (Kayaardı, 1992)

Antik çağlarda gıda ürünlerini kurutmak için rüzgâr ve güneş ışığından faydalanılıyordu. M.Ö. yıllarda Ortadoğu ve Avrupa'da tarımsal ürünlerin güneşte kurutma işleminin aktif kullanıldığı bilinmektedir. Kurutulan gıdaların eski insanlar

tarafından kullanıldığına dair ilk kayıtlar (M.Ö. 1700) Mezopotamya tabletlerinde görülmüştür. Akkad dilinde (Babil halkının günlük dili) çivi yazısı yöntemiyle kil levhalara işlenmiştir. Fransa ıslak giysileri kurutmak için zorlamalı konveksiyon prensibiyle kullanılan çamaşır kurutucuları bulmuştur. Gıdaları ve diğer organik maddeleri dondurarak ve vakum kullanarak içerisinde yer alan suları uzaklaştırarak depolama yöntemi 1904 yılında Amerikan doktor E.L. Flosdorf tarafından bulunmuştur. Bu sebeple, kurutma ekipmanlarının tasarımı ve kurutma teknikleri teknolojinin ilerlemesiyle her geçen yıl gelişmektedir. Son kırk yıllık süreçte birçok literatür çalışmasında nemli gıdaların konvektif kurutma yöntemiyle uzaklaştırılması hem deneysel hem de matematiksel olarak çalışılmıştır (Chandramohan, 2020).

Kurutmanın çeşitleri olan doğal ve yapay kurutma ile kullanılan kurutucu çeşitleri ilerleyen kısımlarda yer almaktadır.

2.1.1 Doğal Kurutma

En çok kullanılan kurutma yöntemlerinden biridir. Güneş enerjisinin kullanılarak gıda içerisinde bulunan suyun azaltılması sürecine doğal kurutma denmektedir. Doğal kurutma yöntemi bilinen en eski ve maliyet oranı düşük kurutma yöntemlerindendir. Bunun yanında gıdanın böcek vb. etkenlere maruz kalması, kontaminasyon olması olasılığı taşınması gibi etkiler sebebiyle zamanla tercih edilme oranı azalma göstermiştir. Prosesin uzun sürmesi, yıllar ilerledikçe daha steril ve hızlı kurutma metotlarının kullanılmaya başlanması ile yapay kurutma yöntemlerinin kullanılabilirliği artmıştır. Doğal kurutmanın olumsuz yönleri şunlardır;

- Doğal kurutmada gıda açık havada bulunduğundan bulaşma, tozlanma, çeşitli zararlı hayvanlar ve kuşlara karşı savunmasızdır.
- Kurutma işleminin gerçekleşebilmesi için büyük arazilere ihtiyaç vardır.
- Genelde fermantasyon olması sebebiyle kalitesi yüksek gıdalar için tercih edilebilir değildir.
- Kurutma olayı uzun sürelerde gerçekleştiğinden kurutma süreleri oldukça uzundur.
- Gıda içerisinde bulunan mevcut su oranı %15'in altına indirilemez.

- Her gıdanın güneşte kuruyabilmesi mümkün değildir. Bu sebepten dolayı her gıdada uygulanabilmesi kabul edilebilir değildir.
- Her bölge veya her arazi yapısı güneşte kurutma için kullanılabilir iklim şartlarına uymamaktadır.

Güneşte kurutma yöntemi kullanılarak yapılan kurutma işlemlerinde gıdanın olumsuz etkilerinin azaltılması için bazı noktalara dikkat edilmelidir. Bu hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kurutulacak gıda kurutma olgunluğuna geldiği an hasat işlemi yapılmalıdır.
- Kurutma esnasında gıda da yer alan çöp, taş, yaprak vb. unsurlar olan gıdalar seçilip ayrılmalıdır.
- Kükürtleme işlemi yapılacak ise gıdaya uygun yapılmalıdır.
- Ambalajlama işlemi meyvelerin spesifik durumuna göre uygun belirlenmelidir.
- Bütün meyveler ve dilim halinde olan meyveler ayrı şekillerde işleme alınmalıdır.

2.1.2 Yapay Kurutma

Kurutma olayının kapalı olan mekânlarda ve kontrol edilmesi mümkün koşullarda çalışması olayına yapay kurutma denmektedir. Çoğu tanımında rehidrasyon olarak da adlandırılmaktadır. Kurutma olayının genel gayelerini üç başlıkta toplayacak olursak;

- a) Gıdaların raf ömrünü uzatmak,
- b) Ürün hacimlerinin azaltılması ile saklama ve aktarma aşamasında tasarruf sağlamak,
- c) Yeni ürün geliştirme çalışmalarında bulunmak olarak listelenebilmektedir.

Kurutma kısaca tanımlanacak olursa, aynı anda gerçekleşmekte olan ısı ve kütle aktarımı ile sıvının buharlaştırma ile katıdan uzaklaştırılması olarak anlatılmaktadır. Kurutma olayı esnasında buharlaştırma olayı için gereken ısı gıdaya sağlanır ve barındırdığı nemin bir kısmı buharlaştırma olayıyla kuru ortam tarafından alınır. Isı, taşınım ile çevreden tane yüzeyine, oradan da aynı şekilde konveksiyon ile katı tanenin iç kısımlarına geçer. Nem ise ilk olarak ürünün yüzey

kısmına taşınıp buharlaştırılır ve taşınım ve iletim olaylarıyla çevreye aktarılmaktadır. Isı aktarımı hava sıcaklığına, bağıl neme, hava akışına, bulunduğu ortama ve basınç değerlerine bağlıdır. Kurutma işlemi gerçekleşen gıdalardaki başlıca kıstas, kurutma işlemi sonucu gıdalardaki rehidrasyonu durumunda ilk hallerine oldukça yakın bir hal alması veya ilk durumdaki rehidrasyon ile son haldeki farkın fark edilemeyecek kadar ufak olmasıdır. Kurutma olayındaki gerçek gayenin olabildiğince hızlı kurutmaktan ziyade olabilecek en iyi kalitedeki ürün elde etmek olduğu önemini her zaman korumaktadır. Bu sebeple son senelerde kurutma olayı esnasında kalitede olası kaybın olabildiğince az seviyelerde tutulup, son üründeki kalite seviyesinin arttırılması, enerji verimliliği gibi sebeplerden dolayı kurutma metotlarından kullanılabilir olanları beraber de uygulanabilmektedir. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalara göz gezdirildiğinde fırın, tünel, püskürtmeli kurutucuların mikrodalga ile birlikte kullanıldığı; mikrodalga ile kızılötesi yöntemlerinin birlikte çalışıldığı araştırmaların sayısında büyük yükselme görülmüştür.

Öte yandan son senelerde enerji kazanımı, karbon emisyonlarının daha düşük seviyelere getirilmesine yönelik önleyici faaliyetler kullanıldığı görülmektedir. Bu çerçevede atmosfer ortamına daha az seviyelerde gaz salımı yapan teknolojik buluşlar, kimi şartlarda maliyeti daha yüksek olmasına rağmen kullanılmaya başlanmıştır. Gıda maddesinin içerisinde bulunan suyun büyük önemli bir miktarını buharlaştırmak amacıyla kontrol edilebilir koşullarda ısı işlem uygulanması işlemine kurutma denmektedir. Başka bir yöntem olan dondurarak kurutma işleminde ise suyun gıdadan uzaklaştırılma metodu buharlaştırma ile olmayıp süblimasyon işlemi ile meydana gelmektedir. Taze bir biçimde saklanması oldukça zor olan ve ülkemizde de yetiştirilmekte olan portakal ve limon, kurutma işleminin aktif kullanıldığı gıdalardandır. Genel olarak turunçgiller asit oranı düşük (greyfurt, mandalina, portakal) ve asit oranı yüksek (lime ve limon) olarak ayrılmaktadır. Turunçgillerin kabukları antioksidan etki veren fenolik bileşiklerce yapıcı zengindir. Limonlar ile portakallar mukayese edilirse daha asidik yapıda olup protein ve şeker oranı açısından daha düşüktür (Tekgül, 2019).

2.2 Yapay Kurutmada Kullanılan Kurutucu Çeşitleri

2.2.1 Kabin kurutucular

Kabin kurutucuların birçok çeşidi olup hepsinin çalışma prensibi aynıdır. Kurutulmaya çalışılan ürün ilk olarak ızgaralı veya delikli türdeki tepsilere konumlandırılır. Tepsiler üst üste gelecek şekilde yerleştirilerek bir vagon şeklinde kurutma kabinine girmektedir. Bu kabinlere fanlar sayesinde sıcak hava aktarımı yapılmaktadır. Havanın mekanizmaya gönderilmesinin ardından numunenin üzerinden geçiş yapan hava gıdada bulunan nemi çekerek sistemden ayrılmaktadır. Sistemden ayrılmış olan havanın belli bir bölümü sisteme tekrar kazandırılabilir. Fakat bu havanın numuneden aldığı nem patlama-yanma riski taşıyan bir yapıda ise sisteme tekrar geri döndürülmeden direkt olarak sistemden atılmaktadır (Uysal, 2019). Kabin kurutuculara ait figür Şekil 2.1’de sunulmuştur (Saçılık, 2022).

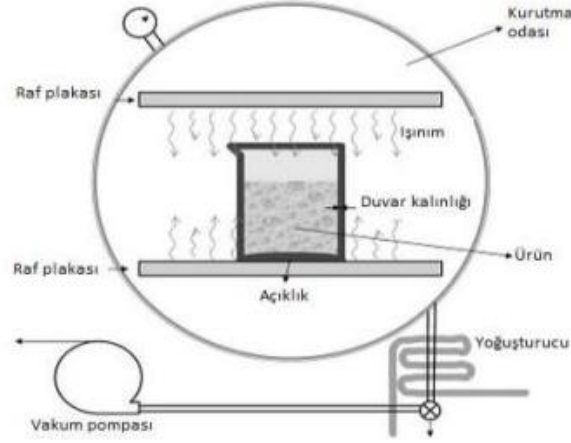


Şekil 2.1 Kabin kurutucu (Saçılık, 2022).

2.2.2 Vakumlu kurutucular

Kurutma işleminin düşük basınçlarda kullanıldığı bir kurutma sistemidir. Basınç değeri azaldıkça suyun kaynama noktasının azalması prensibine dayanmaktadır (Geniş, 2022). Bu mekanizma özellikle nem miktarının azaltılması gereken gıdalarda ve ısıya karşı duyarlılığı olan numunelerin kurutulması işleminde aktif

olarak çalıştırılmaktadır. Şekil 2.2’de vakumda kurutma odasına ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 2.2 Vakumda kurutma odası (Geniş, 2022).

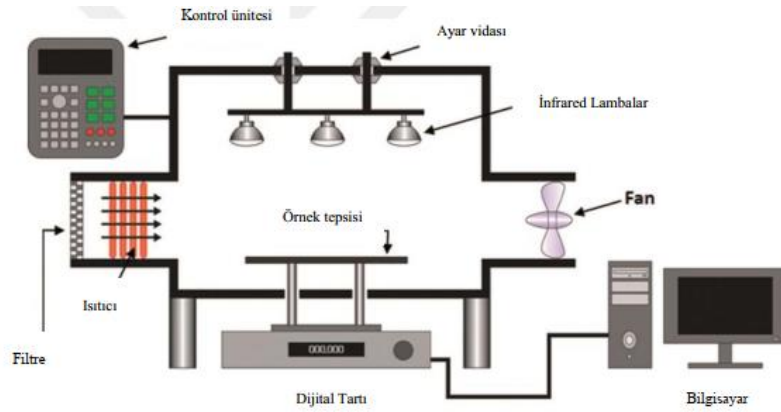
Diğer kurutma metotlarına kıyasla, anaerobik ortamda ve diğer sistemlere göre düşük kurutma sıcaklıklarında kurutma yapabilme gibi yönleri bulunmaktadır. Kurutma olayı anında sistemde oksijen bulunmaması sebebiyle oksidasyon reaksiyonlarında azalma görülmektedir. Vakum kurutma yöntemiyle kurutulmuş numunelerin aroma, renk ve dokusal özellikleri diğerlerine göre kalitesini daha iyi koruyabilmektedir. Kurutma anında su molekülleri yüzeye doğru hareket ederek vakum haznesi içinde buharlaşmaktadır. Haznede kısmi vakum olayı, gıdanın yüzeyinde bulunmakta olan su buharının konsantrasyon değerini düşürmektedir. Olumsuz bir özellik olarak vakum kurutucular, dayanıklılık gerektiren ve sızdırmaz özellikte vakum haznesi olan sistemler şeklinde çalışabildiğinden ekonomik olarak oldukça pahalı mekanizmalardır. Bu sebepten genelde kurutulmak istenen gıdanın nem oranı ilk olarak sıcak havalı bir kurutma sisteminde %20-25 dolaylarına getirilip ardından vakum kurutucularda istenen kurutma seviyelerine getirilerek ekonomik açıdan tasarruf edilebilmektedir. Diğer kurutma yöntemleriyle kıyaslandığında sıcaklığın düşük olması, ortamda oksijenin az bulunması ve oldukça yüksek kuruma hızı olmasına bağlı olarak kalitesi yüksek gıdalar oluşmasına rağmen tesis kurulum ve işletme giderlerinin oldukça yüksek olması çalışma alanını kısıtlamaktadır.

2.2.3 İnfrared kurutma

Kurutma sistemleri arasında infrared kurutucular, mühendislik dünyasında önem arz eden kurutma sistemlerinde oldukça kullanılan bir yöntemdir. Gıda kurutma alanında oldukça aktif kullanılmaktadır. Eğer kurutma sistemi verimli bir düzenekle oluşturulursa enerji türünden oldukça verimli çalışmaktadır.

İnfrared kurutma, enerji açısından ekonomik olması, daha az sürelerde kurutma yapabilmesi, kurutma sonunda ürünün kalitesinin yüksek olması, sistem adımlarının kontrolünün kolay idare edilmesi, sıcaklığın eşit bir şekilde dağıtılabilmesi, çalışma alanının temizliği ve alan olarak tasarruf sağlaması gibi birçok avantajı sayesinde kurutma alanında oldukça kıymetli bir yöntem olmuştur.

Bu pozitif yönlerine ek olarak infrared kurutmanın diğer kurutma çeşitlerine kolay entegre edilebilmesi kurulum maliyetlerinin az olması, enerji masraflarının düşük olması, sistemde kullanılan malzemelerin basit malzemeler olması gibi avantajlar da mevcuttur. Bu kurutma çeşidinin geniş kullanım alanlarının olması ve kurulumunun basitliği tercih edilen bir kurutma yöntemi olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Basit bir infrared kurutucu sistemi Şekil 2.3'te görülmektedir (Geniş, 2022)



Şekil 2.3 İnfrared kurutma cihazı şematik gösterimi (Geniş, 2022)

2.2.4 Mikrodalga ile kurutma

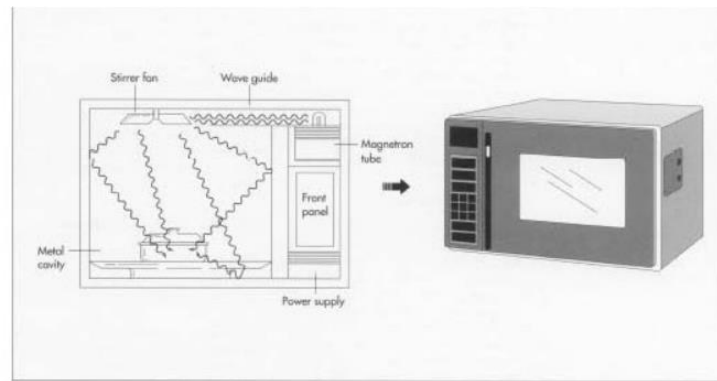
Mikrodalga ışınlar, radyo dalgaları ve infrared ışınları arasındaki kısımda bulunan, 0,3-300 GHz frekans aralığında olan, dalga boyları ise 1 mm'den 1 m'ye kadar değişebilen ışın çeşitleridir. Bu yöntemle kurutma yapıldığında numune mikrodalga

enerjisi ile bir araya geldiğinde moleküler uyarım sayesinde numunenin içerisinde ısı üretimi gerçekleşmektedir. Ardından gerçekleşen önemli adım su buharını hızlı bir şekilde uzaklaştırmaktır. Suyu uzaklaştırmak için uygulanan temel bir yöntem, numunenin yüzeyinden havayı geçirmektir. Çoğu durumda mikrodalga kurutma betimlendiğinde mikrodalga konvektif kurutma olduğu bilinmektedir. Numuneden geçirilen hava sıcaklığı kuruma süresini azaltmak için değiştirilebilmektedir. Mikrodalga kurutmanın konveksiyon yöntemi ile kurutmaya kıyasla birçok avantajı bulunmakta olup bazı sınırlı çalışma koşulları olduğu da bilinmektedir. Avantaj ve sınırlılık durumları aşağıdaki Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Mikrodalga kurutmanın avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması

Avantajlar	Sınırlamalar
Hacimsel olarak hızlı ısıtması	Endüstriyel ölçeklerde yüksek kurulum maliyeti
Kurutma hızının daha yüksek olması	Kısmen aromada kayıp
Daha kısa kurutma süreleri	Ürünün dokusal değişme olasılığı
Numunenin yüksek kalitesi	Kurutmanın etkili olması için spesifik numune boyutu durumu
İşletme maliyetlerinin düşük olması	Azaltılan enerji tüketimi

Basit bir mikrodalga kurutucu Şekil 2.4’te verilmiştir (Geniş, 2022).



Şekil 2.4 Mikrodalga fırın şematik gösterimi (Geniş, 2022).

2.2.5 Dondurarak kurutma

Dondurarak kurutmada donmuş olan gıdanın içerisindeki serbest haldeki suyun basıncın alçak olduğu bir ortamda süblimleşmesi sonucu, bağlanmış olan su desorpsiyon yöntemi ile ayrılmaktadır. Biyoteknoloji, kimya ve gıda sanayi gibi alanlarda oldukça kullanılmakta olup liyofilizasyon olarak da adlandırılmaktadır (Ayrıkça vd., 2022)

Dondurarak kurutma yönteminin diğer kurutma yöntemlerine göre birçok avantajı mevcuttur. Kurutulmuş malzemenin raf ömrünün diğer yöntemlere göre uzun olması, muhafaza etmek için gerekli alandan tasarruf edilmesi, oda sıcaklığında muhafaza edilebilmesi ve kurutulan malzemeye tekrar su ilavesi yapıldığında kurutmadan önceki haline yakın bir hal alması avantajlarından bazılarıdır.

Ortamda bulunan suyun donmuş halde bulunması, düşük sıcaklıklarda kurutma işleminin gerçekleştirilmesi ve vakum sistemine bağlı olarak sistemde oksijen bulunmamasından ötürü ürünün genel kalitesi muhafaza edilmektedir. Endüstriyel açıdan maliyetinin ekonomik olmaması başlıca dezavantajlarından biridir.

2.3 Kurutmaya Etki Eden Faktörler

Ürünler kuruma esnasında birçok parametreden etkilenmektedir. Kuruma hızını etkileyen bu parametreler üründen ürüne değişim göstermektedir. Ürünün kimyasal yapısından, boyutlarından, havanın hızı ve neminden vb. parametrelerden etkilenmektedir.

Ürünün kimyasal bileşimi: Gıdanın kimyasal içeriği kuruma işlemi esnasında değişim göstermektedir. Gıdanın içerisinde yer alan çözünmüş maddeler suyun buhar basıncında azalmaya sebep olur ve bu durum suyun gıdadan uzaklaştırılmasına negatif bir etki yaratmaktadır. Şeker, tuz gibi çözünmüş molekülleri barındıran gıdalar içerisinde bu molekülleri barındırmayan gıdalara göre daha uzun sürede kurumaktadır. Aynı şekilde içerisinde yağ oranı yüksek olan, nişasta ve pektin içeren ürünlerde de kuruma işlemi daha zor gerçekleşmektedir (Tamer, 2017).

Kurutma sıcaklığı: Verimli bir ısı transferi gerçekleşmesi için gıdanın sıcaklığının düşük ve kurutma sıcaklığının yüksek olması gerekmektedir. Kurutma sıcaklığının

yüksek ve gıda sıcaklığının düşük olduğu durumlarda ısı transfer hızı o derece etkili olmaktadır (Geniş, 2022).

