

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEŞİTLİ KURUTMA TEKNİKLERİNİN KEREVİZİN KURUTMA  
KİNETİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**Cansın KURT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kimya Mühendisliği Programı**

**Danışman**

**Dr. Öğretim Üyesi İlknur KÜÇÜK**

**Haziran, 2019**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEŞİTLİ KURUTMA TEKNİKLERİNİN KEREVİZİN KURUTMA  
KİNETİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Cansın KURT tarafından hazırlanan tez çalışması 30.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi İlknur KÜÇÜK

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğretim Üyesi İlknur KÜÇÜK, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sibel SARGUT, Üye

Marmara Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi İlknur KÜÇÜK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Çeşitli Kurutma Tekniklerinin Kerevizin Kurutma Kinetiği Üzerindeki 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

Cansın KURT



*Aileme*

*ve*

*biricik oğlum Kaan Ege'ye*

## TEŞEKKÜR

---

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tüm konularda yardımını ve desteğini esirgemeyen, sabır ve güler yüzle beni cesaretlendiren kıymetli hocam ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İlknur Küçük'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında bilimsel desteğini her zaman yanımda hissettiren çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim Doymaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamı yarım bırakmamam konusunda beni cesaretlendiren, iyi ve kötü günlerimde yanımda olup bana devam edebilmek için güç veren saygıdeğer büyüğüm Prof. Dr. Sibel Sargut'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her konuda beni destekleyen, cesaretlendiren, iyi ya da iyi olmayan tüm kararlarımda ve seçimlerimde yanımda olan canım annem Nurhan Odabaşoğlu'na ve babam Ahmet Odabaşoğlu'na, ilk ve hayat boyu öğretmenim canım halam Hayrunnisa Odabaşı'na, duaları ve sonsuz sevgisiyle her zaman yanımda olan canım halam Feriha Odabaşoğlu'na manevi destekçim, diğer yarım, kardeşim Efe Odabaşoğlu'na, hayatımın her döneminde varlıklarıyla bana güç veren, zorlukları çekilebilir kılan, mutlulukları çoğaltan dostlarım Selin Irmak ve Nurdan Aydoğdu'ya, arkadaşım, dostum, kız kardeşim S. Selin Algan'a, sevgisi ve desteğiyle bana güç veren kıymetli meslektaşım ve hayat arkadaşım İlhan Kurt'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Cansın KURT

# İÇİNDEKİLER

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	viii
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	ix
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	x
<b>TABLO LİSTESİ</b>	xii
<b>ÖZET</b>	xiii
<b>ABSTRACT</b>	xv
<b>1 Giriş</b> .....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	6
1.3 Hipotez.....	6
<b>2 Kurutma</b> .....	8
2.1 Gıda Kurutma ve Kurutucular.....	8
2.2 Kurutma İşleminde Temel Terminolojiler.....	9
2.2.1 Adyabatik Doygunluk Sıcaklığı ( $T_{ad}$ ).....	9
2.2.2 Bağlı Nem.....	9
2.2.3 Sabit Kuruma Periyodu ( $N_c$ ).....	9
2.2.4 Çiy Noktası ( $T_d$ ).....	9
2.2.5 Denge Nem İçeriği ( $X_e$ ).....	10
2.3 Kuruma Eğrilerinin Karakteristikleri.....	10
2.4 Kurutma hızına etki eden etmenler.....	11
2.4.1 Ürünün Kimyasal Bileşimi.....	11
2.4.2 Ürünün Boyutları.....	12
2.4.3 Sıcaklık.....	12
2.4.4 Havanın Hızı.....	12
2.4.5 Havanın Nemi.....	12
2.4.6 Atmosfer Basıncı.....	12
2.5 Kurutma İşlemi Sırasında Gıdada Meydana Gelen Kalite Değişimleri.....	13
2.5.1 Kararma Tepkimeleri.....	13

2.5.2 Lipid oksidasyonu.....	13
2.5.3 Büzülme.....	14
2.5.4 Besin Kayıpları .....	14
2.6 Kurutmada Matematiksel Modellemenin Önemi .....	14
2.7 Kurutma Öncesi Uygulanan Ön İşlemler .....	15
2.7.1 Kükürtleme .....	16
2.7.2 Alkali Çözelti Uygulaması.....	16
2.7.3 Haşlama .....	17
2.7.4 Tuzlama .....	17
2.7.5 Diğer Çözeltilere Daldırma .....	17
2.8 Kurutucu Türleri .....	17
2.8.1 Solar Kurutucular .....	18
2.8.2 Hava Üfleli Kurutucular.....	18
2.8.3 Döner Kurutucular .....	22
2.8.4 Vakum Kurutucular .....	23
2.8.5 Mikrodalga Kurutucular .....	24
2.8.6 Dondurarak Kurutma Yapan Kurutucular .....	24
2.8.7 Kızılötesi Kurutucular.....	25
<b>3 Kereviz.....</b>	<b>27</b>
3.1 Kereviz Sebzesi .....	27
3.2 Kerevizin Besin İçeriği .....	28
3.3 Kereviz Üretimi.....	29
3.4 Kerevizin Kurutulması .....	30
<b>4 Materyal ve Yöntem .....</b>	<b>31</b>
4.1 Materyal .....	31
4.2 Yöntem.....	31
4.2.1 Kurutma Teknikleri.....	31
4.2.2 Kuru Madde Analizi.....	32
4.2.3 Kurutma Denemeleri .....	32
4.2.4 Renk Analizi .....	33
4.2.5 Matematiksel Modelleme .....	35
4.2.6 Regresyon Analizi.....	36
4.2.7 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması.....	37