Kurutma işlemi esnasında kullanılan sıcak havanın artması durumunda havada su buharı tutma miktarı artmaktadır. Bu sayede iç taraftan dış kısımlara doğru ısı aktarım hızı yükselmektedir. Aktarım hızındaki yükselmeye doğru orantılı olarak ısı aktarım hızı yükselmektedir. Ancak bu durum her zaman gıdalar için olumlu etki bırakmamaktadır. Her gıdanın kurutulacağı optimum bir sıcaklık aralığı bulunmaktadır. Bu parametrelerin üstüne çıkılması gıdada negatif bir etki bırakabilmektedir. Beklenen sıcaklığın üzerine çıkıldığında gıdada renkte değişimi, olası çatlama ve büzüşme gibi kusurlar oluşabilmektedir. Diğer yönden gıdanın düşük sıcaklıklarda kurutma işlemine tabi tutulduğu durumda gıdanın kalitesinde artış olmasına rağmen kuruma süresi normalin üstünde bir grafik gösterecektir. Bu durumlardan ötürü gıdanın en uygun şartlarda en doğru sıcaklıklarda kurutulması gerekmektedir (Uysal, 2019).

Kurutma havasının hızı: Gıdanın kurutma hızını etkileyen parametrelerden biri de kurutma havasının hızıdır. Havanın hızı yükseldikçe kurutma hızı da aynı şekilde yükselmektedir. Fakat bu etki bir noktaya kadardır. Kurutma işleminin başlarında havanın hızının etkisi yüksek olmasına rağmen kurutma ilerledikçe suyun iç yüzeylerden dış yüzeye taşınma hızı etkili olduğundan hava hızının etkisi düşüş göstermektedir (Kocayığit, 2010).

Yüzey alanı: Gıda kurutmada kurutma hızında önemli bir diğer parametrede yüzey alanıdır. Kurutma hızını yükselmesi için gıdanın yüzeyinde gerçekleşen ısı aktarımını arttırmak için gıda daha küçük parçalara veya dilimlere bölünerek kurutma hızını artırabilmek mümkündür. Ancak kurutma esnasında üründe yanma sorunu olmaması için gıda diliminin kalınlığı bu durum gözetilerek hesaplanmalıdır (Uysal, 2019).

3

PORTAKAL VE LİMON HAKKINDA GENEL BİLGİLER

3.1 Portakal

Portakal sahip olduğu tipik aroması, rengi ve tadı nedeniyle yaygın olarak tüketilen bir meyvedir. Bunun yanı sıra askorbik asit, karotenoidler, fenolikler ve mineraller gibi besin maddelerini yüksek oranda bulundurmaktadır. Taze, donmuş, kurutulmuş, konserve, reçel, meyve suyu ve nektar formlarında tüketilebilen bir meyvedir. Kurutulmuş haldeki portakal, sağlıklı bir atıştırılabilirlik, şekerleme ürünleri için katkı maddesi olarak kullanılabildiği gibi toz haline getirilip içecek olarak da tüketilebilmektedir (Özkan-Karabacak vd., 2020).

Portakal, yüksek C vitamini ve faydalı içeriği nedeniyle insanlar tarafından severek tüketilen meyvelerin başında gelmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA) verilerine göre 100 g portakalın bileşenleri ve bu bileşenlere ait miktarlar aşağıda Tablo 3.1’de sunulmuştur (U.S. Department of Agriculture, FoodData Central, Raw Lemon and Raw Orange, 2017).

Dünyada subtropik ve tropik iklim alanlarında yetişen bir meyve olan portakal için subtropik alanlar portakalın büyüüp gelişmesi için en uygun iklim kuşağı olarak bildirilmektedir. Subtropik iklim kuşağında yer alan ülkemizde de kaliteli portakal yetiştiriciliği yapılabilmektedir. Ülkemizde yoğun olarak Akdeniz Bölgesi’nde portakal üretimi yapılmaktadır. Hasat kasım ayı başı-mayıs ayı ikinci haftası arasında sürmektedir. Talebe bağlı olarak ürünlerin haziran sonuna kadar da ağaçta bırakılması durumu görülmektedir.

Tablo 3.1 Portakal (100 g) için temel bileşen, vitamin ve mineral miktarları

Bileşen	Yaklaşık miktarı
Su	86,7 g
Enerji	52 kcal
Karbonhidratlar	11,8 g
Şekerler (sükroz, glikoz, fruktoz)	8,57 g
Lif	2 g
Protein	0,91 g
Yağ	0,15 g
C vitamini	59,1 mg
B vitamini, toplam (tiamin, riboflavin, niasin, pantotenik asit)	0,88 mg
Kalsiyum	43 mg
Potasyum	166 mg
Fe	0,33 mg
Mg	10,7 mg
P	23 mg
Na	9 mg
Zn	0,11 mg
Mn	0,029 mg

Türkiye’de çoğunlukla sofralık tüketim için portakal üretimi yapılmaktadır. Ülkemizde üretilen portakal çeşitleri Washington Navel, Washington Navelina, Valencia, Taracco, Moro (Kan Portakalı), Shamoti (Yafa Portakalı), Hamlin, Alanya Dilimli, Kozan Yerli, Dört Yol Yerli ve Finike Yerli olarak sıralanabilir.

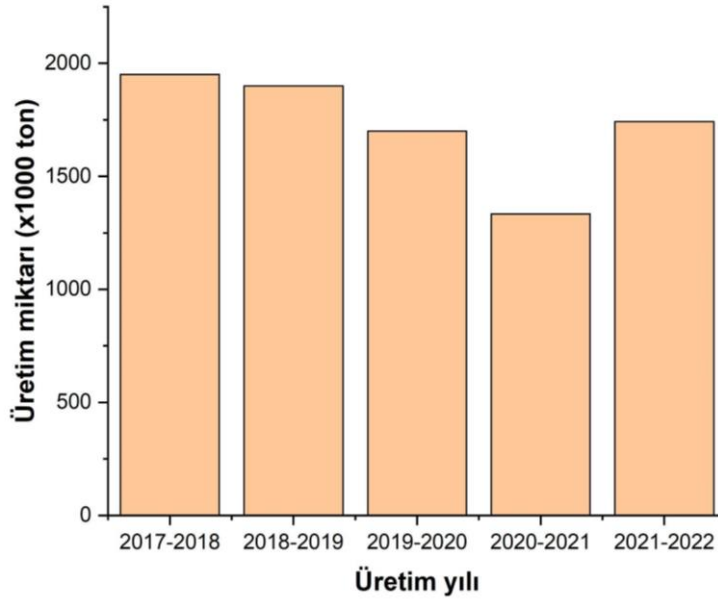
Portakal üretim sezonu Washington Navel grubu ile açılıp Valencia grubuyla kapanmaktadır. Diğer türler ise ihtiyaca bağlı olarak değişmekle birlikte nispeten daha az üretilmektedir. Ülkemizde ve dünyada yetiştirilen portakal çeşitlerinden bir kısmına ait meyve görüntüleri Şekil 3.1’de gösterilmektedir (Eryılmaz, 2020, Shukla,2018). Görüntüleri verilen bu portakal türleri soldan sağa sırası ile Washington Navel, Valencia Late, Midnight Valencia, Navelina, Finike Yerli, Batem Fatihi, Batem Şekeri, Batem Baharı, Fukumoto, Lane Late, Cara Cara Navel, Yafa olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.1 Farklı türdeki portakal meyvelerine ait görüntüler (Eryılmaz,2020)

Tarım ve Orman Bakanlığı’nın 2023 Temmuz Tarım Ürünleri Piyasa Raporu’na göre dünyada 2022/23 pazarlama yılında üretilen 100 milyon ton turunçgilin %47’sini portakalın oluşturduğu Brezilya, Çin ve AB’nin de önemli üretici ülkeler olduğu bildirilmiştir. Aynı raporda Türkiye’de portakal üretiminde en büyük pay sahibi illerin Antalya, Adana, Muğla, Hatay ve Mersin olduğu belirtilmiştir. 2017-2022 yılları arasında ülkemizdeki portakal üretiminin değişimi ise Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Ülkemizin 2022 yılı verilerine göre üretilen portakalın yaklaşık %85,8’i Rusya, Irak, Ukrayna, Suriye, Gürcistan’a; %14,2’si ise diğer ülkelere

ihraç edilmiştir. Aynı yıl %88,8'i Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nden olmak üzere Rusya ve Mısır'dan da portakal ithalatı yapılmıştır (Aygören, 2023).



Şekil 3.2 Türkiye’de portakal üretim miktarının yıllara göre değişimi

Portakal üreticilerinin bilinçsiz şekilde zirai ilaç/gübre kullanımı, hatalı budama yapılması, ülkemizde yetiştirilen portakal çeşitlerinin pazar talebini karşılayamaması, ürün çeşitleri belirlenmeden plansız üretim yapılması, yoğun üretim dönemlerinde soğuk hava depolarına ihtiyaç olması, meyve suyu işleme tesisi olmayan bölgelerde pazarlama da yapılamamışsa meyvelerin ağaç üstünde bırakılması portakal yetiştiriciliğinde karşılaşılan başlıca sorunlar olarak sıralanabilir. Pazar ihtiyacı ve karşılaşılan sorunların birlikte değerlendirilmesi ve gelecekteki durumu için strateji oluşturulması gerekmektedir (Eryılmaz, 2020).

3.2 Limon

Sarı renkli, sulu ve asidik bir meyve olan limon oval veya elips şeklinde ince kabukludur. Tadı ekşi ve ferahlatıcıdır. Güneydoğu Asya'nın Himalaya dağları çevresinde doğal olarak yetişmektedir. Ancak günümüzde dünya genelinde pek çok iklimde yetiştirilmektedir. C vitamini, folat, potasyum, lif ve az miktarda vitamin ve mineraller bakımından zengindir. Antioksidan özelliklere de sahip olduğu bilinmektedir. C vitamini sayesinde bağışıklık sistemini güçlendirirken antioksidan

özellikleri sayesinde de hücreleri korur ve sindirim sistemini destekler. Genellikle yemeklerde, içeceklerde, tatlı ve salatalarda kullanılır. Limon suyu, içeceklerde ve bazı tariflerde ekşi tat ve tazelik katmak için de kullanılabilir. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA) verilerine göre 100 g limonun bileşenleri ve bu bileşenlere ait miktarlar Tablo 3.2’de verilmiştir (U.S. Department of Agriculture, 2017).

Tablo 3.2 Limon (100 g) için temel bileşen, vitamin ve mineral miktarları

Bileşen	Yaklaşık miktarı
Su	88,98 g
Enerji	29 kCal
Protein	1,1 g
Toplam yağ	0,3 g
Karbonhidrat	9,32 g
Lif	2,8 g
Şeker	2,5 g
C vitamini	53 mg
B vitaminleri (Tiamin, riboflavin, niasin, B-6)	0,24 mg
E vitamini	0,15 mg
Potasyum	138 mg
Folat	11 µg
Demir	0,6 mg
Magnezyum	8 mg
Fosfor	16 mg
Sodyum	2 mg
Çinko	0,06 mg
Kalsiyum	26 mg

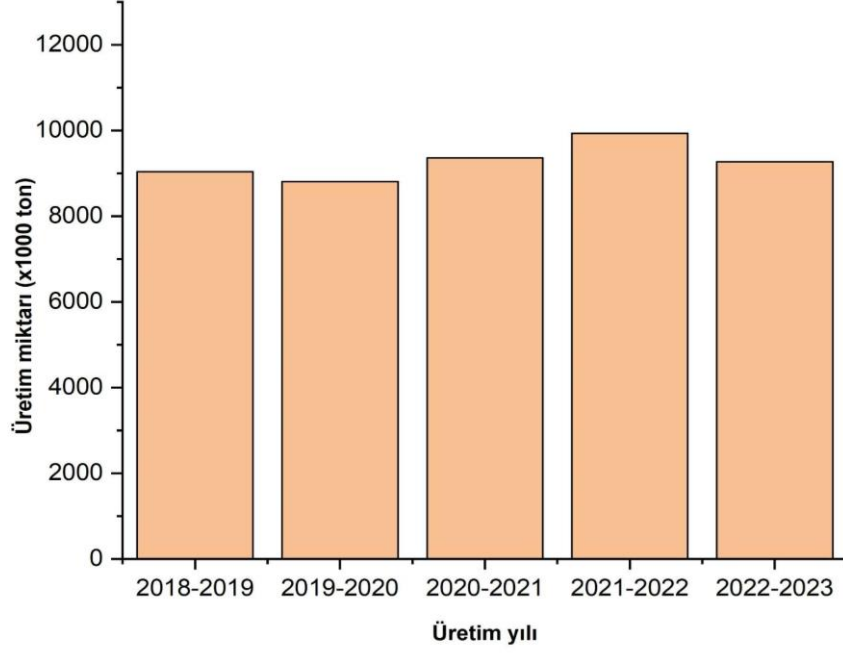
Limon, özellikle subtropik iklim kuşağına iyi uyum sağlayan bir üründür. Yüksek kalitede ürün elde edilebilmesi için uygun iklim ve toprak koşullarında yetiştiricilik

yapılmalıdır. Düşük sıcaklık, kurak rüzgâr ve rutubet olumsuz yönde etkilemektedir. Ülkemizde genellikle Akdeniz ve Ege Bölgelerinde iklimin uygun olduğu alanlarda yetiştirilmektedir. Finike, Erdemli, Silifke ve Mersin ülkemizde limon yetiştirilmesine elverişli yerler olarak dikkat çekmektedir. Her bölge kendine ait çeşitlerle özdeşleşmiştir. Kütdiken, Lamas, Meyer, İtalyan memeli, Interdonato limonları Doğu Akdeniz’de; Karalimon, Meyer ve Interdonato Batı Akdeniz Bölgesi’nde üretilmektedir. Farklı limon çeşitlerine ait resimler Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Ülkemizde limon çoğunlukla taze şekilde tüketilmektedir, ancak diğer formları da kullanılmaktadır (Demir, 2020). Şekil 3.3’te görüntüleri verilen limon türleri soldan sağa sırasıyla Interdonato, Karalimon, Meyer, Kütdiken, Lamas, BATEM sarısı, BATEM pınarı, Kıbrıs çeşidi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.3 Farklı limon çeşitlerine ait görüntüler (Demir, 2020)

Tarım ve Orman Bakanlığı’nın 2023 Temmuz Tarım Ürünleri Piyasa Raporu’na göre Türkiye’de limon üretimi 2021/22 piyasa yılında önceki yıla göre %30 artış göstermiştir. 2022 yılında limon üretiminde en yüksek paya sahip olan illerimiz Mersin, Adana, Hatay, Muğla ve Antalya olarak bildirilmiştir. Üretilen limonlar yine 2022 yılında Irak, Rusya, Romanya, Ukrayna ve Polonya ağırlıklı olmak üzere diğer ülkelere ihraç edilmiştir. Kıbrıs, Brezilya ve Romanya başta olmak üzere başka ülkelere ise limon ithalatı yapılmıştır. Ülkemizde üretilen limonların yıllara göre miktarı Şekil 3.4’te verilen grafikte sunulmuştur. (Aygören, 2023).



Şekil 3.4 Türkiye’de limon üretim miktarının yıllara göre değişimi

3.3 Kurutulmuş Portakal ve Limonun Kullanım Alanları

Kurutulmuş portakal ve limon gıda ve içecek endüstrisinde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Tatlandırıcı, aroma verici ve koruyucu özelliklerinden dolayı farklı ürünlerde uygulama alanı bulmaktadır. Yapılarında doğal şeker içerdikleri için tatlandırıcı olarak kullanılan bu meyveler yoğun ve karakteristik aromaları sayesinde gıda ve içeceklere lezzet katmak amacıyla da kullanılırlar. Kuruyemiş karışımlarında, enerji barlarında ve atıştırmalıklarda tercih edilebilirler. İçecek endüstrisinde ise özellikle çay, soda, kokteyller ve likörlerde aroma verici olarak kullanılırlar. Tatlı ve pastacılık alanında tatlı, kek, kurabiye, dondurma hazırlamasında kullanılan kurutulmuş limon ve portakal üretilen ürünlere doğal bir narenciye aroması eklemektedir. Kurutulduktan sonra öğütülen portakal ve limon kabukları baharat karışımlarına eklenebilir. Reçel ve marmelat üretiminde doğal bir aroma verici ve asit kaynağı olarak rol alabilir. İçerdikleri C vitamini ve lif nedeniyle sağlıklı yaşam prensibine sahip olan insanlar atıştırmalık olarak kullanabilir ya da farklı tariflerle tüketebilirler. Burada sunulan kullanım alanları, kurutulmuş portakal ve limonun oldukça geniş bir şekilde değerlendirildiğini

göstermektedir. Günümüzde doğal ve sağlıklı içeriklere ilginin artması nedeniyle bu tipteki doğal ürünler daha popüler hale gelmektedir.

Aromaterapi uygulamalarında uçucu yağ, banyo tuzu ve yağı, masaj yağı ve oda spreyi olarak kullanılabilir. Dekoratif amaçlı olarak düğün süslemelerinde, çelenklerde, duvar süslemelerinde, masa dekorasyonunda, yılbaşı süslemelerinde, çiçek düzenlemelerinde uygulama alanına da sahiptir.

3.4 Portakal ve Limon Kurutulmasındaki Zorluklar

Kurutma işlemi meyvelerin kullanım ömrünü artırıyor olsa da kurutma sürecinde bazı zorluklar ile karşılaşmaktadır. İyi bir kurutma işlemi için uygun hava koşullarının, nem ve sıcaklık değerlerinin sağlanması önemlidir. Kurutma öncesi meyvelerin eşit kalınlıkta olması ürünlerin homojen şekilde kurummasını sağlamaktadır. Bu nedenle düzgün bir şekilde eşit kalınlıkta kesilmeleri gerekir. Nemli ortam kuruma aşamasında küf ve çeşitli mikroorganizmaların üremesine neden olacağı için hijyenik bir ortam sağlanması ve dilimlerin düzenli olarak kontrol edilmesi gereklidir. Kurutma ile ürünler orjinal ve ilgi çekici olan renklerini ve tatlarını kaybedebilirler. Bu nedenle taze haldeki renk, koku ve lezzetini koruyan uygun yöntemler kullanılarak kurutulmalıdırlar. Ayrıca endüstriyel ölçekte yapılan kurutma işlemlerinde bazı kurutma yöntemleri yüksek enerji maliyetine yol açabileceği için yöntem seçiminde maliyet de dikkate alınmalıdır.

Kurutulduktan sonra elde edilen ürünlerin ambalajlanması ve depolanma koşulları da raf ömrünü etkilemektedir. Öncelikle ürünün özelliklerini koruyacak özellikte ambalaj malzemeleri tercih edilmelidir. Kurutulmuş meyveler nem ile temas ettiğinde küflenme riskine sahiptir. Bu nedenle kuru ve serin alanlarda depolanmaları gerekmektedir. Oksijen ile temas ettiklerinde renk, lezzet ve besin değerini kaybedecekleri için vakumlu ambalajlarda veya sıkı kapatılmış kaplarda saklanması önerilmektedir. Ürünün saklandığı veya depolandığı alanlarda sıcaklık kontrolü düzenli olarak yapılmalıdır. Aksi halde yaşanan ve fark edilmeyen sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle ürünün raf ömrü olumsuz olarak etkilenebilir. Diğer parametrelere benzer olarak ışığa maruz kalmaları durumunda da kurutulmuş portakal ve limon renk ve tat özelliklerini kaybedebilir. Işık geçirmeyen ambalajlarda saklanması gerekir. Bunlara ek olarak kurutulmuş olan bu meyveleri

korumak ve raf ömrünü uzatmak için bazı üreticiler antioksidanlar veya koruyucu maddeler eklemektedir. Ancak bu tipteki ek maddelerin kullanılması bazı düzenlemelere tabiidir (Nijhuis, 1998; Gvozdenović, 2007).



PORTAKAL VE LİMON KURUTMA HAKKINDA LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

4.1 Portakal Kurutulması Hakkında Literatür Araştırması

Doymaz (2022) tarafından infrared kurutucuda gerçekleştirilen bir çalışmada, kurutucunun güç seviyeleri değiştirilerek (62, 74 ve 88 W) portakal dilimlerinin kurutulması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kuruma süresi, renk ve rehidrasyon özelliklerinin infrared güç seviyesinden büyük ölçüde etkilendiğini gösterdi. Kurutma verileri literatürde yer alan beş matematiksel modele uyarlanmış ve elde edilen istatistiksel verilere göre Midilli & Küçük modelinin, tüm kurutma koşulları için portakal dilimlerinin kuruma kinetiğini tatmin edici bir şekilde açıkladığı bulunmuştur. Portakal dilimlerinin efektif nem difüzivitesi değerlerini hesaplamak için Fick'in 2. difüzyon modeli kullanılarak hesaplandı ve bu değerler $1,59 \times 10^{-10}$ ila $2,49 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişmektedir. İnfrared güç seviyesi artmasıyla D_{eff} değerinin arttığı tespit edildi. Aktivasyon enerjisi, modifiye edilmiş Arrhenius denklem ile 2,11 kW/kg olarak hesaplandı. IR güç seviyesinin arttıkça rehidrasyon oranının azaldığı görüldü. Ayrıca IR güç seviyesinin artmasıyla a ve ΔE renk değerleri artmış, buna karşılık L, b ve C değerleri azaldığı görülmüştür.

Garau vd. (2006) yaptığı farklı bir çalışmada, kurutma hava sıcaklığının kurutma kinetiği ve kurutulmuş portakal kabuğunun fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkisi incelendi. Denemeler iki set halinde uygulanmıştır. İlk sette daire şeklinde 3 cm çapta kesilen portakal dilimleri 30, 50, 70 ve 90°C sıcaklıkta kurutulmuştur. İkinci sette ise 3 cm çaptaki portakal dilimleri 40, 60 ve 80°C'de kurutulurken 4 cm çaptaki portakal dilimleri 50°C'de kurutulmuştur. Çalışmada bir difüzyon modeli önerilmiş ve deneysel veriler kullanılarak modelin uygunluğu test edilmiştir. Fonksiyonel özellik olarak su tutma kapasitesi ve yağ adsorpsiyon kapasitesi ölçülmüştür. Su tutma kapasitesi ve yağ adsorpsiyon kapasitesi özelliklerinin numune boyutu küçüldükçe arttığını, kurutma işlemi 40-50°C'de yapıldığında bu özelliklerin daha yüksek değerlere ulaştığını belirlemişlerdir.

Diaz vd. (2003) yaptıkları bir çalışmada, mikrodalga ve sıcak havayla kurutma yöntemlerini birlikte kullanarak portakal dilimlerinin kurutma kinetiğini analiz etmeyi, modellemeyi ve farklı koşullar altında elde edilen ürünlerin rehidrasyon kinetiğini ve özelliklerini belirlemeyi hedeflemişlerdir. Mikrodalga ve 60°C sıcak hava ile kurutma birlikte kullanıldığında, mikrodalga seviyesi düşük olmasına rağmen portakal dilimlerinin kurutma süresinde keskin bir azalış olduğu görülmüştür. Uygulanan mikrodalga gücü ile kinetik sabitler doğrusal olarak artarken kritik nem içeriğine ulaşmak için gereken süre ters orantılı olarak azalmıştır. Ayrıca rehidrasyon davranışları uygulanan mikrodalga gücüyle farklılık göstermemiştir. Bu nedenle, kuruma süresini azaltmak amacıyla portakal dilimlerinin kahverengileşmesini önlemek için sınırlandırılan en yüksek seviye tespit edilmiştir.

Rafiee vd. (2010), konveksiyonla kurutma sırasında portakal dilimlerinin efektif nem difüzivitesini ve aktivasyon enerjisini hesapladıkları bir çalışma yapmışlardır. Kurutma havası sıcaklığı ve hava hızındaki artış efektif nem difüzivitesini artırırken portakal dilimi kalınlığının bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir.

Alibas vd. (2021) tarafından portakal dilimlerinin nem miktarının azaltılması amacıyla yapılan bir çalışmada, mikrodalga kurutma ve konvektif kurutma yöntemleri kullanmışlardır. Konvektif kurutma denemeleri 50, 75, 100 ve 125°C’de gerçekleştirilirken, mikrodalga ile kurutma denemeleri 90-1000 W aralığından sekiz farklı güç değeri kullanılarak uygulanmıştır. Kurutma denemeleri sonucunda her iki yöntemde tespit edilen deneysel verilerin Henderson & Pabis modeli ile uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmanın sonunda kurutma ve kalite parametreleri bakımından 350 ve 500 W ile yapılan kurutmanın en uygun yöntem olduğunu raporlamışlardır.

4.2 Limon Kurutulması Hakkında Literatür Araştırması

Wang vd. (2018) çalışmasında, kurutma sıcaklığının (60, 65, 70 ve 75°C) limon dilimlerinin kuruma özellikleri, büzülme, rehidrasyon kinetiği, mikroyapı ve renk profilleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kurutmada kullanılan sıcaklığın 60°C’den 75°C’ye çıkarılması ile kurutma için harcanan sürenin 5 saat kısaldığı belirtilmiş,

kurutma sıcaklığının limon örneklerinin hacmini ve kalitesini etkilediği eklenmiştir.

Papoutsis vd. (2017), dondurarak kurutma, sıcak havayla kurutma ve vakumla kurutma yöntemlerini kullanarak limon dilimlerini kurutmuşlardır. Elde edilen kurutulmuş limondaki polifenol ve antioksidan kapasitesi üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Dondurarak kurutma yöntemine kıyasla diğer iki yöntem ile kurutulan portakal dilimlerinin toplam fenolik içeriğinin ve antioksidan kapasitesinin daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Xu vd. (2022), sıcak havayla kurutma, mikrodalga ile kurutma, vakumla kurutma ve mikrodalga vakum kurutma yöntemlerinin limon dilimlerinin kalitesi üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Toplam fenol ve askorbik asit içerikleri, kahverengileşme, şeker içeriği, uçucu bileşen ölçümü gibi parametreler kurutma işlemleri sonrasında incelenmiştir. İncelenen bu parametreler açısından mikrodalga vakum kurutma yönteminin kullanılan diğer üç yöntemden daha üstün olduğu görülmüştür. Mikrodalga vakum kurutma ile kurutulan örneklerin kahverengileşme derecesi en düşük olurken sıcak havayla kurutma yöntemiyle kurutulan limon dilimlerinde kahverengileşme derecesi en yüksektir. Sonuç olarak, mikrodalga vakum kurutma yöntemi, geleneksel kurutma teknolojilerinin yerine kullanışlı bir alternatif olarak önerilmiştir.

Darvishi vd. (2014) çalışmalarında ise limon dilimlerinin kurutma özellikleri ve renk değişimi üzerinde mikrodalga-konvektif ısıtmanın etkisini incelemiştir. Kurutma denemelerinin 180-720 W aralığında ve 22°C'deki 1 m/s hava hızıyla yapıldığı çalışmada efektif nem difüzyon hızı değerlerinin $1,87 \times 10^{-8}$ ve $3,95 \times 10^{-8}$ m²/s aralığında olduğu bulunmuştur. Aktivasyon enerjisi ise 10,91 W/g olarak tespit edilmiştir. 180 W'den 720 W'ye çıkıldığında limon örneklerinin kuruma süresi 5,5 dakikadan 3,25 dakikaya düşerken, ortalama kuruma hızı 1,2-1,9 kg su/ (kg kuru madde × dak) aralığında değişmiştir. Kurutma verileri literatürde mevcut olan altı matematiksel modele (Newton, Henderson & Pabis, Wang & Singh, logaritmik, Page ve Midilli & Küçük) uygulandığında limon dilimlerinin kurutma kinetiğine en iyi uyum sağlayan modelin Midilli & Küçük modeli olduğu beyan edilmiştir.

Harchegani vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen ve literatürde yer alan çalışmada, kurutma sıcaklığının limon dilimlerinin kuruma davranışı ve kütle transfer parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kurutma deneyleri laboratuvar tipi havalandırılmalı fırında 50, 60 ve 75°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Kurutma sıcaklıklarının kurutma süresi ve kurutma hızını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Efektif nem difüzivitesi $1,62 \times 10^{-11}$ ve $8,11 \times 10^{-11}$ m²/s arasında değişirken, konvektif nem transfer katsayısı değerlerinin $5,71 \times 10^{-7}$ - $2,53 \times 10^{-6}$ m²/s aralığında olduğu bulunmuştur. Aktivasyon enerjisi 60,08 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Simülasyon için sekiz ince tabaka modeli kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve Midilli & Küçük modeli deneysel kurutma eğrilerinin en iyi uyumu gösterdiği belirlenmiştir.

Salehi vd. (2018), infrared ve vakum kurutma yöntemlerini birlikte kullanarak limon dilimlerini kuruttıkları çalışmalarında nem kayıp kinetiğini ve numunelerdeki renk değişimlerini incelemişlerdir. İki yöntemin kombine olarak kullanılması sayesinde limon dilimlerinin kuruma süresinin azaldığı bulunmuştur. Limon dilimlerinin kuruma davranışının kuadratik modelle uyumlu olduğu belirlenmiştir. İnfrared lambasının gücünün 300 W'tan 400 W'a çıkması ile efektif nem difüzivite değerinin $2,92 \times 10^{-10}$ m²/s'den $1,58 \times 10^{-9}$ m²/s'ye çıktığı tespit edilmiştir. Kurutma sırasında kullanılan infrared gücü ile sistem basıncının L, a, b gibi renk parametrelerini etkilediği belirlenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Materyal

Kurutma deneylerinde kullanılan ve Şekil 5.1’de gösterilen portakal ve limon numuneleri İstanbul'daki bir süper marketten günlük olarak satın alınmıştır. Denemede kullanılacak numunelerin yaklaşık olarak aynı boyut, şekil ve renkte olmasına dikkat edilmiştir. Deneyler başlayana kadar +4°C'deki bir buzdolabında saklanan portakal ve limonlar, deney öncesi oda sıcaklığı şartlarına ulaşması için 23°C'de bırakılmıştır. Deneylerde Washington cinsi portakal ve Lamas cinsi limon kullanılmıştır.

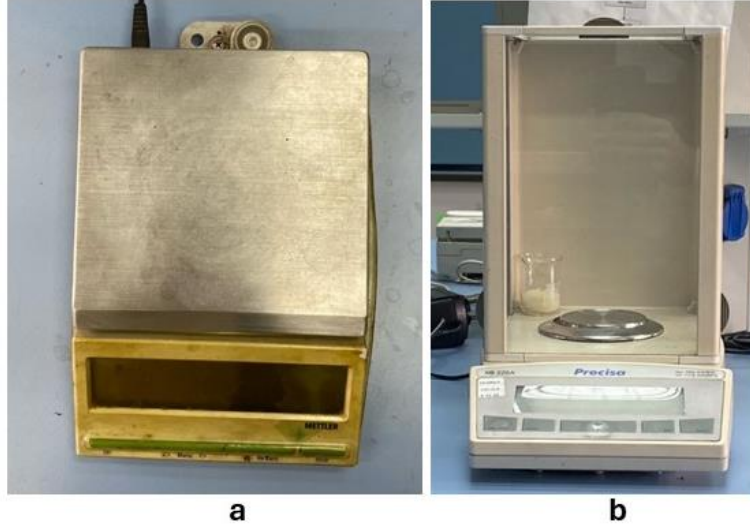


Şekil 5.1 Kurutma yapılan portakal ve limon numuneleri

5.2 Kullanılan Ekipmanlar

5.2.1 Kaba ve Hassas Teraziler

Portakal ve limon dilimlerinin yaş ve kuru tartımlarını ve deney anında gerekli olan tüm tartımlar alınması için Şekil 5.2’de gösterilen iki çeşit terazi kullanılmıştır. Hassasiyeti $\pm 0,1$ gram olan Mettler (İsviçre) marka terazi ile 3 kg’a kadar ölçüm alınabilmektedir. Daha hassas ölçümleri almak ve nem analizi tayininde kullanılan Precisa (İsviçre) markalı hassas terazi $\pm 0,0001$ hassaslığında ölçüm alınmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.2 a) Kaba terazi ve b) hassas terazi

5.2.2 Kabin Kurutucu

Portakal ve limon dilimlerinin kurutulması APV & PASILAC firmasının (İngiltere) ürünü olan kurutma kabininde gerçekleştirilmiştir. Cihazın sıcaklık ayarlaması sol üst tarafta yer alan dijital ekrandan takip edilerek ayarlanabilmektedir. Cihazın ulaşabildiği maksimum sıcaklık 200°C'dir. Deneylerde kullanılan kabin kurutma cihazının görünümü Şekil 5.3'te yer almaktadır.



Şekil 5.3 Kabin kurutucu

5.2.3 İnfrared Kurutucu

İnfrared (kızılötesi) kurutucu olarak Sneijders marka (Tillburg, Hollanda) ve Şekil 5.4'te gösterilen kurutucu kullanılmıştır. Cihaz 250 W gücünde bir halojen lambaya

sahip olup lamba ısı ışı ık kaynağı olarak çalışmaktadır. Cihazın sağ tarafında bulunan tuşlar ise cihazın açılıp kapatılması ve lambanın gücünün ayarlanması fonksiyonlarını sağlamaktadır.



şekil 5.4 İnfrared kurutucu

5.2.4 Etüv

Portakal ve limon dilimlerinin nem ve kuru madde miktarlarını tespit etmek için şekil 5.5'te gösterilen etüvden faydalanılmıştır.



şekil 5.5 Etüv cihazı

5.3 Yöntemler

5.3.1 Kabin kurutucu ile örneklerin kurutulması

Şekil 5.3'te verilen kurutucuda yapılan kurutma işlemi değişen sıcaklıklarda (45, 60 ve 75°C) gerçekleşmiştir. Öncelikle portakal ve limon örneklerinin üzerinde bulunan yabancı artıklardan gidermek için su ile yıkandıktan sonra kurulanmışlardır. Bu işlemden sonra örnekler kabukları soyulmadan bir bıçak yardımıyla dikkatli bir şekilde 0,7 cm kalınlığında dilimlenmişlerdir. Her deneyde yaklaşık 150 gram örnek kullanılmıştır. Deney süresince her 30 dakikada bir örneklerin ağırlıkları Şekil 5.2'de gösterilen kaba hassas terazi tartılıp kaydedilmiştir. Örneklerde bulunan nem miktarı %15 olana kadar kurutma işlemi sürdürülmüştür. Kuruyan örnekler soğuduktan sonra muhafazası için düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) torbalara konulduktan sonra torbaların ağzı ısı ile kapatılmıştır.

5.3.2 İnfrared kurutucuda örneklerin kurutulması

Portakal ve limon dilimleri ön işlemsiz bir biçimde infrared kurutucuya konulduktan sonra kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında her 15 dakikada örneklerin ağırlıkları kaydedilmiştir. Deneyler esnasında 38, 50 62 ve 74 W güç ayarında çalışılmıştır. Örneklerdeki nem içeriği %15'e ulaşınca dek kurutma işlemi kontrollü şekilde devam ettirilmiştir. Kurutma işlemi tamamlanan örnekler oda sıcaklığında soğuma işlemine bırakılmış ve ardından LDPE torbalara konularak, nem ve muhafazasını sağlamak amacıyla ağızları ısı yardımıyla kapatılmıştır.

5.4 Nem Tayini

Portakal ve limon numunelerinin nem miktarlarının belirlenebilmesi için darası önceden alınmış kapta, küçük dilimler halinde kesilmiş numuneler Şekil 5.5'te gösterilen 105°C'ye ayarlanmış etüvde sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Etüvden alınan örnekler desikatörde bekletilmesinin ardından hassas terazide tartımı alınmıştır. Denemeler sonucunda portakal ve limon numunelerdeki nem miktarları sırası ile %86,4 ve %82,7 olarak hesaplanmıştır.

5.5 Matematiksel Modelleme

Kurutma denemelerinde kullanılan ürünlerin nem içeriği kuru baza göre aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$M = \frac{m_w}{m_d} \quad (5.1)$$

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

Kurutma hızı ise (5.2) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$KH = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (5.2)$$

Burada, KH kurutma hızını [kg su/(kg kuru madde $\times$ dakika)], M_{t1} ve M_{t2} sırası ile t_1 ve t_2 anındaki su içeriğini ve t değeri süreyi göstermektedir.

Nemin oranı (MR) için (5.3) eşitliğinden faydalanılmıştır.

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

M_t t anındaki su miktarını, M_0 kurutma öncesinde üründe bulunan su ve M_e kurutma şartlarındaki havanın denge su miktarını temsil etmektedir. Denge su içeriği olan M_e , M veya M_0 'a göre düşük olması nedeniyle göz ardı edilmiştir.

Tablo 5.1 Kurutma eğrileri modellemek için kullanılan matematiksel denklemler

Model Adı	Denklem
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Lewis	$MR = \exp(-kt)$
Midilli & Küçük	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Vega & Lemus	$MR = \exp(a + bt)^2$

a , b , k ve n : Modellerin sabitleri ve katsayıları

Deneylerde bulunan değerlerden faydalanarak nem miktarının kurutma süresi ile olan ilişkisini tespit etmek amacıyla Tablo 5.1’de belirtilen matematiksel modeller teste tabi tutulmuş ve istatistiksel olarak mukayese edilmiştir.

5.6 Regresyon analizi

Deneyisel veriler, Statistica 8.0.550 (StatSoft Inc., ABD) yazılım paketi kullanılarak analiz edildi. Modellerin parametreleri, Levenberg-Marquardt algoritmasını temel alan doğrusal olmayan bir regresyon prosedürü kullanılarak test edildi. Deneyisel verilerin tüm modellere uyum kalitesi, regresyon katsayısı (R^2), khi-kare (χ^2) ve tahminin standart hatası (RMSE) değerleri kullanılarak denklemin uygun olduğu belirlenmiştir (Tunde-Akintunde ve Ajala, 2010).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (5.4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

Burada, MR_{exp} ve MR_{pre} deneyisel ve tahmin edilen nem oranlarını, N deneyisel veri sayısı ve n kullanılan denklemdeki katsayı sayısı olarak ifade edilmektedir.

Tahminin standart hatası, ampirik ve deneyisel değerler arasındaki sapmayı gösterir. Bu değer sıfıra yakın olması istenir. Ayrıca uyumun iyilik derecesini gösteren khi-kare değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir (Akpınar ve Biçer, 2003).

5.7 Difüzyon Katsayısının ve Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Farklı gıda maddelerinin ince tabaka halinde kurutulmasında en çok çalışılan teorik model, Fick'in ikinci yasasının çözümü ile verilmektedir. Üç boyutlu dikdörtgen koordinatlarda Fick yasası şu şekilde ifade edilebilir (Madhiyanon vd., 2009):

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

Kartezyen koordinatlar için difüzyon denkleminin (denklem 5.6) çözümü, Crank (1975) tarafından çözülmüş ve başlangıçtaki nem dağılımının ihmal edilebilir dış direnç, sabit difüzyon ve ihmal edilebilir büzülme ile tekdüze olduğu varsayılmıştır:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (5.7)$$

Bu denklemde, D_{eff} efektif nem difüzivitesi (m^2/s), L dilim yarı kalınlığı (m), t kurutma süresi (s) ve n pozitif tamsayıdır. Zaman arttıkça kuruma hızını ($n=0$) tahmin etmek için yalnızca ilk terim kullanılabilir ve ardından Denk. (5.7) şu şekilde dönüşür (Madamba, 2003):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (5.8)$$

D_{eff} değerleri, zamana karşı çizilen $\ln(MR)$ açısından deneysel kurutma verilerinin grafiğinin çizilmesiyle hesaplandı. Kurutma süresine karşılık $\ln(MR)$ grafiği çizilerek doğrunun eğiminden (K) elde edilir:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (5.9)$$

Denklem (5.9) kullanılarak efektif nem difüzivitesi belirlenebilmektedir.

Efektif difüzyon katsayısının sıcaklık ile değişimi Arrhenius tipi üstel bir fonksiyonla açıklanmaktadır (Sanjuán vd., 2003):

$$D_{eff} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R (T+273,15)} \right] \quad (5.10)$$

Burada D_{eff} efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), D_0 sonsuz sıcaklıkta difüziviteye eşdeğer bir sabit (m^2/s), E_a aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R evrensel gaz sabiti $\{8.314 \text{ kJ}/(mol \times K)\}$ ve T kurutma sıcaklığıdır ($^{\circ}C$).