4.2.8 Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması .....	37
<b>5 Bulgular ve Değerlendirme .....</b>	<b>39</b>
5.1 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Elde Edilen Bulgular .....	39
5.1.1 Sıcaklığın ve Ön İşlem Çözeltilisinin Kurutma Süresi Üzerine Etkisi .....	39
5.1.2 Sıcaklığın ve Ön İşlem Çözeltilisinin Kurutma Hızına Etkisi.....	42
5.1.3 Sıcak Havalı Kabin Kurutucu İçin Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi .....	44
5.1.4 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Difüzyon Katsayısının Hesaplanması	46
5.1.5 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması .....	47
5.2 Kızılötesi (Infrared) Isıtıcıda Elde Edilen Bulgular .....	49
5.2.1 Farklı Güç Seviyelerinin Kurutma Süresi Üzerine Etkisi.....	49
5.2.2 Farklı Güç Seviyelerinin Kurutma Hızı Üzerine Etkisi.....	50
5.2.3 Kızıl Ötesi Kurutucu İçin Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi .....	52
5.2.4 Kızılötesi Kurutucuda Difüzyon Katsayısının Hesaplanması .....	53
5.2.5 Kızılötesi Kurutucuda Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması .....	54
5.3 Kombine Kurutma (Kızılötesi + Sıcak hava) ile Elde Edilen Bulgular .....	55
5.3.1 Kombine Kurutmanın Kurutma Süresine Etkisi.....	55
5.3.2 Kombine Kurutmanın Kurutma Hızına Etkisi .....	56
5.4 Kereviz Yapraklarının Sıcak Havalı Kabin Kurutucu ile Kurutulması .....	57
5.4.1 Kereviz Yapraklarının Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi .....	59
5.5 Kurutulan Kerevizin Renk Analizi .....	61
5.5.1 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Kurutma Sonucu Renk Analizi .....	61
5.5.2 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Kurutulan Yaprakların Renk Analizi .	64
5.5.3 Kızılötesi Kurutucuda Kurutma Sonucu Renk Analizi .....	65
<b>6 Sonuçlar ve Öneriler .....</b>	<b>67</b>
<b>Kaynakça.....</b>	<b>69</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

a, b, c, k ve n	Model sabitleri
$a_w$	Su aktivitesi
$a^*$	Kırmızılık
$b^*$	Sarılık
$D_{eff}$	Efektif difüzyon katsayısı
$D_0$	Sonsuz sıcaklıkta difüzyon değeri
$E_a$	Aktivasyon enerjisi
$L^*$	Parlaklık
m	Numune ağırlığı
$N_c$	Sabit kuruma periyodu
$M_{db}$	Kuru bazda numune ağırlığı
$M_{wb}$	Yaş bazda numune ağırlığı
$MR_{DB}$	Kuru bazda nem oranı
$MR_{WB}$	Yaş bazda nem oranı
$MR_{exp, i}$	DeneySEL boyutsuz nem oranı
$MR_{pre, i}$	Tahmini boyutsuz nem oranı
P	Suyun buhar basıncı
$P_0$	Saf suyun buhar basıncı
P	İnfrared kaynağının gücü
R	Evrensel gaz sabiti
$T_{ad}$	Adyabatik doyumluk sıcaklığı
$T_d$	Çiy noktası
W	İnfrared kaynağının gücü
$R^2$	Regresyon katsayısı
$\chi^2$	Ki-kare
$\Delta b^*$	Sarılık sapması
$\Delta L^*$	Parlaklık sapması
$X_e$	Denge nem içeriği

## KISALTMA LİSTESİ

---

CCRD	Merkezi kompozit tasarımı
DR	Kuruma oranı
IR	Infrared (Kızılötesi)
IR-HA	Kızılötesi-Sıcak hava
MR	Nem oranı
RMSE	Hataların ortalama karekökü
RSM	Tepki yüzeyi modelleme yöntemi



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kuruma eğrilerinin temel özellikleri .....	10
Şekil 2.2 Solar kurutucu .....	18
Şekil 2.3 Kabin kurutucu .....	20
Şekil 2.4 Tünel kurutucu.....	20
Şekil 2.5 Sürekli bant kurutucu .....	21
Şekil 2.6 Püskürtmeli kurutucu .....	21
Şekil 2.7 Akışkan yataklı kurutucu .....	22
Şekil 2.8 Döner kurutucu .....	23
Şekil 2.9 Vakumlu kurutucu.....	23
Şekil 2.10 Mikrodalga kurutucu .....	24
Şekil 2.11 Dondurarak kurutma yapan kurutucu .....	25
Şekil 3.1 Kereviz sebzesi.....	27
Şekil 3.2 İller bazında son üç yıllık kereviz üretim miktarları .....	29
Şekil 3.3 Son üç yıla ait TÜİK verileri kereviz üretim miktarları .....	30
Şekil 4.1 Sıcak havalı kabin kurutucu ve kızılötesi kurutucu .....	31
Şekil 4.2 Kromametre .....	34
Şekil 4.3 CIE LAB renk evreni.....	34
Şekil 5.1 Kereviz numuneleri .....	39
Şekil 5.2 Kerevizin 55 °C'da kurutma süresi-nem içeriği grafiği.....	40
Şekil 5.3 Kerevizin 65 °C'da kurutma süresi-nem içeriği grafiği .....	41
Şekil 5.4 Kerevizin 75 °C'da kurutma süresi-nem içeriği grafiği.....	41
Şekil 5.5 Kerevizin 55 °C'de kurutma hızı-nem içeriği grafiği.....	42
Şekil 5.6 Kerevizin 65 °C'de kurutma hızı-nem içeriği grafiği.....	43
Şekil 5.7 Kerevizin 75 °C'de kurutma hızı-nem içeriği grafiği.....	43
Şekil 5.8 Kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin efektif difüzyon katsayıları .....	46
Şekil 5.9 Aktivasyon enerjisinin tahmini için difüzyon hızı ile mutlak sıcaklık arasındaki ilişki .....	48
Şekil 5.10 Kızılötesi kurutucu tavasında kereviz numunesi .....	49
Şekil 5.11 Farklı güç seviyelerinde kurutulan kerevizlerin nem içeriği-kurutma süresi grafiği .....	50
Şekil 5.12 Kerevizin farklı güç seviyeleri için kurutma hızı- nem içeriği grafiği.....	51
Şekil 5.13 Kerevizin farklı güç seviyeleri için kurutma hızı- kurutma süresi grafiği .....	51