Efektif difüzyon katsayısına sıcaklığın etkisi incelendiğinde bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden yararlanarak aktivasyon enerjisinin değeri hesaplanır (Mengeş ve Ertekin, 2007). Her iki kinetik parametre (E_a ve D_0), $1/(T+273.15)$ 'e karşı $\ln(D_{eff})$ grafiğinin eğiminden ve kesişme noktasından bulunabilmektedir.

Kurutma işlemleri infrared kurutucuda yapıldığında kurutucu içindeki sıcaklık belirlenemediği için aktivasyon enerjisinin hesaplanabilmesi amacıyla denklem (5.11)'de gösterilen modifiye edilmiş Arrhenius denklemi ifadesinden

yararlanılmıştır. Eşitlikte aktivasyon enerjisi ve efektif difüzyon katsayısı sıcaklık yerine infrared güç kaynağının kurutulmuş olan numune miktarı oranı ile bağdaştırılmıştır (Doymaz, 2013).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a \times m}{p}\right) \quad (5.11)$$

Yukarıda verilen denklemde “m” kurutulması istenen madde kütlesini (kg) ve “p” infrared kurutucunun gücünü (W) göstermektedir.

5.8 Renk Değerlerinin Hesaplanması

Kurutulmuş olan gıdalar için en önemli değerlendirme kriterlerinden birisi de renktir. Renk, gıdanın müşteri tarafından tercih edilmesi açısından oldukça önemlidir. Kurutulan gıdaların kurutma işlemi sonrasında son ürün kalite değerini muhafaza edebilmesi için ısıtım işlemi ardından ürünün renk değerlerine de dikkat edilmelidir. Sıcak havalı kabin ve infrared kurutucularda kurutulan portakal ve limon dilimlerinin L, a ve b değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Renk ölçümü için kullanılan cihaz Şekil 5.6’da gösterilen Konika Minolta marka kromametredir. Kurutulmuş portakal ve limon dilimlerinin renk ölçümleri dört farklı noktadan ölçülmüş ve kaydedilmiştir.



Şekil 5.6 Renk ölçer

Ölçülen L, a ve b değerleri yardımıyla (5.12) ve (5.13) denklemleri kullanılarak toplam renk farkı (ΔE) ve Kroma (C) değerleri hesaplanmıştır.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (5.12)$$

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5.13)$$

Burada; ΔE , toplam renk farkını; L_0 , a_0 ve b_0 , sırasıyla taze ürünün kurutma işleminden önceki renk parametrelerini ve L, a ve b, sırasıyla kurutma işleminden sonraki ürünün renk parametrelerini göstermektedir.

Kroma (C) renkte hâkim olan pastel ton ya da canlı tonu ifade etmektedir. Kroma değeri arttıkça rengin canlılığı artarken, buna karşılık kroma değeri azaldıkça renk donuklaşmaktadır. Diğer bir yandan, toplam renk farkı (ΔE) değeri arttıkça taze ürüne kıyasla renkte meydana gelen değişim de artmaktadır.

DENEYSEL SONUÇ VE ARAŞTIRMA

6.1 Portakal Dilimlerinin Kabin Kurutucuda Kurutulmasına Ait Sonuçlar

6.1.1. Kurutma eğrileri

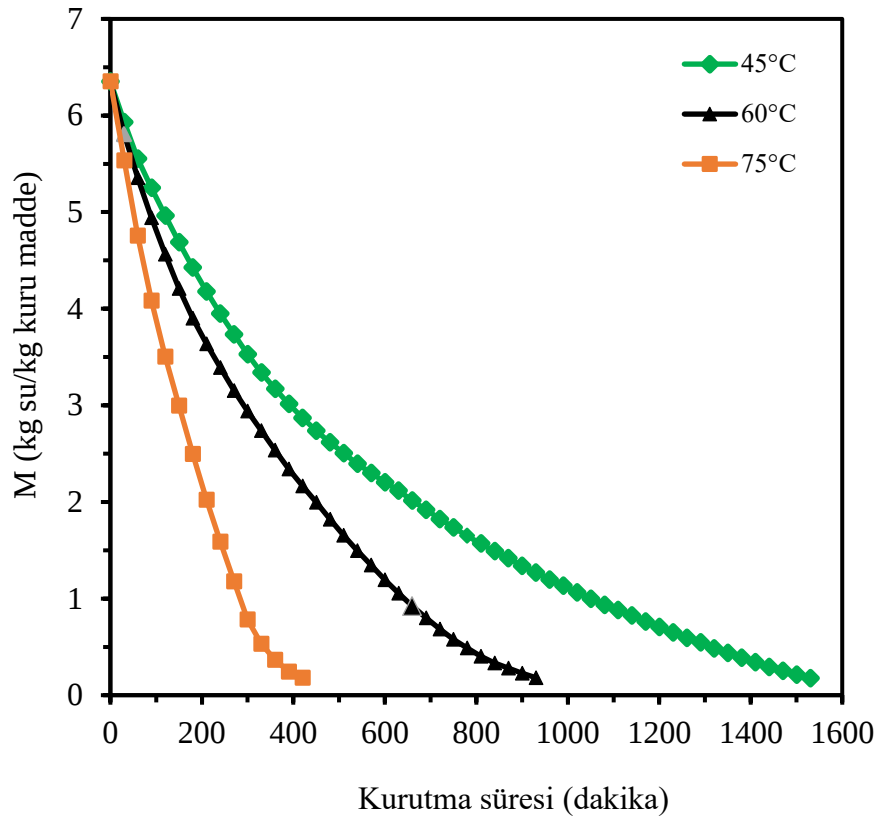
Portakal dilimlerinin kurutma karakteristiklerini belirlemek için 45, 60 ve 75 °C'deki $2\pm 0,1$ m/s hava hızında çalışılmıştır. Analizi gerçekleştirilen ürünün su miktarı %15'e düşene kadar kurutma işlemi sürdürülmüştür. Kurutma sürecinde 30 dakika zaman aralıklarında örnekler tartılmış ve kurutma süresine karşı nem içeriğini gösteren grafikler çizilmiştir. Portakal dilimlerinin kurutma süreleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Portakal dilimlerinin kuruma süreleri

Sıcaklık (°C)	Kuruma süresi (dakika)
45	1530
60	930
75	420

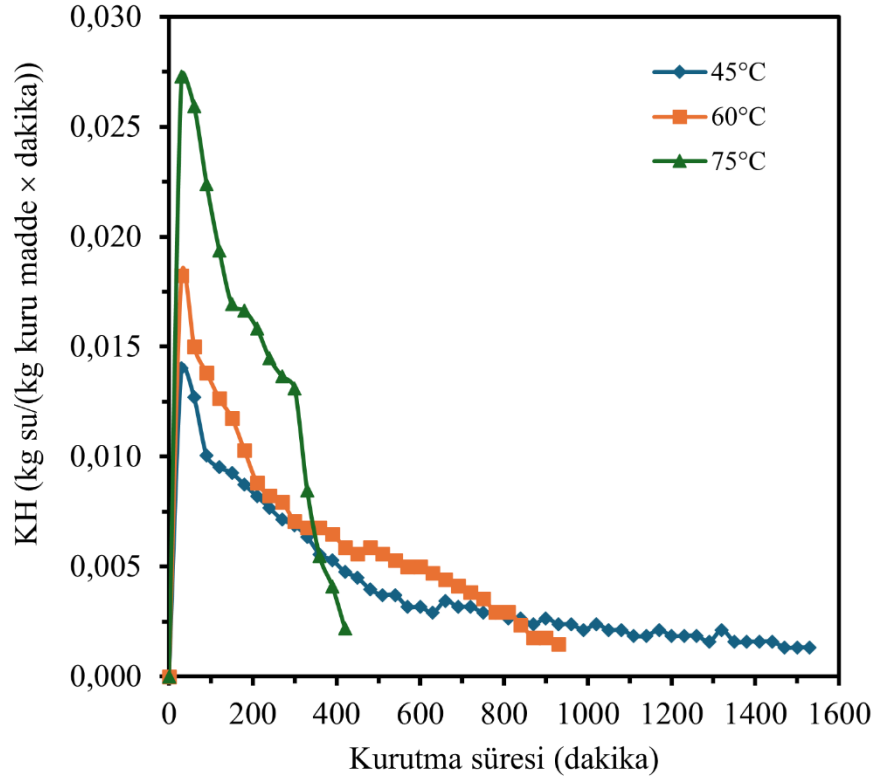
Tablo 6.1 incelendiğinde kurutma sıcaklığı arttıkça toplam kurutma sürelerinde azalma görülmektedir. Kurutma sıcaklığının artması ile nem kaybının artması sonucunda kuruma sürelerinde azalma meydana gelmektedir.

Şekil 6.1'de 45 ile 75°C arasında kurutulan portakal dilimlerinin kuruma süresinin bir fonksiyonu olarak nem içeriği ile ifade edilen deneysel kuruma eğrileri gösterilmektedir. Bu eğrilere göre kuruma süresi arttıkça nem içeriğinin katlanarak azaldığı gözlemlenmiştir. Kurutma sıcaklığının arttırılması hem nesne içindeki termal eğimin hem de ürünün buharlaşma hızının artması nedeniyle kuruma süresinin azalmasına neden olmuştur. Portakal ve diğer meyvelerin kurutulmasında da benzer bulgular rapor edilmiştir (Garau vd., 2006, Deng vd., 2020; Kayran ve Doymaz, 2021).



Şekil 6.1 Portakal dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri

Şekil 6.2'deki eğriler, portakal dilimlerinin kurutma süresine karşılık kuruma hızındaki değişimi göstermektedir. Şekildeki eğrilerde, portakal dilimlerinin kurutulmasında sabit hızlı bir periyot gözlemlenmemiştir. Kısa süren bir ısınma periyodunun ardından kuruma prosesi tamamen azalan hız periyodu ile gerçekleşmiştir. Bu, numunelerdeki nem hareketini yöneten baskın fiziksel mekanizmadaki difüzyonun olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, çeşitli ürünlere ilişkin daha önceki gözlemlerle iyi bir uyum içindedir (Zhu ve Shen, 2014; Garau vd., 2006; Demiray vd., 2023). Kurutma sırasında kurutma hızı, işlemin başlangıcında daha yüksek olduğu görülüp ve daha sonra örneklerdeki nem içeriğinin azalmasıyla birlikte azalma meydana gelmiştir.



Şekil 6.2 Kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi

6.1.2 Kurutma eğrilerin matematiksel modellenmesi

Farklı sıcaklıklar uygulanarak kurutulan portakal dilimlerine ait denklem (5.3) kullanarak elde edilen deneysel verilerin matematiksel modelleme çalışması Tablo 5.1’de bulunan kurutma modellerinin kullanılmasıyla yapılmıştır. Bulunan regresyon katsayıları (R^2), khi-kare (χ^2) ve tahmini standart hatası ($RMSE$) değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Kullanılan modellerin uygun olup olmadığı tespit edilirken R^2 değerinin yüksek, χ^2 ve $RMSE$ değerlerinin ise düşük olmasına dikkat edilmektedir (Sarsavadia vd., 1999). Regresyon katsayısı değerleri gıdanın kurutma eğrilerini tanımlayan en iyi kurutma modelini seçmek için temel kriter olarak görülmektedir. Tahmini standart hatası ($RMSE$), model ile elde edilen tahmini değerler ile deneysel bulgular arasındaki sapma değerlerini göstermektedir. Ek olarak khi-kare (χ^2) değerinde azalma olması ile uyumun arttığı şeklinde yorumlanmaktadır (Mengeş ve Ertekin, 2007).

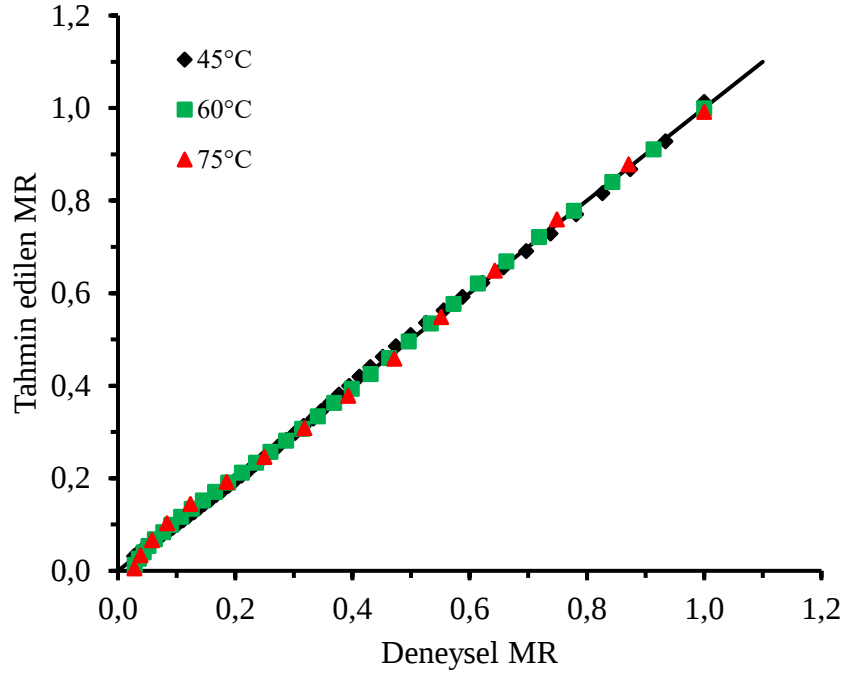
Tablo 6.2 Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş portakal dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler

T (°C)	Model	R ²	χ^2	RMSE
45	Henderson & Pabis	0,996397	0,000249	0,094592
	Lewis	0,995399	0,000312	0,113012
	Midilli & Küçük	0,999487	0,000036	0,035669
	Page	0,996194	0,000263	0,094246
	Wang & Singh	0,971885	0,001945	0,272408
	Vega & Lemus	0,981196	0,001301	0,209463
60	Henderson & Pabis	0,991398	0,000704	0,123660
	Lewis	0,991151	0,000701	0,119255
	Midilli & Küçük	0,999557	0,000038	0,027339
	Page	0,993644	0,000520	0,111129
	Wang & Singh	0,991474	0,000698	0,121009
	Vega & Lemus	0,995122	0,000399	0,084700
75	Henderson & Pabis	0,981209	0,001912	0,142597
	Lewis	0,977204	0,002165	0,155136
	Midilli & Küçük	0,999324	0,000068	0,026029
	Page	0,994496	0,000560	0,077020
	Wang & Singh	0,999321	0,000069	0,025878
	Vega & Lemus	0,998449	0,000184	0,039449

Tablo 6.2’de görüldüğü üzere test edilen modellerin R², χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla 0,971885-0,999557, 0,000036-0,002165 ve 0,025878-0,272408 aralığındadır. Midilli & Küçük modeline ait R² değerleri diğer modellerin değerleriyle kıyaslandığında daha yüksek olduğu görülmüş, buna karşılık χ^2 ve RMSE değerleri ise diğer modellere kıyasla daha düşük değerler gösterdiği için portakal dilimlerinin kuruma karakteristiklerini daha iyi açıkladığı saptanmıştır. Çetin (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, Midilli & Küçük modelinin portakal

dilimlerinin konvektif kurutmasını yeterli bir şekilde karakterize edildiğini tespit etmiştir.

Şekil 6.3'te verilen ve Midilli & Küçük modelini kullanarak kurutulmuş portakal dilimlerinin çeşitli sıcaklıklardaki deneysel ve tahmin edilen nem içerikleri karşılaştırılmıştır.

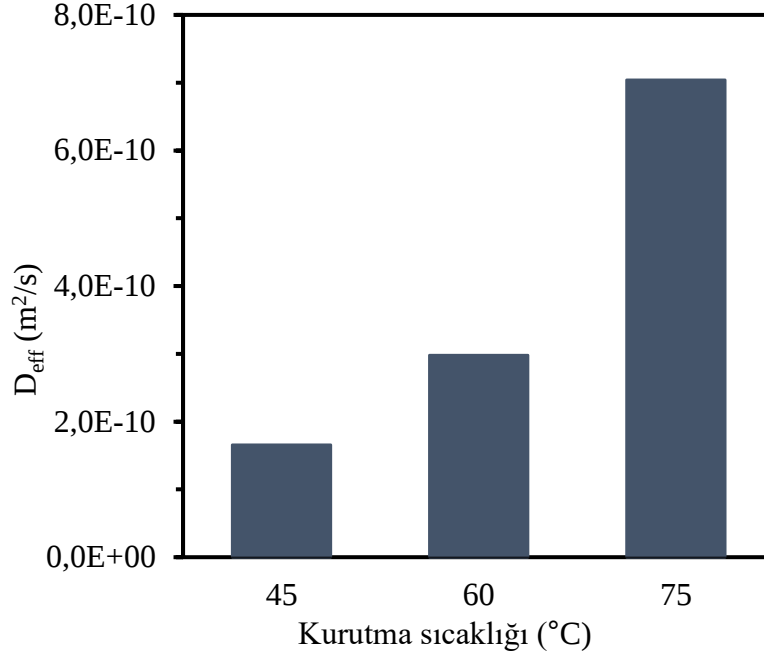


Şekil 6.3 Portakal dilimlerinin deneysel nem oranının tahmini nem oranı ile kıyaslanması

Grafik incelendiğinde veri noktaları 45° açılıklı düz bir çizgi etrafında yer almaktadır. Bu eğilim, modelin portakal dilimlerinin kuruma özelliklerini tahmin etmeye uygunluğuna dair ekstra kanıt sağlamaktadır.

6.1.3 Efektif nem difüzivitesi

Efektif nem difüzivitesi (D_{eff}) değerleri denklem (5.9) kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.4'te gösterilmektedir.

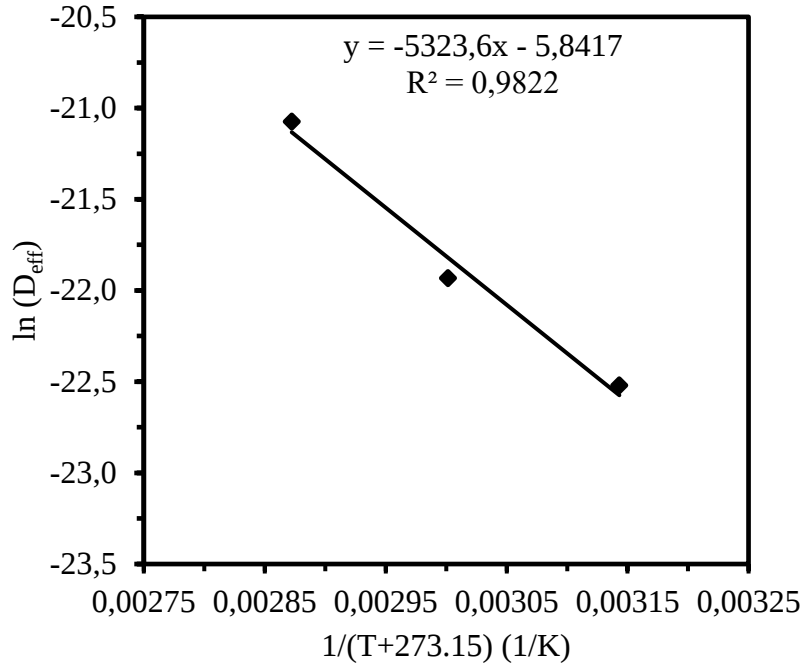


Şekil 6.4 Sıcaklığa karşı efektif nem difüzivite değerleri

Kurutma sıcaklığının artmasıyla D_{eff} değerlerinin büyük ölçüde arttığı görülmektedir. Numunelerin daha yüksek sıcaklıklarda kurutulduğunda, artan ısıtma enerjisi ile su moleküllerinin aktivitesini arttırdığı ve bu da daha yüksek nem difüzyonuna yol açtığı görülmüştür. 45-75°C arasında kurutulan örneklerin D_{eff} değerleri $1,65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $7,04 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişmektedir. Deneyler sonucu bulunan efektif difüzyon katsayıları, literatürde yer alan çeşitli gıdaların kurutulması için ifade edilmekte olan D_{eff} değerleri 10^{-12} ile $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında olduğu belirlenmiştir (Zogzas vd., 1996).