<b>Şekil 5.14</b> Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin efektif difüzyon katsayıları .....	54
<b>Şekil 5.15</b> Aktivasyon enerjisinin tahmini için difüzyon hızı ile kütle/güç arasındaki ilişki.....	55
<b>Şekil 5.16</b> Kerevizin farklı kurutucular için kurutma süresi-kurutma hızı grafiği ...	57
<b>Şekil 5.17</b> Kereviz yapraklarının kurutma öncesi ve kurutma sonrası görünüşü...	58
<b>Şekil 5.18</b> Kereviz yapraklarının farklı sıcaklık değerlerinde kurutma süresi nem içeriği grafiği.....	58
<b>Şekil 5.19</b> Kereviz yapraklarının farklı sıcaklık değerlerinde kurutma süresi nem içeriği grafiği.....	59
<b>Şekil 5.20</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “L” parametresi değişimi.....	61
<b>Şekil 5.21</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “a” parametresi değişimi.....	62
<b>Şekil 5.22</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “b” parametresi değişimi.....	62
<b>Şekil 5.23</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı sıcaklık ve ön işlem çözeltisine bağlı olarak renk değişimi.....	63
<b>Şekil 5.24</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kereviz yapraklarının sıcaklığa bağlı olarak renk değişimi.....	64
<b>Şekil 5.25</b> Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı güç seviyelerine göre renk değerleri değişimi.....	65
<b>Şekil 5.26</b> Kızılötesi kurutucu ile kurutulan kerevizlerin farklı güç seviyelerinde renk değişimleri .....	66

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 3.1</b> Kerevizin besin değerleri .....	28
<b>Tablo 4.1</b> Kullanılan matematiksel modeller .....	36
<b>Tablo 5.1</b> Sıcaklığa bağlı toplam kurutma süreleri.....	40
<b>Tablo 5.2</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı modeller için $R^2$ , $\chi^2$ ve RMSE değerleri.....	45
<b>Tablo 5.3</b> Literatürde farklı sıcaklıklarda kurutulan farklı sebzelerin difüzyon katsayıları.....	47
<b>Tablo 5.4</b> Farklı güç seviyelerinde kerevizin toplam kurutma süreleri .....	49
<b>Tablo 5.5</b> Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı modeller için $R^2$ , $\chi^2$ ve RMSE değerleri.....	52
<b>Tablo 5.6</b> Kombine kurutma ile kurutma süreleri değişimi.....	56
<b>Tablo 5.7</b> Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kereviz yapraklarının farklı modeller için $R^2$ , $\chi^2$ ve RMSE değerleri .....	60

## Çeşitli Kurutma Tekniklerinin Kerevizin Kurutma Kinetiği Üzerindeki Etkisi

Cansın KURT

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi İlknur KÜÇÜK

Bu çalışmada, küp şeklinde hazırlanan  $6\pm 0,5$  mm'lik kereviz numunelerinin laboratuvar tipi kabin kurutucuda ve kızıl ötesi kurutucuda kuruma kinetikleri incelenmiştir. İki gruba ayrılan kereviz numunelerinin ilk kısmı %1 sitrik asit çözeltisi ile ön işleme tabi tutularak, diğer kısmı ise olduğu gibi 55, 65 ve 75 °C sıcaklıklarda kabin kurutucuda ve 62, 74, 88 ve 104 W güç seviyelerinde kızılötesi kurutucuda kurutulmuştur. Farklı sıcaklıkların ve güç seviyelerinin yanı sıra kombine kurutma sistemi ve ön işlemin kerevizin kuruma kinetiği ve renk değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kombine kurutma sistemi için, önce kızılötesi ve daha sonra kabin kurutucu kullanılarak iki aşamalı kurutma sağlanmıştır. İlk olarak kızıl ötesi kurutucuda 74 W gücünde 30 dakika boyunca ön kurutmaya maruz bırakılan örnekler ardından 65°C sıcaklıkta sabit tutulan kabin kurutucu içerisinde nem seviyesi istenilen düzeye gelene kadar kurutulmuştur. Aynı deneme kızıl ötesi kurutucuda işlem süresi 1 saat olacak şekilde tekrar edilmiştir. Kombine kurutma sistemi ile kurutulan örneklerin, sadece kabin kurutucu kullanarak 65°C sıcaklıkta kurutulan örneklere kıyasla daha kısa sürede aynı nem içeriğine ulaştığı ve kızıl ötesi kurutucuda işlem süresinin artmasının toplam süreyi daha da iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Kabin kurutucuda en hızlı kuruma 75°C sıcaklıkta 135 dakika olarak gözlemlenirken kızıl ötesi kurutucuda ise en hızlı kuruma 104 W gücünde 90 dakika olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca kereviz yapraklarının kabin kurutucuda kuruma kinetiği, renk değişimi ve matematiksel modelleme sonuçları da üç farklı sıcaklık değeri için incelenmiş ve en hızlı kuruma 75°C sıcaklıkta 45 dakika olarak

gözlemlenmiştir. Taze kök ve yaprak kerevizin renk değerlerine en yakın L\* (parlaklık), a\* (kırmızılık) ve b\* (sarılık) değerlerinin, 55°C sıcaklıkta ön işlem uygulanarak kurutulan numuneye ait olduğu belirlenmiştir. Kereviz kök ve yaprak numunelerinin kurutulması sırasında nem içeriklerindeki değişimi Lewis, Henderson & Pabis, Logatitmik, Page, Midilli& Küçük, Wang & Singh, Vega & Lamus ve Vega & Galvez matematiksel modelleri seçilerek incelenmiştir. Modellerin performansları regresyon katsayısı (R<sup>2</sup>), hataların ortalama karekökü (RMSE) ve ki-kare ( $\chi^2$ ) gibi istatistiki analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, Midilli & Küçük modelinin örneklerin kuruma davranışını diğer modellere göre daha iyi açıkladığı anlaşılmıştır. Kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin difüzyon katsayısı değerlerinin kontrol grubu örnekler için  $1,701 \times 10^{-10}$  ile  $3,317 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında, sitrik asit çözeltisi ile ön işlem uygulanan örnekler için  $1,753 \times 10^{-10}$  ile  $3,797 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında, aktivasyon enerji değerleri de sırasıyla 31,66 ve 32,70 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin difüzyon katsayısı değerlerinin kontrol grubu örnekler için  $2,746 \times 10^{-10}$  ve  $4,987 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında, aktivasyon enerjisi değeri ise 2,99 kW/kg olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kabin kurutma, kızılötesi kurutma, kereviz kurutma, matematiksel modelleme, renk analizi