6.1.4 Aktivasyon enerjisi

Arrhenius sabiti (D_0) ve aktivasyon enerjisi (E_a), $\ln(D_{eff})$ ile $1/T$ grafiği çizilerek (Şekil 6.5) ve denklem (5.10) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.5 Efektif nem difüzyon hızı ile kurutma sıcaklığı arasındaki Arrhenius tipi ilişki

Denklem (5.10)'da sıcaklığın numunelerin D_{eff} üzerindeki etkisini aşağıdaki denklemle gösterilmektedir:

$$D_{eff} = 2,903 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{5323,6}{(T+273,15)}\right) \quad (R^2 = 0,9822) \quad (6.1)$$

Aktivasyon enerji ve D_0 değerleri sırasıyla 44,26 kJ/mol ve $2,903 \times 10^{-3}$ m²/s olarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisi için hesaplanan bu değer, literatürde yer alan gıda maddeleri için aktivasyon enerji değerleri olan 12,7-110 kJ/mol aralığında bulunmuştur (Zogzas vd., 1996).

6.1.5 Renk değerleri

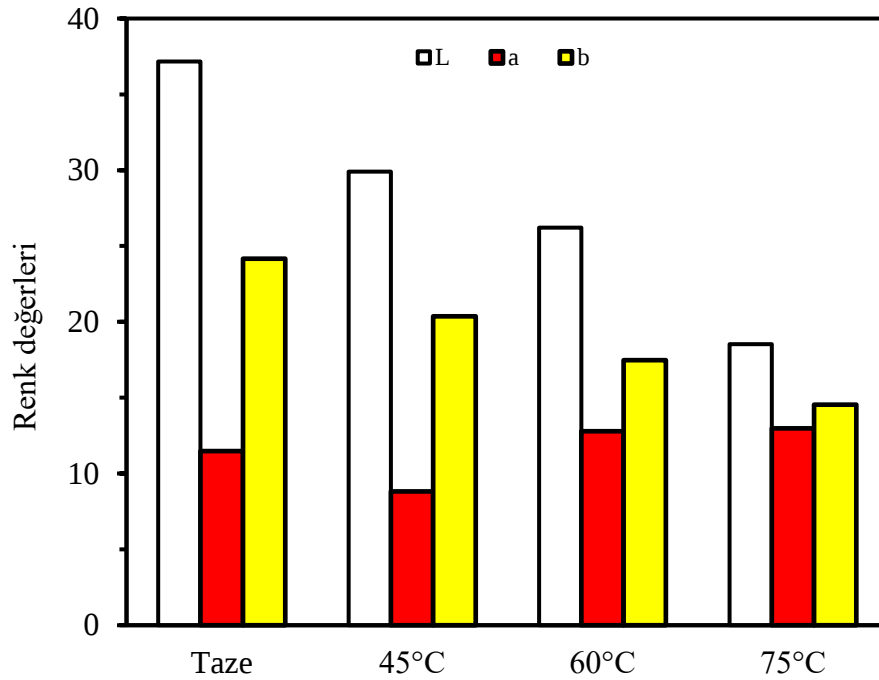
Kurutulmuş gıdalarda renk, kaliteyi etkileyen mühim bir unsur olduğu için kurutulduktan sonra gıdaların renk değerlerine dikkat edilmesi ve ürün kalitesinin muhafaza edilmesi gerekir.

Bu durumlar göz önüne alınarak sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan portakal dilimlerinin L, a ve b değerlerinin ayrı ayrı ölçümleri alınmış ve çıkan sonuçların taze portakal dilimlerinin aynı değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla kıyaslaması yapılmıştır.

Taze ve değişik sıcaklıklarda kurutulan örneklerin ortalama renk değerleri Tablo 6.3 ve grafiksel olarak Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Tablo 6.3’teki renk değerlerine göre taze portakal dilimlerinin ortalama L değeri 37,16 olarak, a değeri 11,49 olarak ve b değeri 24,16 bulunmuştur. Bu tabloya göre kabin kurutucuda kurutulan portakal dilimlerinin L değerleri 18,52 ile 29,91 arasında, a değerleri 8,83 ile 12,99 arasında ve b değerleri 14,54 ile 20,37 arasında değiştiiği tespit edilmiştir.

Tablo 6.3 Taze ve kurutulmuş portakal dilimlerinin renk analiz değerleri

	L	a	b	C	ΔE
Taze	37,16	11,49	24,16	26,75	--
45°C	29,91	8,83	20,37	22,20	8,60
60°C	26,22	12,78	17,48	21,65	12,88
75°C	18,52	12,99	14,54	19,49	21,03



Şekil 6.6 Taze ve kurutulmuş portakal dilimlerinin renk değerleri

Şekil 6.6 incelendiğinde, L parametresinin kurutma sıcaklığının artmasıyla birlikte azalma gösterdiği ve bundan dolayı renkte koyulaşma olduğu görölmektedir. a değerinin kurutma sıcaklık değerleri arttıkça yükseldiği ve bu sebepten

kırmızılığının artış gösterdiği sonucuna varılmaktadır. b değerinin ise kurutma sıcaklığı arttıkça azaldığı ve ürünün sarı renginin azaldığı görülmektedir. Toplam renk farkı (ΔE), gıdaların işlenmesi sırasında renk değişimini karakterize etmek için kullanılan bir parametredir. Kurutma sıcaklığına bağlı olarak ΔE değerleri artmaktadır. Sonuç olarak, kurutma sıcaklığının artışı ile “L”, “b” ve “C” değerleri azalma yönünde değişiklik gösterirken, buna karşılık “a” ve “ ΔE ” değerleri artmıştır.

6.2 Portakal Dilimlerinin İnfrared Kurutucu ile Kurutulmasına Ait Sonuçlar

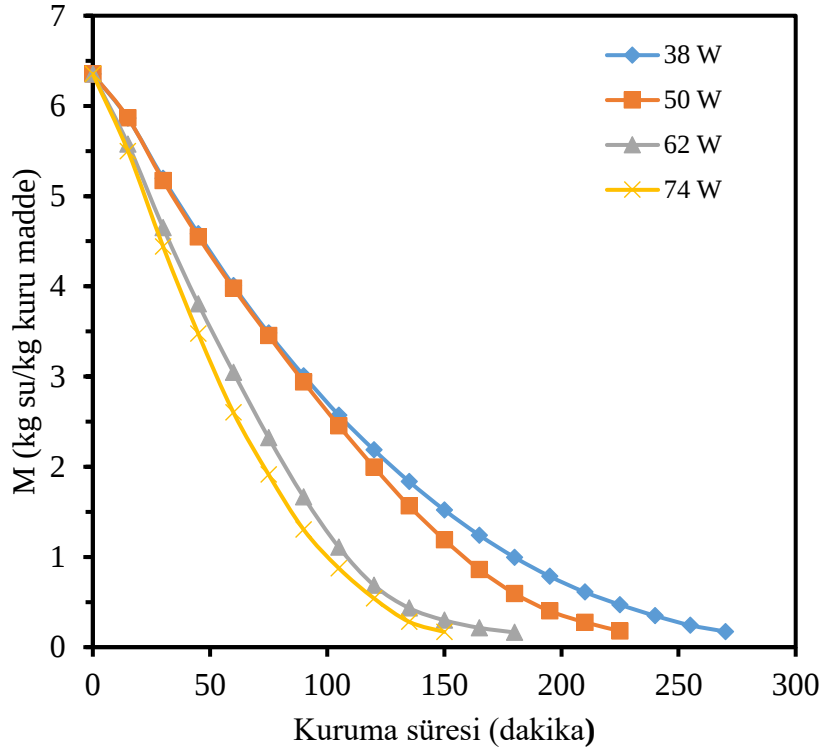
6.2.1 Kurutma eğrileri

İnfrared kurutucuda yapılan çalışmalarda portakal dilimleri 38, 50, 62 ve 74 W güç seviyelerinde kurutulmuştur. Kurutma işleminde kullanılan örneklerin nem seviyesi %15’e düşünceye kadar deney çalışmalarına devam edilmiştir. Her güç seviyesinde kurutulan örneklerin kuruma süreleri Tablo 6.4’te verilmiştir. Örneklerin kuruma süresine bağlı olarak nem içeriklerinin değişim eğrileri Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

Tablo 6.4 Portakal dilimlerinin infrared kurutucuda kurutma süreleri

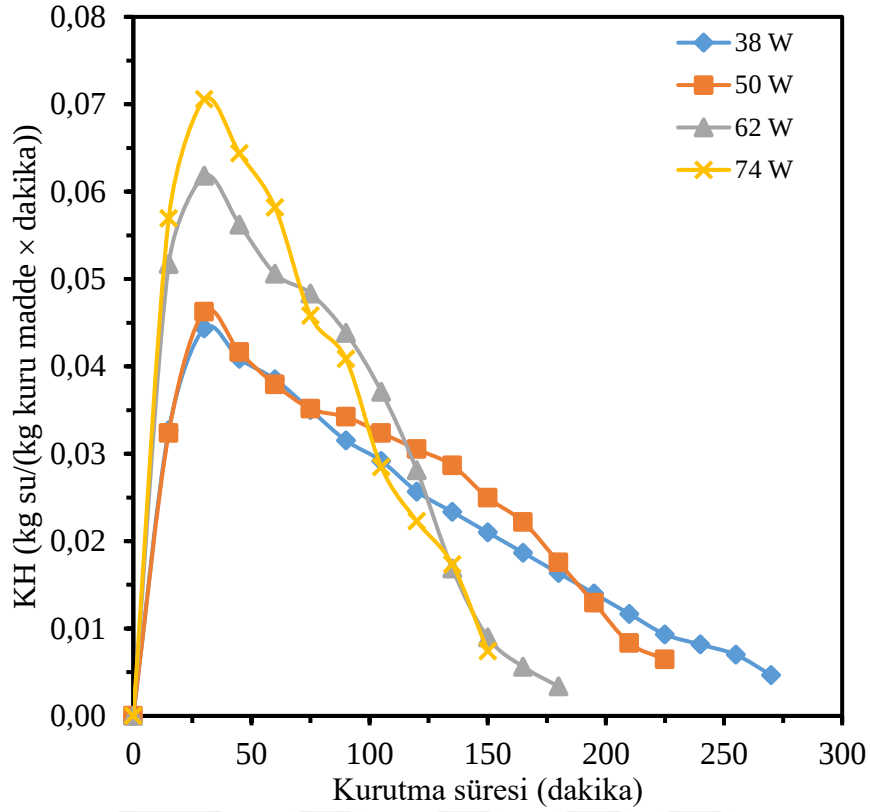
IR güç seviyesi (W)	Kurutma süresi (dakika)
38	270
50	225
62	180
74	150

Beklendiği gibi, kurutma havası ile numuneler arasındaki sıcaklık farkı, ısı transfer gradyanının artması nedeniyle güç arttıkça örneklerdeki nem içeriği giderek azaldı. Portakal dilimlerinin kuruma süreleri 38, 50, 62 ve 74 W’ta sırasıyla 270, 225, 180 ve 150 dakika olmuştur. IR güç seviyesinin artmasıyla numune sıcaklığı ve buharlaşma hızının artması nedeniyle portakal dilimlerinin kuruma süresinde düşme meydana gelmiştir. Buna benzer bir çalışmada Bozkır (2020) tarafından yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu çalışmada bulunan sonuçlarla örtüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6.7 Değişik IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimlerine ait su içeriğinin kuruma süresine bağlı olan değişimi

Kuruma hızı, birim zaman ve birim kuru baz başına uzaklaştırılan su miktarından belirlendi. Farklı IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimleri için kuruma hız eğrileri Şekil 6.8’de verilmiştir. Görülebileceği gibi, portakal dilimlerinin nem içeriği kurutmanın ilk aşamasında çok yüksektir. Kurutma ilerledikçe kurutma hızı değerleri düşmeye başlamıştır. IR güç seviyesinin artışı ile kurutma hızları da artmıştır. Ayrıca Şekil 6.8’de yer alan eğriler incelendiğinde kurutma işlemi kısa süren ısınma periyodunun ardından azalan hız periyodu koşullarında gerçekleşmiştir. Elde edilen eğrilerin sonucuna göre sabit debi periyodu gerçekleşmemiştir. Benzer çalışmalar literatürde de vardır (Darvishi vd., 2014; Xu vd., 2022).



Şekil 6.8 Değişik IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimleri için kurutma hızı eğrileri

6.2.2 Kurutma işleminin matematiksel modellenmesi

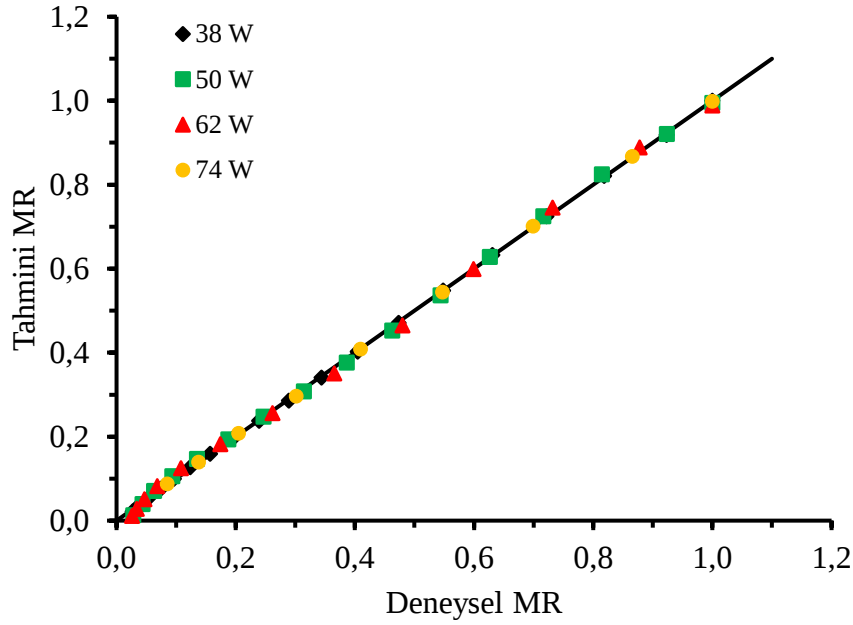
Farklı IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimlerine ait denklem (5.3) kullanarak elde edilen deneysel verilerin matematiksel modelleme çalışmasında Tablo 5.1’de bulunan kurutma modellerinin kullanılmasıyla yapılmıştır. Elde edilen R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri Tablo 6.5’te verilmiştir.

Tablo 6.5’te görüldüğü üzere test edilen modellerin R^2 , χ^2 ile RMSE verileri sırası ile olacak şekilde 0,962926-0,999915, 0,000010-0,002165 ve 0,009922-0,219274 arasındadır. Midilli & Küçük matematiksel modelinin R^2 ’leri diğer modellerin değerlerine kıyasla fazla olduğu görülmüş, buna karşılık χ^2 ve RMSE değerleri ise diğer modellere kıyasla düşük bulunmuştur. Bu sonuca göre Midilli & Küçük modelinin portakal dilimlerinin kuruma karakteristiğini daha iyi açıkladığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.5 İnfrared kurutucuda kurutulan portakal dilimleri için hesaplanan istatiksel veriler

p (W)	Model	R²	χ^2	RMSE
38	Henderson & Pabis	0,986919	0,001376	0,133523
	Lewis	0,980191	0,001967	0,167453
	Midilli & Küçük	0,999915	0,000010	0,010652
	Page	0,999028	0,000102	0,035868
	Wang & Singh	0,999442	0,000058	0,020913
	Vega & Lemus	0,998521	0,000155	0,043849
50	Henderson & Pabis	0,973216	0,003057	0,183546
	Lewis	0,962926	0,003950	0,219274
	Midilli & Küçük	0,999279	0,000096	0,029902
	Page	0,996753	0,000370	0,064230
	Wang & Singh	0,998189	0,000206	0,045799
	Vega & Lemus	0,998735	0,000144	0,037326
62	Henderson & Pabis	0,975650	0,003089	0,170305
	Lewis	0,967678	0,003759	0,191576
	Midilli & Küçük	0,998771	0,000190	0,037284
	Page	0,998326	0,000212	0,039438
	Wang & Singh	0,996959	0,000385	0,055371
	Vega & Lemus	0,997720	0,000289	0,051211
74	Henderson & Pabis	0,978688	0,002767	0,145504
	Lewis	0,971535	0,003326	0,158038
	Midilli & Küçük	0,999893	0,000017	0,009922
	Page	0,999286	0,000092	0,023758
	Wang & Singh	0,998020	0,000257	0,034605
	Vega & Lemus	0,998623	0,000178	0,034662

Şekil 6.9'ta verilen ve Midilli & Küçük modelini kullanarak kurutulmuş portakal dilimlerinin çeşitli IR güç seviyelerindeki deneysel ve tahmin edilen nem içerik değerleri karşılaştırmaktadır.



Şekil 6.9 Farklı IR güç seviyelerinde kurutulmuş numunelerin deneysel ve tahmini nem oranlarının kıyaslanması

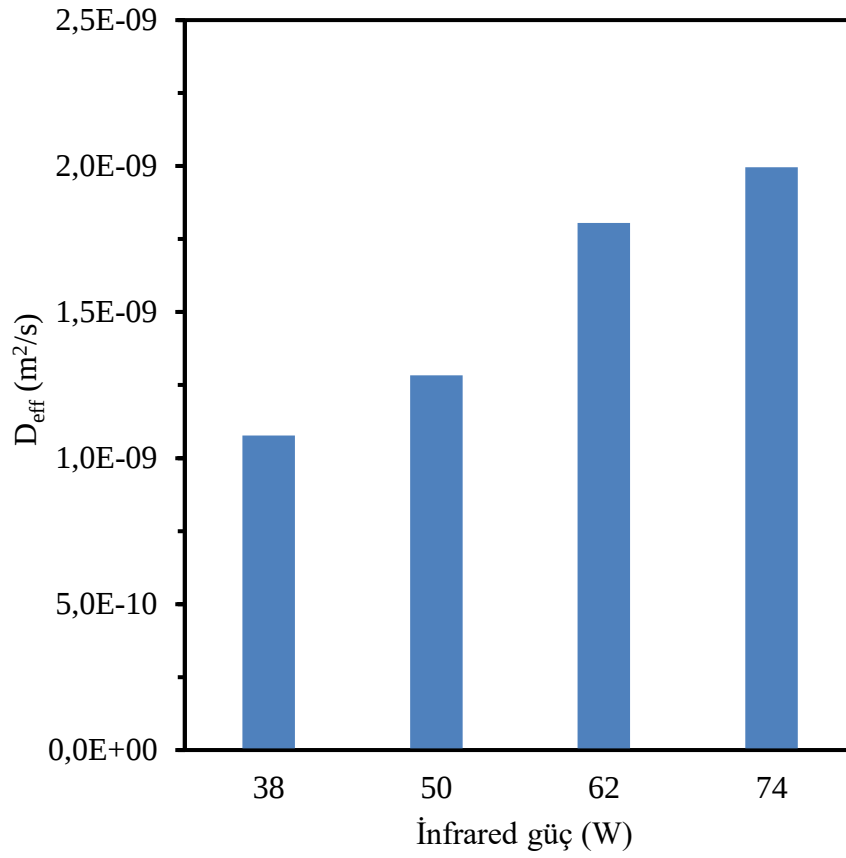
Deney sonucunda elde edilen veriler ile Midilli & Küçük modelinden elde edilen veriler kıyaslandığında veriler arasında uyum olduğu Şekil 6.9'da görülmektedir.

6.2.3 Efektif difüzyon katsayısı

Farklı IR güç değerlerinde kurutulmuş portakal dilimlerinin ait hesaplanan efektif difüzyon katsayı değerleri Tablo 6.6'da ve grafiksel olarak Şekil 6.10'da gösterilmiştir. İnfrared güç seviyesinde artış meydana geldikçe orantılı olarak efektif difüzyon katsayılarında da artış olduğu görülmektedir. En yüksek D_{eff} katsayısı 74 W IR güç seviyesinde kurutulan örneklerde elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük D_{eff} katsayı değerinin 38 W IR güç seviyesinde kurutulan örneklerde olduğu saptanmıştır. Doymaz (2022) yılında yaptığı bir çalışmada, 6 mm kalınlığındaki portakal dilimlerini 62, 74 ve 88 W IR güç seviyelerinde kurutmuş ve elde edilen verilerden hareket ederek D_{eff} değerlerinin $1,59-2,49 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olduğunu beyan etmiştir.

Tablo 6.6 Farklı infrared güçlerinde kurutulan numunelerin efektif difüzyon katsayı değerleri

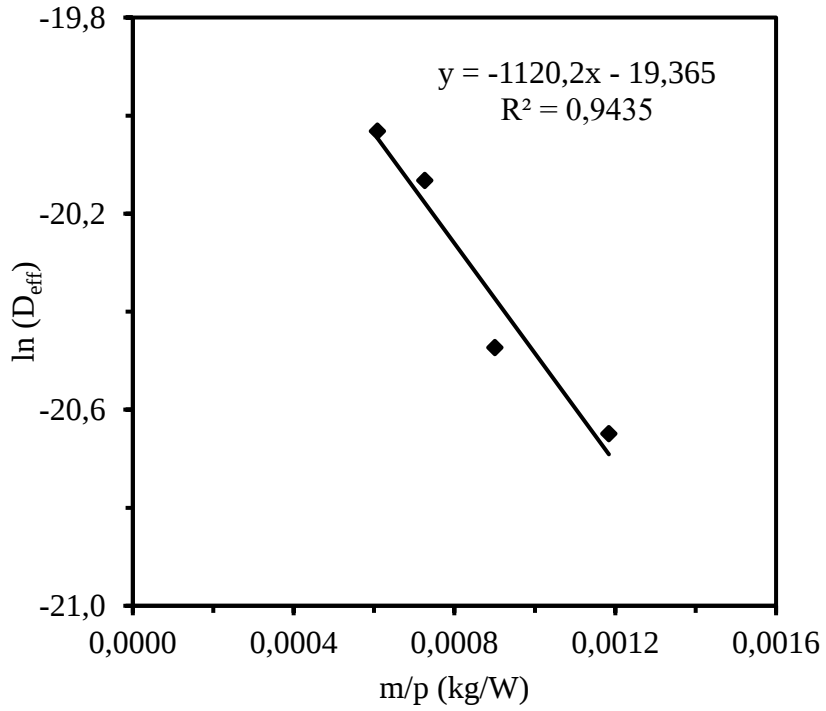
p (W)	D_{eff} (m²/s)
38	1,077×10 ⁻⁰⁹
50	1,284×10 ⁻⁰⁹
62	1,806×10 ⁻⁰⁹
74	1,996×10 ⁻⁰⁹



Şekil 6.10 Değişik IR güçlerinde kurutulan numunelerin efektif difüzyon katsayı değerleri

6.2.4 Aktivasyon enerjisi

Aktivasyon enerjisi Arrhenius eşitliğinin eğiminden belirlenebilir, $\ln(D_{eff})$ ve m/p (Denklem 5.11). Numune ağırlığı/infrared güç seviyesinin bir fonksiyonu olarak $\ln(D_{eff})$, Şekil 6.11’de çizilmiştir. Doğrunun eğimi $(-E_a)$ ’dır ve kesişme noktası $\ln(D_0)$ eşittir.



Şekil 6.11 IR güç seviyesinin D_{eff} üzerindeki etkisi

Denklem (6.2), infrared güç seviyesinin D_{eff} katsayıları üzerindeki etkisini göstermektedir.

$$D_{eff} = 3,889 \times 10^{-9} \exp\left(-1120,2 \frac{m}{p}\right) \quad (R^2 = 0,9435) \quad (6.2)$$

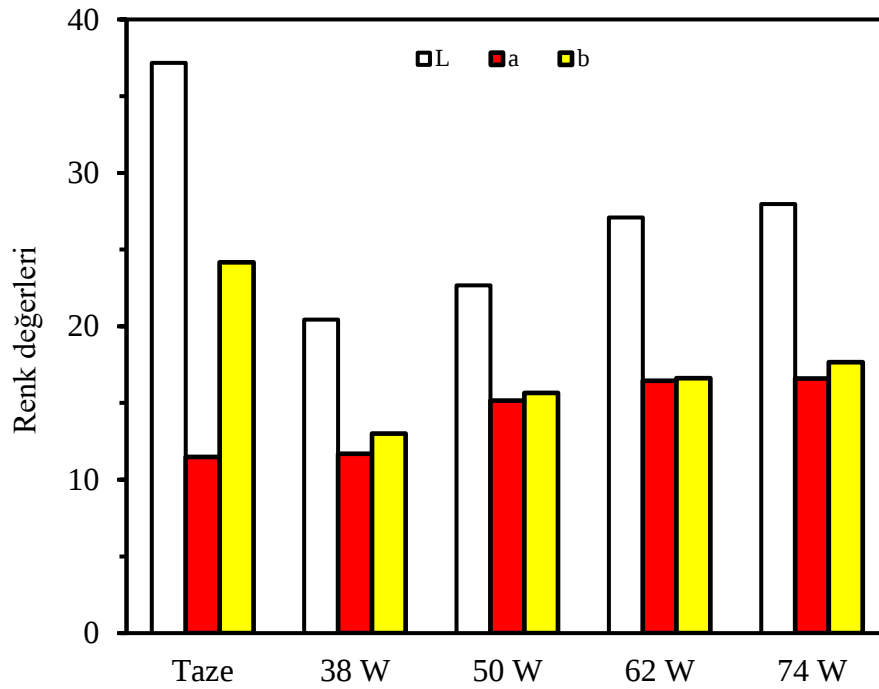
Yukarıda (6.2) denkleminde yararlanılarak portakal dilimler için E_a değeri hesaplanmıştır. Bu değer, 1,12 kW/kg’dır.

6.2.5 Renk değerleri

Farklı IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimlerinin renk parametreleri Şekil 5.6’da gösterilen renk cihazı ile ölçölmüş ve elde edilen değerler Tablo 6.7’de ve grafiksel olarak Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

Tablo 6.7 Taze portakal ve infrared kurutma sonrası portakal dilimlerine ait renk analiz sonuçları

	L	a	b	C	ΔE
Taze	37,16	11,49	24,16	26,75	-
38 W	20,44	11,7	13,01	17,49	20,09
50 W	22,67	15,15	15,65	21,78	17,19
62 W	27,09	16,44	16,62	23,37	13,51
74 W	27,97	16,6	17,65	24,22	12,36



Şekil 6.12 İnfrared kurutucuda kurutulan portakal dilimlerinin renk analiz değerleri

Tablo 6.7 ve Şekil 6.12 incelendiğinde, taze ve farklı güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimlerinin renk değerleri incelendiğinde IR güç seviyesi arttıkça örneklerin L, a ve b değerlerinde bir artış olduğu saptanmıştır. Ayrıca, kurutma işlemi sırasında kullanılan IR güç seviyesi arttıkça, C değerlerinde artma, buna karşılık ΔE değerlerinde ise düşme meydana gelmiştir.

6.3 Limon Dilimlerinin Kabin Kurutucuda Kurutulmasına Ait Sonuçlar

6.3.1 Kurutma Eğrileri

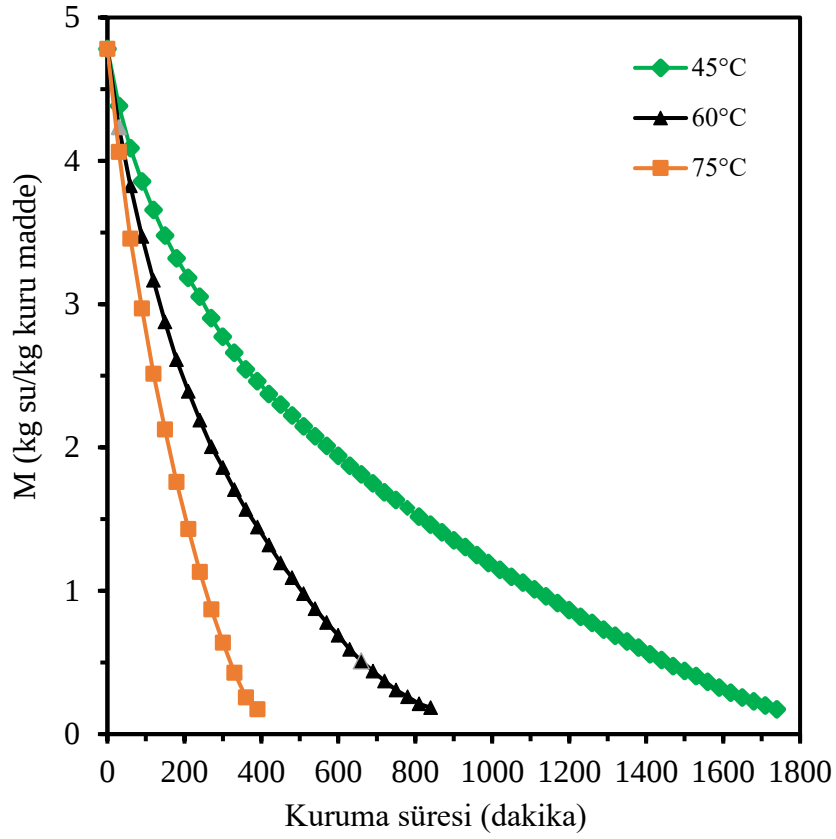
Limon dilimlerinin kurutma karakteristikleri 45, 60 ve 75°C’de $2\pm0,1$ m/s hava hızındaki bir kabin kurutucuda incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda limon dilimlerinin kuruma süreleri Tablo 6.8’te verilmiştir. Kurutma işlemine örneklerdeki nem içeriği %15 seviyesine düşünceye dek devam edilmiştir. Kurutma işlemi sırasında her 30 dakikada bir örneklerin ağırlıkları kaydedilmiştir. Elde edilen verilerden yararlanarak nem içeriğinin kuruma süresine göre değişim eğrileri çizilmiş ve Şekil 6.13’te gösterilmiştir.

Tablo 6.8 Limon dilimlerinin kuruma süreleri

Sıcaklık (°C)	Kuruma süresi (dakika)
45	1740
60	840
75	390

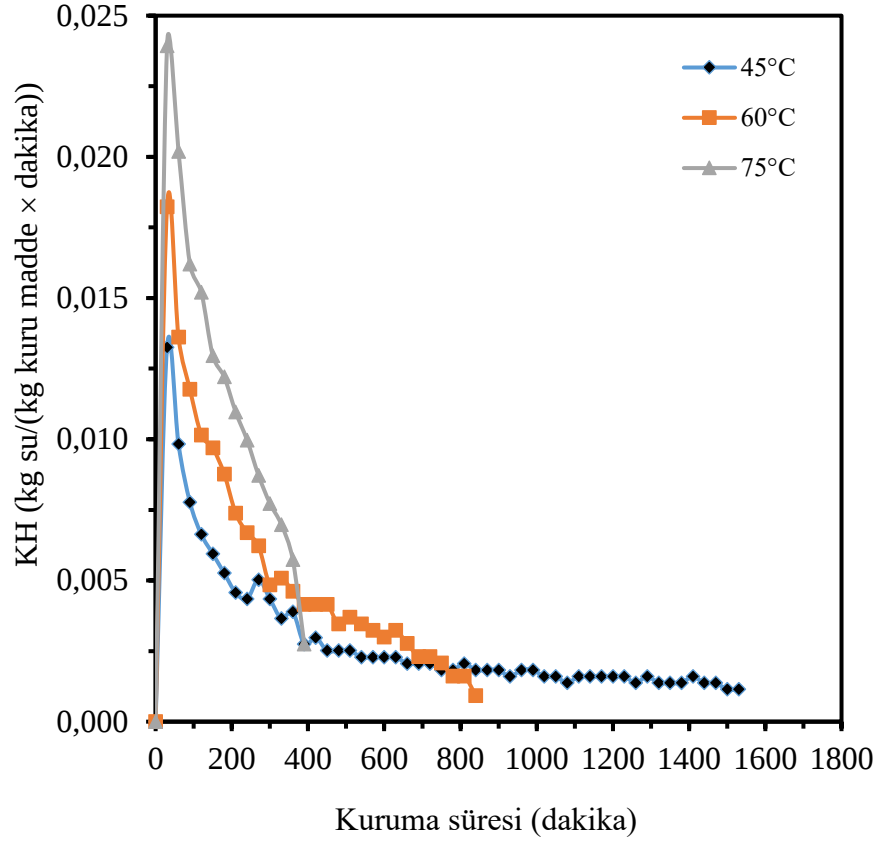
Tablo 6.8’deki veriler incelendiğinde, kurutma sıcaklığının kurutma sürelerine etki ettiği görülmektedir. Kurutma sıcaklığının artması ile nem kaybının artması sonucunda kuruma sürelerinde azalma meydana gelmektedir.

Şekil 6.13 incelendiğinde, 45 ile 75°C arasında sıcaklıklarda kurutulan limon dilimlerinin kabin kurutucudaki kurutma eğrileri yer almaktadır. Kurutma sıcaklığının artışıyla birlikte gıda içerisinde yer alan nem miktarının uzaklaştığı dolayısıyla kurutma hızının yükseldiği ve kurutma sürelerinin de önemli miktarda azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 6.13 Limon dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri

Limon dilimlerinin kabin kurutucuda kurutma davranışını açıklayan kurutma hızının kurutma süresi ile değişimi Şekil 6.14'te görülmektedir. Bu şekildeki eğrilere göre kuruma hızının kuruma süresine bağlı olarak sürekli olarak azaldığı açıkça görülmektedir. Şekil 6.14'teki eğrilerde limon dilimlerinin kurutulmasında sabit hız periyodu gözlemlenmemiştir. Kurutma işlemi kısa bir ön ısıtma periyodunun ardından azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir. Kurutma sırasında kurutma hızı, işlemin başlangıcında daha yüksek olduğu görülüp ve daha sonra örneklerdeki nem içeriğinin azalmasıyla birlikte azalma görülmüştür.



Şekil 6.14 Limon dilimlerinin çeşitli sıcaklıklardaki kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi

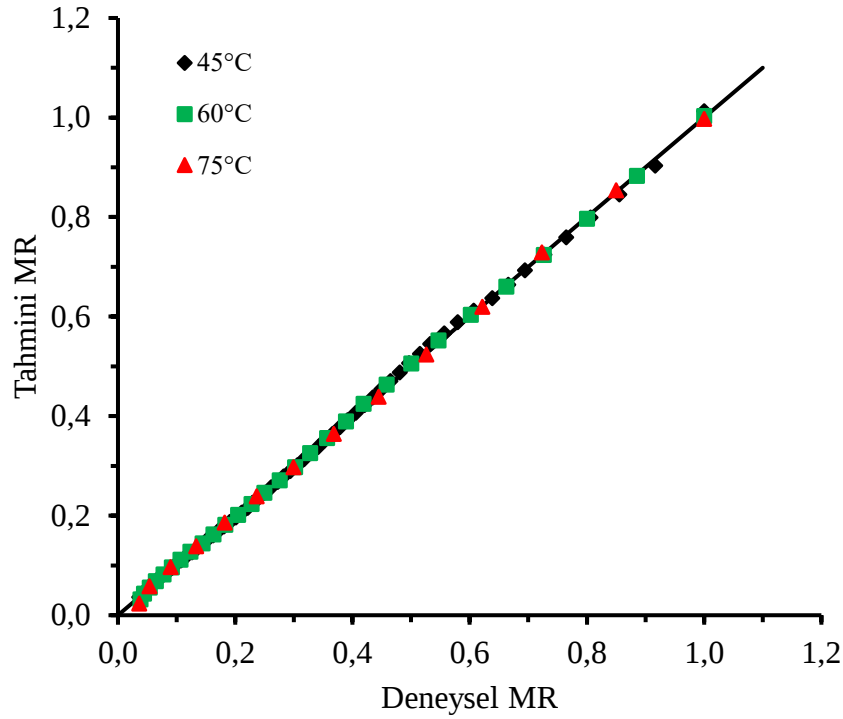
6.3.2 Kurutma işleminin modellenmesi

Deney sonuçlarından elde edilen sonuçlara göre modellerin uygulanması sonucu bulunan istatistiksel değerler hesaplanmış ve Tablo 6.9’da verilmiştir. Tablo 6.9’da görüldüğü üzere modellerin R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla 0.948122-0,999801, 0,000016-0.003155 ve 0,016934-0,358179 arasındadır. Midilli & Küçük matematiksel modeline ait R^2 ’leri diğer modellerin değerleri ile mukayese edildiğinde yüksek olduğu görülmüş, χ^2 ve RMSE verileri ise diğer modellere kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bu sonuçlara göre Midilli & Küçük modelinin limon dilimlerinin kuruma karakteristiğini daha iyi temsil ettiği belirlenmiştir.

Tablo 6.9 Farklı sıcaklıklarda kurutulan limon dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler

T (°C)	Model	R ²	χ^2	RMSE
45	Henderson & Pabis	0,991259	0,000531	0,147390
	Lewis	0,982286	0,001058	0,208458
	Midilli & Küçük	0,999532	0,000029	0,032044
	Page	0,990221	0,000594	0,157803
	Wang & Singh	0,948122	0,003155	0,358179
	Vega & Lemus	0,979823	0,001227	0,191865
60	Henderson & Pabis	0,996665	0,000254	0,071118
	Lewis	0,996254	0,000276	0,077085
	Midilli & Küçük	0,999801	0,000016	0,017756
	Page	0,996343	0,000279	0,074461
	Wang & Singh	0,980190	0,001514	0,174448
	Vega & Lemus	0,985522	0,001106	0,141627
75	Henderson & Pabis	0,987751	0,001264	0,106171
	Lewis	0,985967	0,001337	0,111119
	Midilli & Küçük	0,999680	0,000039	0,016934
	Page	0,994996	0,000516	0,067040
	Wang & Singh	0,998695	0,000184	0,038275
	Vega & Lemus	0,998688	0,000135	0,030573

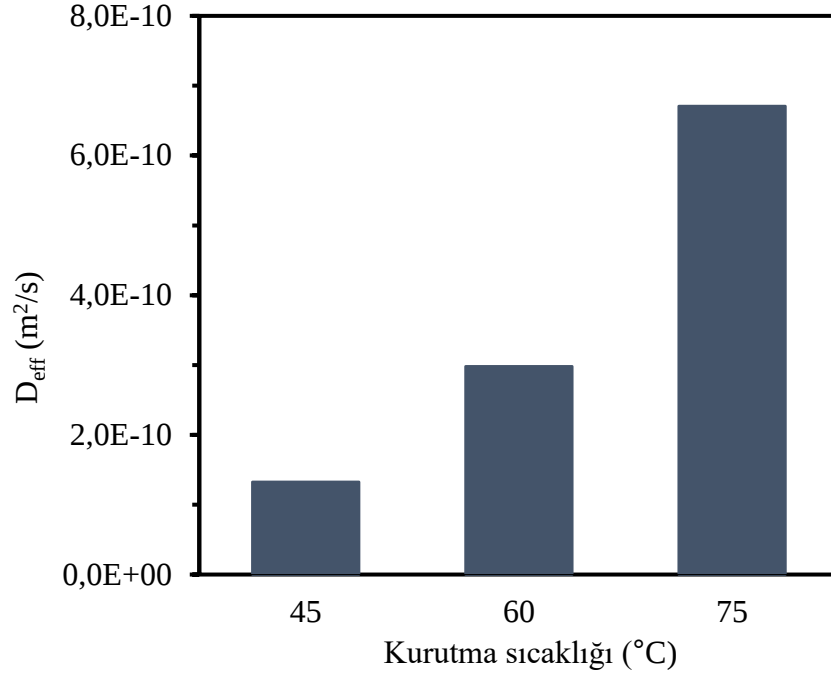
Şekil 6.15'te modelini kullanarak kurutulmuş limon dilimlerinin çeşitli sıcaklıklardaki deneysel ve tahmin edilen nem oranları karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde veri noktaları genellikle grafikler üzerinde 45°'lik düz bir çizgi etrafında yer almaktadır. Bu eğilim, modelin limon dilimlerinin kuruma özelliklerini tahmin etmeye uygunluğuna dair ekstra kanıt sağlamaktadır. Çetin (2022), Midilli & Küçük modelinin portakal dilimlerinin konvektif kurutmasını yeterli bir şekilde tanımlayabildiğini bildirmiştir.