# Effect of Different Drying Technics on Drying Characteristics of Celeriac

Cansın KURT

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. İlknur KÜÇÜK

In this study, the kinetics of  $6 \pm 0,5$  mm celery samples prepared in cube form were examined in laboratory type cabinet dryer and infrared dryer. Celery samples were divided into two groups, the first part was pretreated with 1% citric acid solution, the other part was kept in the first form and both dried at 55, 65 and 75 °C in the cabinet dryer and 62, 74, 88 and 104 W power levels in the infrared dryer. In addition to different temperatures and power levels, the effects of combined drying system and pretreatment on drying kinetics and color change of celery were investigated. For the combined drying system, two-stage drying was first provided using infrared and then cabinet dryer. In the infrared drying system, the samples were preteated at 74 W infrared power for 30 minutes and then were dried at 65°C in the cabinet dryer to reach the desired moisture level.

In the same conditions with previous experiments is repeated with infrared dryer, only changing the processing time as an hour. It has been observed that the samples dried by the combined drying system only reach the same moisture content in a shorter time compared to the samples dried at 65 °C using the cabinet dryer, and that increasing the processing time in the infrared dryer further improves the total time. In the cabinet dryer, the fastest drying was observed at a temperature of 75 °C for 135 minutes, while in the infrared dryer the fastest drying was observed at 104W for 90 minutes. In addition, drying kinetics, color change and mathematical modeling results of the celery leaves in the cabinet dryer were examined for three different temperature values and the fastest drying was observed at 75 °C and 45 minutes. It was determined that  $L^*$  (brightness),  $a^*$  (redness) and  $b^*$  (yellowness) values closest to the color values of fresh root and leaf of celery belonged to the sample dried by pretreating at 55 °C. The variation of moisture content during drying of celery root and leaf samples was investigated by selecting mathematical models of Lewis, Henderson & Pabis, Logarithmic, Page, Midilli & Küçük, Wang &



Singh, Vega & Lamus and Vega & Galvez. The performances of the models were evaluated by using statistical analysis methods such as regression coefficient ( $R^2$ ), mean square root errors (RMSE) and chi-square ( $\chi^2$ ). As a result of the studies, it was understood that the Midilli & Küçük model explained the drying behavior of the samples better than the other models. The diffusion coefficient values of celery which were dried in the cabinet dryer, between  $1.701 \times 10^{-10}$  and  $3.317 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the control group samples,  $1.753 \times 10^{-10}$  and  $3.797 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the pretreatments with citric acid solution, activation energy values were calculated as 31.66 and 32.70 kJ / mol, respectively. The diffusion coefficient values of the celery dried in the infrared dryer varied between  $2.746 \times 10^{-10}$  and  $4.987 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the control group samples and the activation energy value was calculated as 2.99 kW/kg.

**Keywords:** Convective drying, infrared drying, celery drying, mathematical modelling, color analysis



### 1.1 Literatür Özeti

İnsan yaşamının sürdürülebilmesi için zorunluluk olan gıdalar içerisinde meyve ve sebzelerin bozulmadan saklanabilmeleri, kullanılan gıda muhafaza yöntemlerini de son derece önemli hale getirmektedir. Bu yöntemler içerisinde, kolay uygulanabilir ve ekonomik olması nedeniyle kurutma çok eski zamanlardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde farklı kurutma teknikleri kullanılarak yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur.

Marianni vd. [1] çalışmalarında, soya fasulyesinin sıcak hava fırınında kurutma metodu ile modellenmesinde sıcaklık ve hızın etkilerini incelemiştir. Hava sıcaklığı 30-190 °C, hava hızı 0,75, 1,35, 2,0 ve 2,5 m/s olarak belirlenmiş ve kurutma zamanına bağlı nem içeriğinin değerlendirilmesinde üç farklı matematiksel modelleme yöntemi kullanılmıştır. İncelenen sonuçlarda difüzyon katsayısının  $2,5 \times 10^{-11}$  ve  $7,66 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s aralığında değiştiği ve gelecek çalışmalar için sıcaklık ve nem içeriğine bağlı olarak değerlendirilmesi gereken bir veri olduğunu tespit etmişlerdir.

Ramachandraiah ve Chin'in [2] yapmış olduğu çalışmada, kereviz saplarının fiziko-kimyasal özellikleri ve antioksidan aktivitelerinin incelenmesinde konvektif kurutma ve mikronizasyonun etkilerini incelemiştir. Mikronize edilmiş-öğütülmüş kereviz saplarının kurutma sıcaklıklarındaki artışa bağlı olarak ortalama tanecik boyutlarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. 50, 75 ve 100 °C kurutma sıcaklıklarında tanecik boyutları sırası ile 48,8, 10,5 ve 7,2 µm olarak ölçülmüştür. Tanecik boyutu düştüğünde toplam kütleli yoğunluğun arttığını tespit edilmişlerdir. Koyu (L\*) ve kırmızımsı (a\*) renkler yüksek sıcaklıklarda oluşurken, 50 ve 75 °C sıcaklıklarda öğütme işleminin uygulanması kurutulmuş tozların yeşilliğini (-a\*) artırdığını gözlemlemiştir. Antioksidan özelliklerindeki

değişimler incelendiğinde, sıcaklık artışına bağlı olarak toplam fenol içeriğini artırdığını, yüksek sıcaklık veya tanecik boyutunun küçültülmesinin demir şelatlama özelliğini etkilemediğini gözlemlemiştir. Yüksek sıcaklıklarda kurutulan kereviz saplarının mikronizasyonundan en iyi antioksidan aktiviteyi elde etmişlerdir.