Şekil 6.15 Limon dilimlerinin deneysel ve tahmini nem oranlarının kıyaslanması

6.3.3 Efektif nem difüzivitesi

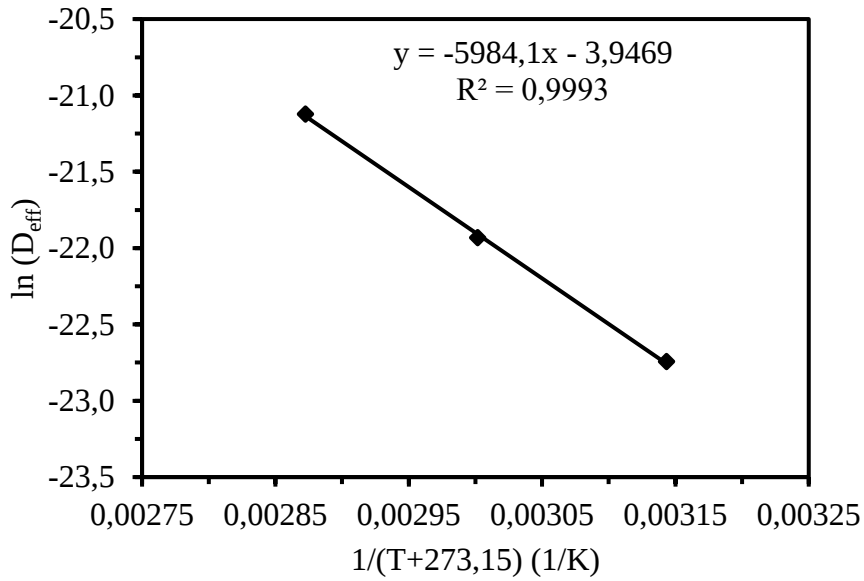
Efektif nem difüzivitesi (D_{eff}) değerleri Denklem (5.9) kullanılarak hesaplanmıştır ve Şekil 6.16’da gösterilmektedir. Kurutma sıcaklığının artmasıyla D_{eff} değerlerinin büyük oranda arttığı görülmektedir. Numunelerin kurutma sıcaklıklarının artırıldığında, yükselen ısıtma enerjisi su moleküllerinin aktivitesini arttırdığı ve bu da daha yüksek nem difüzyonuna yol açmıştır. Farklı sıcaklıklarda kurutulan örneklerin D_{eff} değerleri kurutma sıcaklığına bağlı olarak $1,32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $6,70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişmektedir. Deneyler sonucu bulunan D_{eff} değerleri, literatürde yer alan gıdaların kurutulması için ifade edilmekte olan D_{eff} değerleri olan 10^{-12} ile $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında olduğu belirlenmiştir (Zogzas vd, 1996). Salehi ve Kashaninejad (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, limon dilimleri infrared-vakum kurutma yöntemi ile kurutulmuştur. Elde edilen verilerden yararlanarak D_{eff} değerlerini $2,92 \times 10^{-10}$ ile $1,58 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında hesaplamışlardır. Sonuçlar, bu çalışmada elde edilen D_{eff} değerleri ile uyumludur.



Şekil 6.16 Sıcaklığa karşı efektif nem difüzivite değerleri

6.3.4 Aktivasyon enerjisi

Aktivasyon enerji değerleri, $\ln(D_{eff})$ ile sıcaklık ($1/T+273,15$) arasında çizilen ve Şekil 6.17’te gösterilen grafikteki doğrunun eğiminden yararlanarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.17 D_{eff} ile T arasındaki Arrhenius tipi ilişki

Denklem (6.3)'te sıcaklığın numunelerin D_{eff} değerleri üzerindeki etkisini aşağıdaki katsayılarla gösterilmektedir.

$$D_{eff} = 2,903 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{5984,1}{(T+273,15)}\right) \quad (R^2 = 0,9993) \quad (6.3)$$

Denklem (6.3) kullanılarak aktivasyon enerjisi değeri 49,75 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisinin değeri, gıda materyalleri için genel olarak 12,7-110 kJ/mol aralığında değişmektedir (Zogzas vd., 1996). Bu çalışmada elde edilen aktivasyon enerji değeri bu aralıkta yer almaktadır.

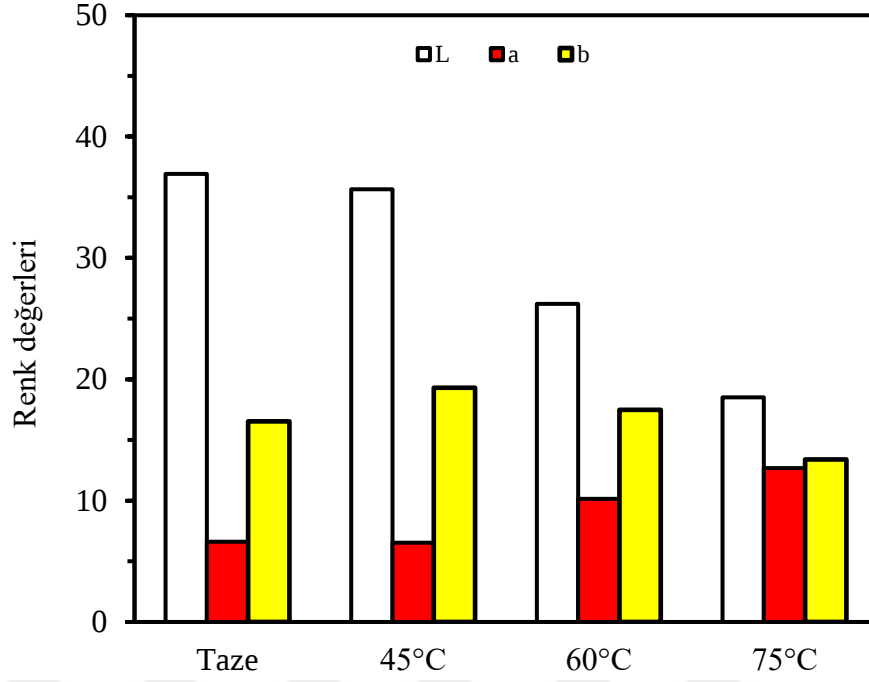
6.3.5 Renk değerleri

Taze ve kurutulmuş limon dilimlerinin renk değerleri Tablo 6.10'da verilmektedir. Ayrıca grafiksel olarak renk değerleri Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Tablo 6.10 incelendiğinde, kabin kurutucuda kurutma sıcaklığının artmasıyla limon dilimlerinin parlaklığı simgeleyen L değerlerinde sıcaklığa bağlı olarak bir azalma meydana gelmiştir. 45°C'de kurutulan örneklerin L değeri 35,66 iken 75°C'de kurutulan örneklerin L değeri 15,52 değerine düşmüştür. Kırmızı rengin simgesi olarak gösterilen a değerinin değerleri artan kurutma sıcaklığına paralel olarak artmıştır. Diğer taraftan sarılığın simgesi olan b değerlerinde ise sıcaklığın artışı ile düşme eğilimi göstermiştir.

Tüm bu değerler ışığında, kurutma sıcaklığı arttıkça örneklerin C değerinde bir azalış göstermiştir. Örneklerde meydana gelen toplam renk değişimi (ΔE) değeri incelendiğinde ise sıcaklığın artmasıyla örneklerin ΔE değerlerinde artma meydana gelmiştir.

Tablo 6.10 Taze limon ve kabin kurutma sonrası limon dilimlerine ait renk analiz verileri

	L	a	b	C	ΔE
Taze	36,92	6,61	16,53	17,80	-
45°C	35,66	6,54	19,29	20,36	3,03
60°C	26,22	10,16	17,48	20,21	11,31
75°C	18,52	12,69	13,38	18,44	19,63



Şekil 6.18 Taze limon ve kabin kurutucuda kurutma sonrası limon dilimlerinin renk analiz değerleri

6.4 Limon Dilimlerinin İnfrared Kurutucuda Kurutulmasına Ait Sonuçlar

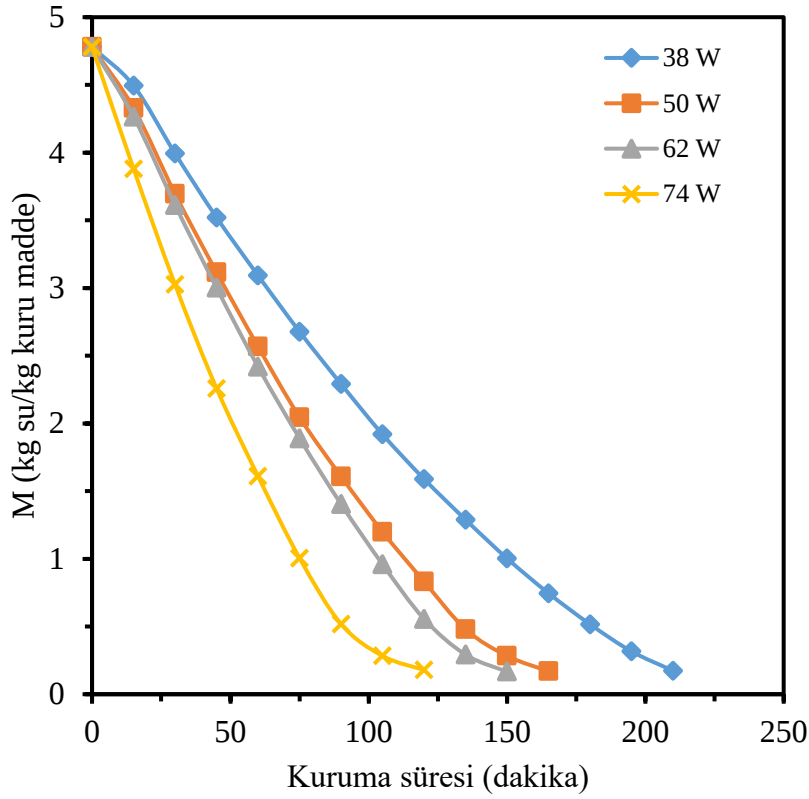
6.4.1 Kurutma Eğrileri

Limon numunelerinin infrared kurutucuda farklı IR güç seviyelerinde kurutulması sonucunda elde edilen kurutma süreleri Tablo 6.11’de verilmiştir. Şekil 6.19’da ise nem içerik değerlerinin kurutma süresi ile değişimleri göstermektedir.

Tablo 6.11 Limon dilimlerinin infrared kurutucuda kurutma süreleri

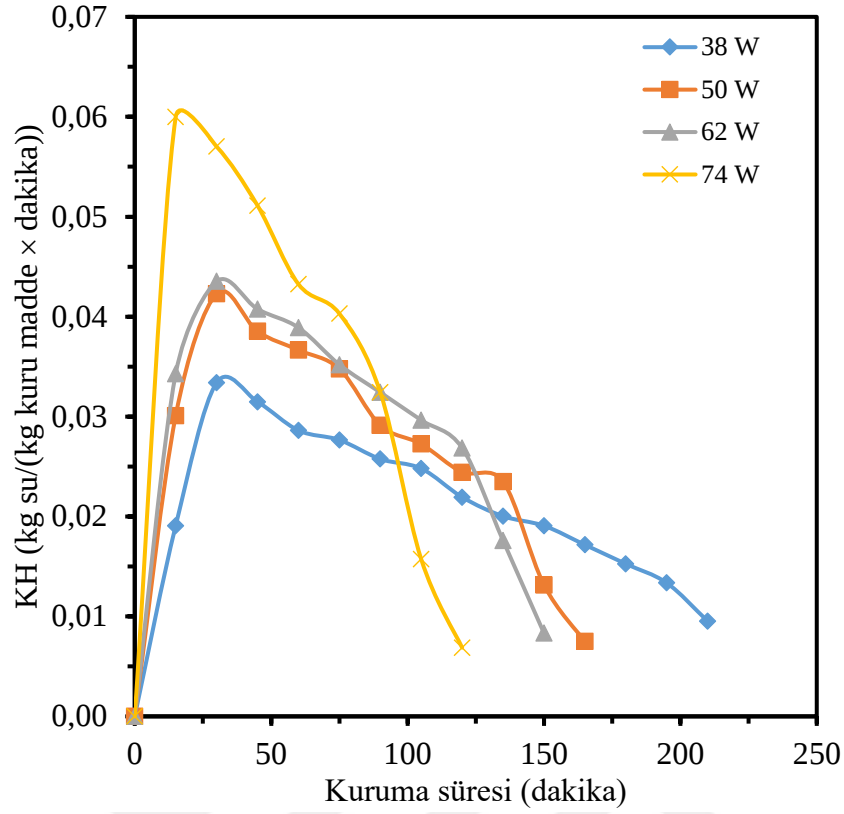
IR güç seviyesi (W)	Kuruma süresi (dakika)
38	210
50	165
62	150
74	120

Tablo 6.11 incelendiğinde, IR güç seviyesinin artmasıyla birlikte örneklerin kuruma sürelerinde düşüş görülmektedir. IR güç seviyesi arttıkça örneklerdeki içerisinde bulunan suyun buharlaşması hızlanmaktadır. Şekil 6.19 incelendiğinde numuneye 38 W güç uygulanan çalışmada numuneler 210 dakika sürede kururken 74 W güç uygulanan çalışmada bu süre 120 dakikaya inmiştir. Deney sonuçlarından görüldüğü üzere güç artışı ile gıdanın kuruma süresi kısalmıştır.



Şekil 6.19 Limon dilimlerinin infrared kurutucudaki kurutma süresi eğrileri

Farklı IR güç seviyelerinde kurutulan limon dilimleri için kuruma hızı eğrileri Şekil 6.20’de verilmiştir. Şekildeki eğriler dikkatli bir şekilde incelenirse, kurutma işleminin başında örneklerdeki nem miktarı yüksek olduğu için kurutma hızı da yüksek değerlerdedir. Örneklerdeki nem miktarı zamanla azaldığından kuruma hızı da azaldığı görülmektedir. Ayrıca IR güç seviyesinin artışı ile kurutma hızları da artmıştır. Ayrıca Şekil 6.20’deki eğriler incelendiğinde kurutma işlemi kısa süreli bir ısınma periyodu sonrasında azalan hız periyodunda gerçekleştiği görülmüştür. Bu eğrilerde sabit debi periyodu gerçekleşmemiştir. Benzer çalışmalar literatürde de vardır (Darvishi vd., 2014; Xu vd., 2022).



Şekil 6.20 Limon dilimlerinin infrared kurutucudaki kurutma hızının kuruma süresi ile değişim eğrileri

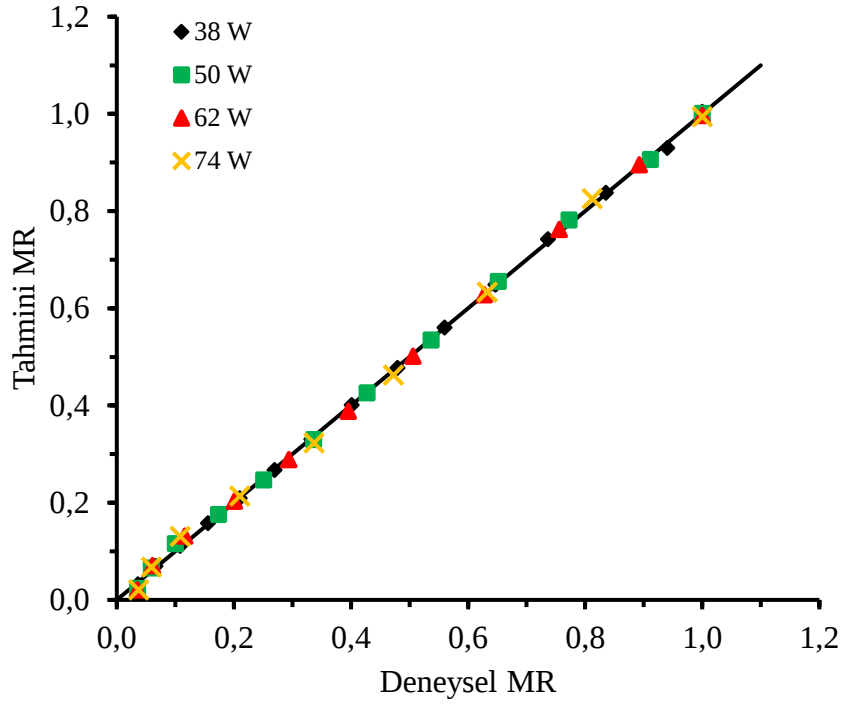
6.4.2 Kurutma işleminin matematiksel modellenmesi

Farklı sıcaklıklar uygulanarak kurutulan limon dilimlerine ait deneysel verilerin matematiksel modelleme çalışması Tablo 6.12’de bulunan kurutma modellerinin kullanılmasıyla yapılmıştır.

Tablo 6.12’de görüldüğü üzere modellerin R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri 0,953745-0,999851, 0,000019-0,04800 ve 0,011411-0,215730 arasındadır. Midilli & Küçük modelinin R^2 değerleri diğer modellerin değerlerine göre yüksek olduğu görülmüştür. Buna karşılık χ^2 ve RMSE değerleri ise diğer modellere kıyasla düşük bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, Midilli & Küçük modelinin limon dilimlerinin kuruma karakteristiğini daha iyi açıkladığı saptanmıştır. Farklı infrared güç seviyelerinde kurutulan limon dilimlerinin tahmini ve deneysel MR’larının karşılaştırılması Şekil 6.21’de sunulmuştur. Tahmin edilen ve deneysel MR değerleri, Midilli & Küçük modelinin tanımlanmasındaki uygunluğu anlamına gelen düz çizgiyi göstermiştir.