Beigi ve Ahmadi'nin [3] yapmış olduğu çalışmada, yapay sinir ağları modeli kullanılarak kerevizin kuruma eğrilerinin tahmin edilmesi araştırılmıştır. Kereviz dilimlerinin vakum kurutma yöntemi ile kurutulmasına etki eden hava sıcaklığı, fırın iç basıncı ve zaman gibi ölçülen değerler yapay sinir ağları modellemesinde deneysel veri olarak kullanılmışlardır.

Doymaz [4] tarafından yapılan çalışmada, tatlı patates dilimlerinin kızılötesi kurutucu ile kurutulması sırasında farklı kızılötesi güç seviyelerinin (104, 125, 146 ve 167 W) kurutma kinetiğine ve rehidrasyon-su kaybı oranına etkisini incelemiştir. Kızılötesi güç seviyesi arttıkça kurutma süresinin azaldığını gözlemlemiştir. Bu çalışmada tatlı patatesin deneysel kurutma verileri Newton, Henderson&Pabis ve logaritmik modelleri kullanılarak kurutma kinetiği modellenmiştir. Bu üç kurutma modeli arasında, logaritmik modelin diğer modellere göre deneysel verilerle daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Efektif difüzyon hızı  $9,323 \times 10^{-11}$  ile  $1,758 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s değerleri arasında seyrederken, aktivasyon enerjisinin 22,7-23,2 kJ/mol aralığında değişkenlik gösterdiğini belirlemiştir.

Heybeli vd. [5] tarafından yapılan çalışmada, infrared kurutma tekniği kullanılarak kereviz dilim ve küplerinin kurutma karakteristiklerinin incelenmesinde ön işlemler uygulanarak ve ön işlemsiz olarak numuneler hazırlanmıştır ve farklı sıcaklıklarda yapılan denemelerde laboratuvar tipi infrared kurutucu kullanılmıştır. 60, 70 ve 80 °C'de kurutma işlemine tabii tutulan kereviz numunelerinin kuruma süresi, kuruma hızı ve renk değişimlerini incelemiştir. Örneğin şekil yapısı ve kurutma sıcaklığı kuruma süresi ve hızına etki ederken iki dakikalık kurutma ön işlemi olarak uygulanan buharda haşlama ve kaynayan suda haşlama yöntemlerinin etkisinin olmadığı ancak renk analizinde 60 °C'de kurutulan 5 mm kalınlığında dilimlenmiş ve kaynayan suda haşlama ön işlemine tabii tutulan numunelerin sarılık

sapması değerinin ( $\Delta b^*$ ) negatif yönde, parlaklık sapması ( $\Delta L^*$ ) değerinin ise pozitif yönde arttığını belirlemişlerdir.

Roman ve Hensel [6] tarafından yapılan çalışmada, kereviz yapraklarının ince tabaka metodu ile kurutulmasında hava sıcaklığı ve bağıl nemin etkilerini incelemişlerdir. Yapılan alışmada 20-50 °C sıcaklık aralığında ve %10-60 bağıl nem oranlarında çalışılarak laboratuvar ölçeğinde elde edilen kuruma verileri altı farklı matematiksel modelleme yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan denemelerde hava sıcaklığının bağıl neme oranla daha etkili olduğunu gözlemişlerdir. Yapılan modellemelerde iki terimli eksponansiyel modeli yapılan çalışmalara göre en iyi eşleşme-sonuçları vermiştir. Modelleme parametrelerinin hava sıcaklığı ve bağıl neme bağlı olarak değişimi üzerine yapılan çalışmada a regresyon bağlanım parametresi sabit ve ihmal edilebilir olarak kabul edilirken, k parametresi hava sıcaklığı ve bağıl nemin parçalı bir fonksiyonu olarak en iyi eşleşmeyi sağladığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada ayrıca 50 °C zeri sıcaklık ve nem fazlasının kurutulmuş kereviz yapraklarının renk oluşumunu olumsuz ve negatif yönde etkilediğini tespit etmişlerdir.

Wei vd. [7] yapmış olduğu çalışmada, ince tabaka kurutma yöntemi ile kereviz köklerinin kurutma davranışlarını incelemişlerdir. Laboratuvar lekli kurutucuda 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarda sıcak hava kurutma yönteminin kuruma zamanı, kuruma hızı, nem içeriği, nem oranı efektif nem difüzyonu üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, deneysel veriler on beş farklı matematiksel model ile değerlendirilmiş ve en iyi eşleşme Hii modeli ile sağlanmıştır. Belirli alışma sıcaklığı aralığında (50-70 °C) ortalama efektif nem difüzyonu sıcaklık ile artmakla birlikte  $1,957 \times 10^{-9}$  ile  $9,016 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s aralığında değişkenlik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Kuruma prosesine ait aktivasyon enerjilerinin hesaplanmasında Arrhenius denklemi kullanılarak ortalama 21,817 kJ/mol olduğunu hesaplamışlardır.

Yıldız ve Sarımeşeli [8] yapmış olduğu çalışmada, kerevizin mikrodalga yöntemi ile kurutulmasını tepki yüzeyi modelleme yöntemi (RSM) kullanarak incelemişlerdir. Yüzey tepki metodunu, deneysel verilerin tasarımı, yapının modellenmesi, kontrol faktörlerinin değerlendirilmesi ve en ideal proses Őartlarının belirlenmesinde

istatistik ve matematiği birleştiren bir modelleme yöntemi olması sebebi ile tercih etmişlerdir. Üç aşamalı merkezi kompozit tasarımına (CCRD) göre kullanılan değişkenler A-X1 (sebze yükleme miktarı), B-X2 (mikrodalga gücü), C-X3 (kuruma zamanı), nem oranı ve kuruma zamanı için RSM yöntemi kereviz köklerinin nem oranının güvenli seviyeye ulaştırılmasına etki eden proses verileri olarak kullanmışlardır. Optimize edilmiş proses şartlarını, RSM yöntemi ile elde edilen kuruma zamanı ve nem oranına etki eden veri değişkenlerinin analizi ve ikinci dereceden polinomal denklemler kullanılarak elde etmişlerdir.

Doymaz [9] yaptığı diğer bir çalışmada, küp şeklinde kesilen havuçların kurutulmasında konvektif kurutma yöntemi ile hava sıcaklığı, hava akış hızı ve numune kalınlığının kuruma kinetiği üzerine etkilerini incelemiştir. Kabin tipi kurutucuda 50, 60, 65 ve 70°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen kurutma işlemlerinden elde edilen veriler ile kuruma hızında meydana gelen düşmeye bağlı difüzyon değerlerini belirlemede kullanmıştır. Havuç küplerinden nem transferi ve azalan hız periyodunun tanımlanmasında Ficks difüzyon modelini uygulamış, efektif nem difüzyon katsayısını hesaplamıştır. Efektif difüzyon sıcaklık ve hava akış hızındaki artışa bağlı olarak artış gösterdiğini tespit etmiştir. Difüzyon katsayısının sıcaklığa olan bağlılığı Arrhenius-tipi ilişki ile tanımlanmıştır. Nem difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi 28,36 kJ/mol olarak hesaplamıştır. Havuç küplerinin kuruma karakteristiklerinin incelenmesinde Page modeli, Handerson ve Pabis modeline göre daha iyi değerler elde etmiştir.

Bialobrzewski [10] tarafından yapılan çalışma, kereviz köklerinin doğal konveksiyon şartlarında sıcak hava metodu ile kurutulmasından elde edilen verilerden kütle transfer katsayısının belirlenmesi üzerinedir. Eş zamanlı kütle transfer katsayısı ve efektif nem difüzyonu-yayılmalarının belirlenmesinde ters problem yaklaşımını uygulamıştır. Kurutma sırasında maddenin büzülmesinin hesaba katıldığı çalışmada, sonuçlar literatür verileri ve Chilton-Colburn analogisine dayanarak alınan değerler ile karşılaştırılmıştır. Chilton-Colburn analogisine dayanan kütle transfer katsayısı belirleme yönteminin, serbest konveksiyon koşullarında kereviz kökü kurutmasına uygulandığında brüt hatalarla yüklendiği bulunmuştur.

Bialobrzewski [11], tarafından yapılan diğerk bir çalışmada, doğal konveksiyon şartlarında sıcak hava metodu ile kurutulan kereviz köklerinin ısı transfer katsayısındaki değişimlerin belirlenmesinde ters problem formülasyonu baz alınmıştır. Elde edilen verileri boyutsuz denklemlerden elde edilenler veriler ile karşılaştırmıştır. Tanecik geometrisi ve dış ısı değişiminin de etkisinin incelendiği çalışmada ters problem yaklaşımı ile elde edilen ısı transfer katsayısı değerlerinin boyutsuz sayılar denklemi ile karşılaştırıldığında daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Karabacak vd. [12] yaptığı çalışmada, mikrodalga ve mikrodalga destekli kurutmanın çeşitli meyve ve sebzelerin kalite parametreleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Mikrodalga kurutmanın geleneksel kurutma yöntemlerine göre daha hızlı nem transferi sağlamının yanında gıdaların besin değerlerini daha iyi koruduğu belirlenmiştir. Mikrodalga kurutma yöntemi ile her tip sebze ve meyvenin kurutulamayacağı, seçilecek dalga boyu ve frekansın son ürün kalitesinin belirlenmesinde önemli parametreler olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmede mikrodalga kurutmanın ilk tesis yatırımının pahalı olmasına rağmen farklı kurutma yöntemleri ile kombine edildiğinde ürün kalitesini artırmaya yardımcı olduğu ve enerji verimliliğini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Kaya vd. [13] yapmış olduğu çalışmada, Trabzon hurmasının kuruma davranışını farklı hız ve sıcaklıklarda konvektif kurutucudan elde edilen veriler ile incelemişlerdir. Üç farklı hız (0,5, 1 ve 1,5 m/s) ve sıcaklıkta (50, 60, 70 C) yapılan çalışmada elde edilen kuruma eğrileri Lewis, Henderson-Pabis ve iki terimli exponansiyel gibi ince tabakalı kurutma modeline yerleştirilerek difüzyon ( $D_{eff}$ ) ve kütle taşınım ( $h_m$ ) katsayılarının kurutma hava sıcaklığı ile değerimleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde artan hava sıcaklığı ile her iki katsayının da arttığı, ürünlerde renk değerimi meydana geldiği, su aktivitesinin azaldığı ve protein içeriğinin arttığı belirlenmiştir.

Tuğrul vd. [14] yapmış olduğu çalışmada, kabin ve mikrodalga tipi kurutucular kullanarak dereotunun kuruma karakteristiklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmaların sonucunda sıcaklık artışının kurutma işlemini hızlandırdığı tespit edilmiştir. Mikrodalga yöntemi ile kurutmanın çok daha hızlı gerçekleştiğinin

belirlendiği çalışmada, yüksek sıcaklıkta ( <70  C) alışmanın her iki tip kurutucuda renk kalitesi ve parlaklık açısından önemli olduğu tespit edilmiştir. Kabin kurutucudan alınan numunelerin ağırlık ölçümleri ile deneysel verilerden yararlanılarak nem içeriği ile kuruma arasındaki ilişki Page ve Exponansiyel denklemler uygulanarak korelasyon katsayı değerleri hesaplanmıştır. Page denkleminin  $r^2$  değerlerinin Exponansiyel denkleme göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Gıda rnlerinin özelliklerini kaybetmeden sadece mevsimsel olarak değil tüm yıl boyunca kullanılabilmesini sağlayan gıda muhafaza yöntemleri içerisinde kurutma önemli rol oynar.