Tablo 6.12 Farklı IR güç seviyesinde kurutulmuş limon dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler

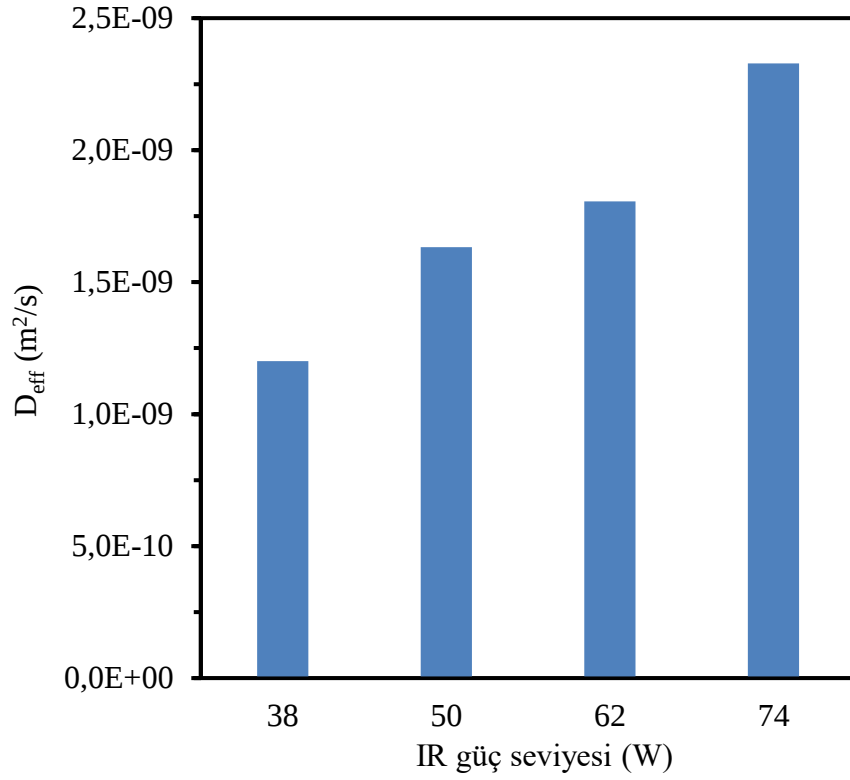
p (W)	Model	R²	χ^2	RMSE
38	Henderson & Pabis	0,970601	0,003286	0,176161
	Lewis	0,957609	0,004400	0,215730
	Midilli & Küçük	0,999851	0,000019	0,011411
	Page	0,996830	0,000354	0,055980
	Wang & Singh	0,998040	0,000219	0,039112
	Vega & Lemus	0,997596	0,000268	0,047222
50	Henderson & Pabis	0,968346	0,003932	0,177565
	Lewis	0,956825	0,004875	0,202065
	Midilli & Küçük	0,999517	0,000075	0,019521
	Page	0,997249	0,000341	0,050927
	Wang & Singh	0,996937	0,000380	0,048131
	Vega & Lemus	0,997096	0,000360	0,048807
62	Henderson & Pabis	0,964489	0,004539	0,181296
	Lewis	0,953745	0,005321	0,200434
	Midilli & Küçük	0,999393	0,000099	0,021609
	Page	0,996325	0,000469	0,057224
	Wang & Singh	0,997187	0,000359	0,046654
	Vega & Lemus	0,996001	0,000511	0,059657
74	Henderson & Pabis	0,976902	0,003171	0,141095
	Lewis	0,972179	0,003289	0,145663
	Midilli & Küçük	0,998617	0,000265	0,030982
	Page	0,997017	0,000409	0,045212
	Wang & Singh	0,998628	0,000188	0,030708
	Vega & Lemus	0,998850	0,000157	0,029406



Şekil 6.21 Limon dilimlerinin farklı IR güç seviyelerinde kurutulması ile deneysel ve tahmini nem oranlarının karşılaştırılması

6.4.3 Efektif nem difüzyivitesi

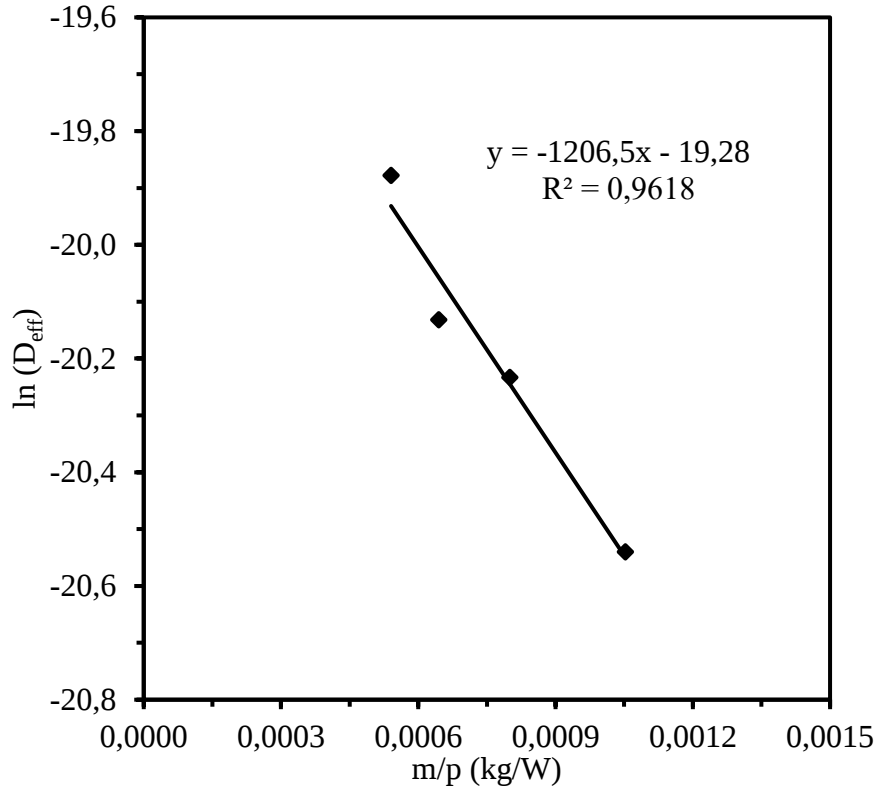
Farklı IR güç değerlerinde kurutulmuş limon dilimlerine ait denklem (5.9) kullanılarak hesaplanan efektif difüzyon katsayı değerleri grafiksel olarak Şekil 6.22’de verilmiştir. Kurutulan limon dilimlerinin D_{eff} değerleri $1,20 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $2,32 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasındadır. İnfrared güç seviyesinde artışına paralel olarak efektif difüzyon katsayılarında da artış olduğu görülmektedir. 74 W IR güç seviyesinde kurutulan örneklerin D_{eff} katsayısı en yüksek olduğu bulunmuştur. Buna karşılık en düşük D_{eff} katsayı değeri 38 W IR güç seviyesinde kurutulan örneklerde elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen D_{eff} değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Zogzas vd. (1996), çeşitli gıdaların D_{eff} değerlerinin 10^{-12} ile $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değiştiğini belirtmişlerdir.



Şekil 6.22 Farklı IR güç seviyesinin efektif difüzyon katsayısı üzerindeki etkisi

6.2.4 Aktivasyon enerjisi

İnfrared kurutucuda kurutulan limon dilimlerinin aktivasyon enerji (E_a) değerini hesaplamak için Denklem (5.11) kullanılmıştır ve bu denklemden yararlanılarak Şekil 6.23'teki m/p 'e karşılık $\ln(D_{eff})$ eğrisi çizilmiştir. Bu eğrinin eğiminden E_a değeri bulunmuştur.



Şekil 6.23 Efektif nem difüzivitesi ile IR güç seviyesi arasındaki Arrhenius tipi ilişki

Aşağıdaki denklemde örneklere infrared güç seviyesinin etkisi gösterilmiştir:

$$D_{eff} = 4,234 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{1206,5m}{P}\right) \quad (R^2 = 0,9618) \quad (6.4)$$

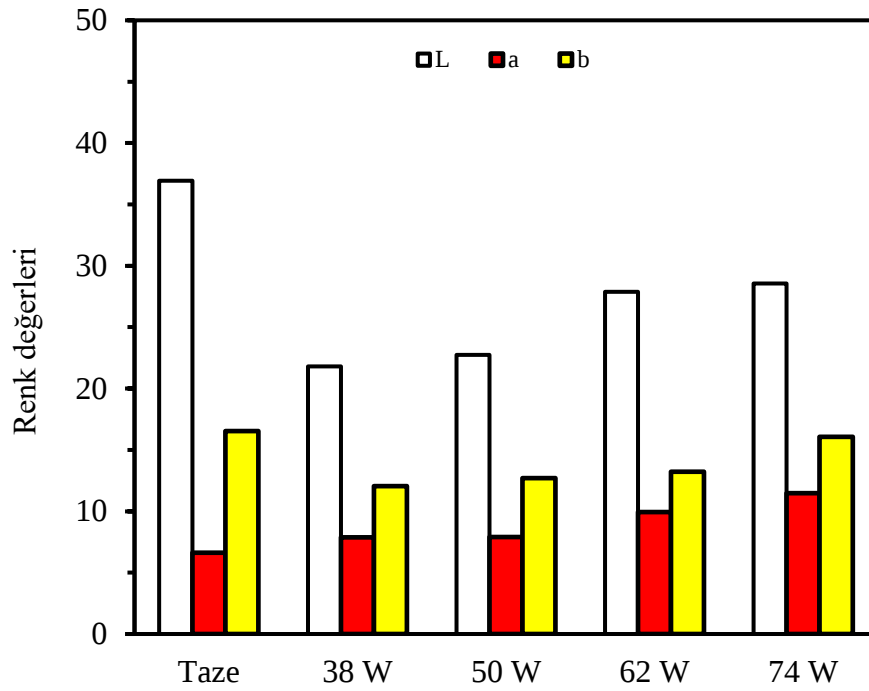
Yukarıda (6.4) denkleminden yararlanılarak limon dilimler için E_a değeri 1,206 kW/kg olarak hesaplanmıştır.

6.2.5 Renk değerleri

Farklı IR güç seviyelerinde kurutulmuş olan limon dilimlerinin renk verileri Şekil 5.6'da gösterilen renk cihazı ile ölçülmüş ve elde edilen değerler Tablo 6.13'te verilmiştir. Grafikselsel yönden taze ve farklı IR güç seviyelerinde kurutulan limon dilimlerinin grafikselsel yönden gösterimi Şekil 6.24'te gösterilmiştir.

Tablo 6.13 Limon dilimlerine ait belirlenen renk değerleri

	L	a	b	C	ΔE
Taze	36,92	6,61	16,53	17,80	-
38 W	21,79	7,87	12,06	14,40	15,82
50 W	22,74	7,90	12,71	14,96	14,74
62 W	27,89	9,94	13,23	16,54	10,17
74 W	28,56	11,48	16,07	19,74	9,68



Şekil 6.24 İntraket kurutucuda kurutulan limon dilimlerinin renk değerleri

Tablo 6.13 ve Şekil 6.24'ten taze ve değişik güç seviyelerinde kurutulan limon dilimlerinin renk değerleri incelendiğinde, IR güç seviyesi arttıkça örneklerin L, a ve b değerlerinde bir artış olduğu saptanmıştır. Ayrıca, Tablo 6.13'teki verilere göre kurutma işleminde kullanılan IR güç seviyesi arttıkça, C değerlerinde artma, buna karşılık ΔE değerlerinde ise düşme meydana gelmiştir.

Bu çalışmada, portakal ve limon dilimlerinin konvektif ve infrared kurutma yöntemleri kullanılarak değişik sıcaklık ve IR güç seviyelerinde kurutulması incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Portakal ve limon dilimlerinin kuruma özellikleri sıcak hava ve infrared kurutma teknikleriyle kurutulmuş ve kurutma sonrası kuruma süreleri ve kaliteye yönelik renk parametreleri incelenmiştir. Hem portakal hem limon dilimleri sabit hızlı havada ve 45, 60 ve 75°C sıcaklıklarındaki kabin kurutucuda kurutulmuştur. İnfrared kurutma işlemleri için ise 38, 50, 62 ve 74 W IR güç değerlerinde çalışılmıştır. Kurutma sıcaklığı ve IR güç seviyesinde artış olduğunda kurutma sürelerinde düşüş gözlemlenmiştir.
- Her iki kurutucuda kurutulan portakal ve limon dilimlerine ait kurutma eğrileri kısa bir ısınma ve daha sonra azalan hız periyotlarından meydana gelmiştir. Kurutma hızına kurutma sıcaklığı ve IR güç seviyesinin önemli ölçüde etki ettiği belirlenmiştir.
- Deneyler sonucunda elde edilen parametreler literatürde yer almakta olan 6 ince tabaka kurutma modeline uygulanarak en iyi uyum gösteren model belirlenmiştir. Modeller arasında en uygun olanı bulmak amacıyla Statistica programı ile her numune için R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri belirlenmiştir. R^2 için en yüksek, χ^2 ve RMSE için ise en düşük değerler belirlenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen verilerden çıkan sonuca göre en uygun modelin Midilli & Küçük modeli olduğu belirlenmiştir.
- Kabin tipi kurutucu ile kurutulan portakal ve limon dilimler için efektif difüzyon katsayıları hesaplanmış ve elde edilen değerler sırasıyla $1,65 \times 10^{-10}$ m²/s ile $7,04 \times 10^{-10}$ m²/s ve $1,32 \times 10^{-10}$ m²/s ile $6,70 \times 10^{-10}$ m²/s aralığında olduğu saptanmıştır. Kurutma sıcaklığının artışı ile D_{eff} değerleri de artmıştır.
- İnfrared kurutucuda değişik IR güç seviyelerinde kurutulan portakal dilimleri için hesaplanmış efektif difüzyon katsayıları $1,07 \times 10^{-9}$ m²/s ile $1,99 \times 10^{-9}$ m²/s

arasındadır. Aynı kurutucuda kurutulan limon dilimlerinin D_{eff} verileri $1,20 \times 10^{-9}$ ile $2,32 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ arasındadır. IR güç seviyesinde bir artışa gidildiğinde D_{eff} değerleri de artmıştır.

- Kabin tipi kurutucu ile kurutulan portakal ve limon dilimler için aktivasyon enerjileri sırasıyla 44,26 ve 49,75 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.
- İnfrared kurutucuda kurutulan portakal ve limon dilimlerinin aktivasyon enerjilerinin sırasıyla 1,12 kW/kg ve 1,20 kW/kg olduğu saptanmıştır.
- Değişken hava sıcaklıklarındaki kabin kurutucuda kurutulan portakal ve limon dilimlerinin renk parametreleri incelenmiştir. Kurutma sıcaklığının artışı ile L, b ve C değerlerinde azalma görülürken, buna karşılık a ve ΔE değerleri artmıştır.
- Farklı IR güç seviyelerinde IR kurutucuda kurutulan portakal ve limon dilimlerinin renk parametrelerine göre IR güç seviyesi artışı ile L, a, b ve C değerleri artmış, buna karşılık ΔE değerleri düşmüştür.

KAYNAKÇA

- Akpınar, K.E., ve Biçer, Y. (2003). Siklon tipi konvektif bir kurutucuda patlıcan dilimlerinin kuruma kinetiğinin ampirik bağıntılarla açıklanması. Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 2, 28-36.
- Alibas, I., Yilmaz, A. (2022). Microwave and convective drying kinetics and thermal properties of orange slices and effect of drying on some phytochemical parameters. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147(15), 8301–8321.
- Aygören, E. (2023). Tarım ve Orman Ürünleri Piyasa Raporu (Limon). <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge>
- Ayriksa, M., Acar, B., Dağdeviren, A., Roshanaei, K., Coşkun, T., Ongun, G.K., Özkaymak, M. (2022). Kinetic model and effective diffusivity of frozen-dried European blueberry (*Vaccinium myrtillus*). Journal of Polytechnic, 25(3), 1217-1224.
- Bozkır, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. Journal of Food Process Engineering, 43(10).
- Chandramohan, V. P. (2020). Convective drying of food materials: An overview with fundamental aspect, recent developments, and summary. Heat Transfer, 49(3), 1281–1313.
- Çetin, N. (2022). Prediction of moisture ratio and drying rate of orange slices using machine learning approaches. Journal of Food Processing and Preservation, 46:e17011.
- Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2014). Drying kinetics and colour change of lemon slices. International Agrophysics, 28, 1–6.
- Demir, G. (2020). Limon Yetiştiriciliği. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/batem/Belgeler/Kutuphane/Teknik%20Bilgiler/Limon%20Yetistirciligi.pdf>
- Demiray, E., Yazar, J.G., Aktok, Ö., Çulluk, B., Çalışkan Koç, G., Pandiselvam, R. (2023). The effect of drying temperature and thickness on the drying kinetic, antioxidant activity, phenolic compounds, and color values of apple slices. Journal of Food Quality, Vol. 2023, Article ID 7426793.
- Deng, L. Z., Mujumdar, A. S., Yang, W. X., Zhang, Q., Zheng, Z. A., Wu, M., & Xiao, H. W. (2020). Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel. Journal of Food Processing and Preservation, 44: e14294.

- Doymaz, İ. (2013). Determination of infrared drying characteristics and modelling of drying behaviour of carrot pomace. *Journal of Agricultural Sciences*, 19(1), 44-53.
- Doymaz, İ. (2022). Drying, colour and rehydration characteristics of orange slices under infrared radiation heating. *Latin American Applied Research*, 52(1), 43-48.
- Eryılmaz, Z. (2020). Portakal Yetiştiriciliği. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/batem/Belgeler/Kutuphane/TeknikBilgiler/PortakalYetistiriciligi.pdf>
- Garau, M. C., Simal, S., Femenia, A., Rosselló, C. (2006). Drying of orange skin: Drying kinetics modelling and functional properties. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 288-295.
- Geniş, G. (2022). Mikrodalga ve infrared kurutma yöntemleri ile kurutulan vişnenin kurutma kinetiğinin kalite parametrelerinin incelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gvozdenović, J.J., Aljilji, A. R., Lazić, V.L., Tepić, A. N., Svrzić, G.V. (2007). Influence of protective characteristics of packaging material on packed dried fruits. *Acta Periodica Technologica*, 38, 21-28.
- Kayran, S., Doymaz, İ. (2021). Drying of Cataloglu apricots: The effect of sodium metabisulfite solution on drying kinetics, diffusion coefficient, and color parameters. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 270-283.
- Kayaardı, S. (1992). Kurutulmuş etin kalite faktörleri üzerinde araştırmalar [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Kocayigit, F. (2010). Bazı sebzelerin kurutma karakteristiklerinin incelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Madamba, P.S. (2003). Thin layer drying models for osmotically pre-dried young coconut. *Drying Technology*, 21, 1759-1780.
- Madhiyanon, T., Phila, A. ve Soponronnarit, S. (2009). Models of fluidized bed drying for thin layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2849-2854.
- Mengeş, H.O. ve Ertekin, C. (2007). Vişne kurutmada kurumanın çeşitli modellerle açıklanması. *Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(42), 4-10.
- Nijhuis, H. H., Topping, H. M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., ve Kloek, W. (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 9(1), 13-20.
- Özkan-Karabacak, A., Acoğlu, B., Yolci Ömeroğlu, P. ve Çopur, Ö. U. (2020). Microwave pre-treatment for vacuum drying of orange slices: Drying characteristics, rehydration capacity and quality properties. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11):e13511.

- Papoutsis, K., Pristijono, P., Golding, J.B., Stathopoulos, C.E., Bowyer, M.C., Scarlett, C.J. ve Vuong, Q.V. (2017). Effect of vacuum-drying, hot air-drying and freeze-drying on polyphenols and antioxidant capacity of lemon (Citrus limon) pomace aqueous extracts. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 880–887.
- Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S. S., Mobli, H. (2010). Modeling effective moisture diffusivity of orange slice (Thompson Cv.). *International Journal of Food Properties*, 13(1), 32–40.
- Ruíz Díaz, G., Martínez-Monzó, J., Fito, P. ve Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4(2), 203–209.
- Saçılık, K. (2022). Sebze ve meyvelerin kurutulması. *Kurutma Teknolojileri Dersi Açık Ders Notu*.
- Salehi, F., Kashaninejad, M. (2018). Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information Processing in Agriculture*, 5(4), 516–523.
- Sanjuán, N., Lozano, M., García-Pascual P. ve Mulet, A., (2003), “Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum* L var Jaranda)”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83: 697-701.
- Sarsavadia, P.N., Sawhney, R.L., Pangavhane, D.R. ve Singh, S.P. (1999). Drying behaviour of brined onion slices. *Journal of Food Engineering*, 40(3), 219–226.
- Shukla, S., Tripathi, M. ve Kumar, A. (2018). Effects of combined osmotic drying methods on quality characteristics of orange slice. *International Journal of Advance Research, Ideas and Inovations in Technology*, 4(6), 350-356.
- Tamer, C. (2017). Kurutmanın portakal kabuğunun fiziksel özelliklerine etkileri [Yüksek Lisans Tezi]. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Tekgül, Y. (2019). Limon kabuğunun farklı kurutma yöntemleriyle optimum kurutma koşullarının belirlenmesi ve kurutma yöntemlerinin bazı kalite özellikleri ile uçucu bileşenler üzerine etkileri [Doktora Tezi]. Ege Üniversitesi, İzmir.
- Torki-Harchegani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M., Tohidi, M. (2016). Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Heat and Mass Transfer*, 52, 281-289.
- Tunde-Akintunde, T.Y. ve Ajala, A. (2010). Air drying characteristics of Chili pepper. *International Journal of Food Engineering*, 6(1): Article 7.
- U.S. Department of Agriculture, Food Data Central, Raw lemon and raw orange. (2017, March 26). <https://fdc.nal.usda.gov/fdc app.html#/fooddetails/1102594/ nutrients>

- Uysal, M. B. (2019). Limon ve portakal kabuklarının sıcak hava, mikrodalga ve sıcak hava-mikrodalga kombinasyonu ile kurutulması [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P.K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z., Gao, Z.J. ve Xiao, H.W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering*, 224, 129–138.
- Xu, Q., Pan, H., Shui, Y., Xing, Y., Wu, L., Zheng, F., Fan, X. ve Bi, X. (2022). Effect of different drying technologies on the characteristics and quality of lemon slices. *Journal of Food Science*, 87(7), 2980–2998.
- Zhu, A. ve Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345-351.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. ve Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14, 2225-2253.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Dönmez, M., Doymaz, İ. (2024). Convective Drying of Orange Slices in Cabinet Dryer. 4. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi, 24-25 Mayıs 2024, Ankara, s. 135.