Bu çalışmada, kereviz sebzesinin sıcak havallı kabin kurutucu ve kızılötesi kurutucu olmak üzere iki farklı kurutma tekniği kullanılarak kurutma karakteristikleri incelenmesi hedeflenmiştir.  n işlem etkisi ile farklı sıcaklık ve g değerleri için kuruma karakteristiklerinin değişimi değerlendirilerek, kurutma kinetiğinin belirlenmesi, sekiz farklı model içerisinde en uygun modelin seçilmesi amaçlanmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Sebze ve meyve gibi gıda ürünlerindeki yüksek nem içeriği kolaylıkla ve hızla bozunmalarına yol açan önemli bir etmendir. Gıda muhafaza yöntemleri içerisinde gıdaların içerdikleri nem miktarın azaltılmasını sağlayan ve böylelikle daha uzun süre kullanılabilir hale gelmelerini kolaylaştıran kurutma, hacim küçülmesinden dolayı ambalaj ve taşıma maliyetlerini azaltması, diğer muhafaza yöntemlerine kıyasla daha uzun muhafaza süresine sahip olması ve besin öğeleri yönünden konsantrasyon sağlaması gibi çeşitli avantajlar sergiler.

Kurutma işlemlerinde kullanılan kurutucunun türü ile birlikte sıcaklık, uygulanan enerji miktarı ve kurutulacak gıdanın özellikleri kuruma hızına etki eden faktörlerdir.

Kullanılan kurutma tekniğine bağlı olarak kütle transfer hızının değişmesi ile kurutma süresinin de değişmesi beklenen bir sonuçtur. Bu çalışmada, kabin tipi bir

kurutucu, kızılötesi (IR) kurutucu ve her ikisinin bir arada kullanıldığı kombine sistem (IR-HA) ile kök ve yaprak kerevizin kurutma hızı, kuruma kinetiği ve kurutma sürecinin kontrolü ve enerjiyi verimli kullanan kurutma sistemi tasarlanabilmesi için matematiksel modeller araştırılmıştır.





## 2.1 Gıda Kurutma ve Kurutucular

Gıda maddelerinin dayanıklılığını artırmak için kullanılan en eski muhafaza yöntemlerinden birisi kurutmadır. Gıda maddelerinin kurutulmasındaki temel amaç, mikrobiyal bozunmaların ve kimyasal reaksiyonların yavaşlatılması veya durdurulması amacıyla katı maddelerden suyun uzaklaştırılmasıdır. Meyve ve sebzelerin kurutulmasında başlıca, konvansiyonel kurutma, vakum kurutma, kızılötesi ışınlar ile kurutma, ozmotik kurutma, dondurarak kurutma ve mikrodalga ile kurutma yöntemleri kullanılmaktadır [12].

Kurutma işlemi; hava ile ürün arasında eş zamanlı gerçekleşen ısı ve kütle transferi olarak tanımlanmaktadır [13]. Meyve ve sebzelerin kurutulması esnasında %80-95 oranındaki su içeriği %10-20 seviyelerine düşürülürken tat, renk, besin değeri, görünüm ve rehidrasyon yeteneği korunarak ürünlerin uzun süre dayanımı sağlanmaktadır. Kurutulmuş gıdalar, besin öğeleri açısından yoğunlaştırılmış bir nitelik kazanır. Endsütriyel kurutma işlemi daha az ekipman ve işçilik, depolama ve taşımada daha ekonomik olduğundan önemli ve ayrıcalıklı bir uygulamadır [15].

Meyve ve sebzelerin kurutulmasında güneş altında doğal yolla kurutma halen yaygın bir yöntem olmasına rağmen açıkta kurutulan ürünlerde kirlilik, hijyen problemlerinin yanında her mevsim uygulanamama gibi dezavantajları vardır. Bu neden ile ısıtılmış hava ile çalışan kurutucuların önemi artmış ve güneşte kurutmaya alternatif haline gelmişlerdir [14].

Gıdaların bozulmasında, içeriğindeki su miktarından daha çok su aktivitesi önemli bir değerlendirme kriteridir ve Raoult yasası esas alınarak türetilen (2.1) eşitliğinde görüleceği üzere gıda içerisinde bulunan suyun buhar basıncının ( $P$ ), aynı sıcaklıkta bulunan saf suyun buhar basıncına ( $P_0$ ) oranına su aktivitesi denir ve  $a_w$  sembolüyle gösterilir [16].

$$a_w = P/P_0 \quad (2.1)$$

Gıda teknolojisinde önemli bir parametre olan su aktivitesi 0-1 değerleri arasında değişmektedir. Gıdalar su aktivitesine göre yüksek nemli (0,9-1,0 arasında), orta nemli (0,6-0,9 arasında) ve düşük nemli (0,6'nın altında) olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Çoğunlukla kuru gıdalar az nemli gıda grubuna girerler. Gıdalarda bulunan su miktarı mikroorganizmaların gelişmeleri ve faaliyetleri için önemli bir ortam oluşturduğundan su aktivitesi de gıda içerisinde bulunan suyun mikroorganizmalar tarafından ne kadar kullanıldığını göstermektedir. Bu sebeple, su aktivitesi kontrolü ile gıdalarda oksidatif stabilite sağlanabilmekte, enzimatik ve enzimatik olmayan bozulmalar önlenabilmekte ve mikrobiyal faaliyetler kontrol edilebilmektedirler [17].

## **2.2 Kurutma İşleminde Temel Terminolojiler**

### **2.2.1 Adyabatik Doymuluk Sıcaklığı (T<sub>ad</sub>)**

Adyabatik koşullarda hava-buhar sistemlerinde bulunan sıcak gazın enerjisi ile ortamdaki sıvıyı buharlaştırması ve yine buharlaşan sıvı ile gazın doymun hale geldiği sıcaklıktır. Sadece hava/su sistemleri için ıslak termometre sıcaklığı olarak da adlandırılır [18]

### **2.2.2 Bağlı Nem**

Kurutulacak maddeye fiziksel ya da kimyasal olarak bağlı bulunan ve aynı sıcaklıkta saf suya kıyasla daha düşük buhar basıncı olan nem içeriğidir [18].

### **2.2.3 Sabit Kuruma Periyodu (N<sub>c</sub>)**

Sabit kurutma koşullarında gıdanın birim alanından birim zamanda buharlaşan nemin sabit olduğu periyottur. Bu durum yüzey nemi gıdadan uzaklaşırken gerçekleşir [18].

### **2.2.4 Çiy Noktası (T<sub>d</sub>)**

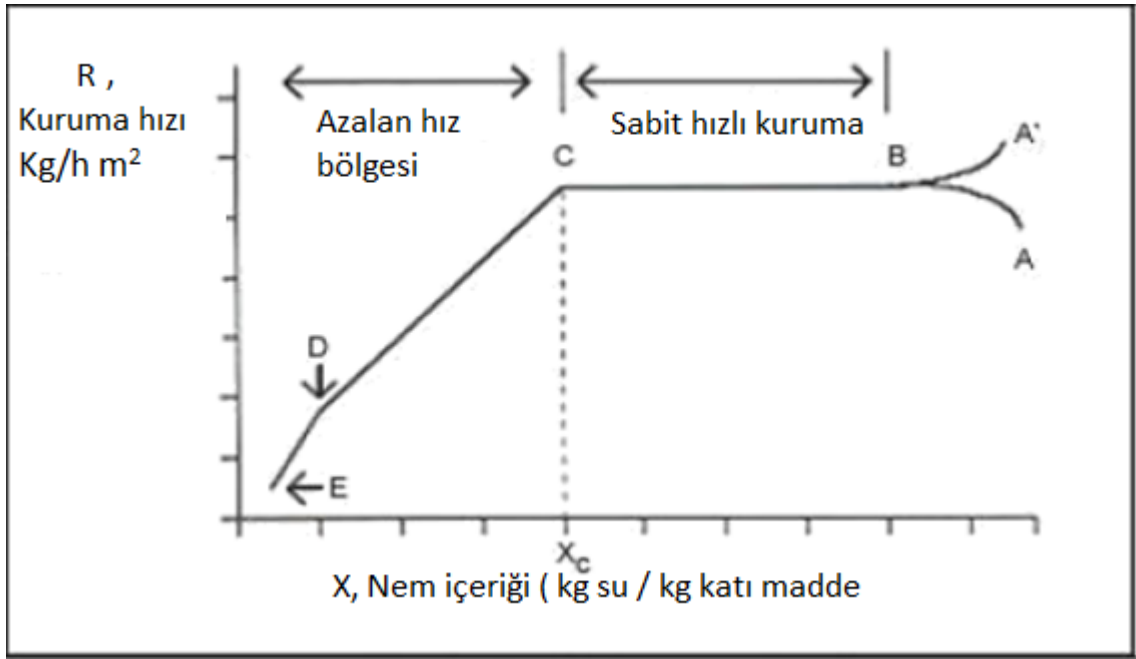
Doymamış hava-buhar karışımının doymunluğa ulaştığı sıcaklıktır [18].

### 2.2.5 Denge Nem İçeriği ( $X_e$ )

Belirli bir sıcaklık ve basınçta hava-buhar karışımı ile nemli gıdanın dengede olduğu andaki nem içeriğidir [18].

### 2.3 Kuruma Eğrilerinin Karakteristikleri

Nem oranının zamana bağlı türevi, kuruma hızı olarak bilinir. Kurutmanın aşamaları Şekil 2.1’de görüldüğü üzere kurutma işlemi, ısınma, sabit ve azalan periyot olmak üzere üçe bölünebilir [19].



Şekil 2.1 Kuruma eğrilerinin temel özellikleri [20]

Isınma periyodu (A-B): Kurutulacak olan gıdanın üzerinden sıcaklığı ve nem içeriği belirli olan hava akımı geçirildiğinde ısıtıcı havanın gıdaya verdiği ısı enerjisinin bir kısmı gıda yüzeyinin sıcaklığını yükseltirken, diğer kısmı buharlaşma ısı olarak kullanılır. B noktasına kadar olan bu süreç A-B periyodunu kapsar, bu bölgede kuruma hızı düşüktür.

Sabit kuruma periyodu (B-C): B noktasından sonra başlayan (B-C) periyoduna sabit kuruma periyodu denir. Bu periyotta, kurutucu havadan gıdaya ısı enerjisinin aktarılma hızı, buharlaşma hızına eşit olur. Kuruma hızını, gıdanın yüzeyindeki su içeriği ile kurutucu havanın su içeriği arasındaki fark belirler. Aynı zamanda;

kuruma hızını, gıdanın üzerindeki havanın buhar basıncı ile kurutucu havanın içindeki kısmi buhar basıncı arasındaki fark belirler de denebilir.

Birinci azalan kuruma periyodu (C-D): Kuruma devam ederken gıdanın nem içeriği azaldığından iç kısımdaki nem dış yüzeye difüzlenerak devamlı bir sıvı filmi oluşturamaz. Kuruyan dış yüzeyde yer yer kuru noktalar oluşmaya başlar. Kritik nem içeriği olarak adlandırılan C noktasından itibaren kuruma hızı düşmeye, gıdanın yüzey sıcaklığı artmaya başlar. (C-D) boyunca kuruma hızının devamlı azaldığı bu periyoda birinci azalan kuruma periyodu denir.

İkinci azalan kuruma periyodu (D-E): D noktasından itibaren gıda yüzeyindeki kuru noktalar genişlemeye başlar ve en dışta kuru bir tabaka oluşur. Isı geçirgenliği az olan kuru tabakanın oluşması ve yüzeye taşınacak sıvı tabakanın difüzyon hızının azalması ile kuruma hızı D noktasından itibaren devamlı azalır. Bu D noktasına ikinci kritik nem içeriği noktası denir. (D-E) boyunca, buharlaşma hızı, iç tabakalardan yüzeye difüzlenerak nemin difüzyon hızına bağlıdır. Buharlaşma (kuruma) hızı azaldıkça kurutucu havadan alınan ısı enerjisinin az bir miktarı buharlaşma ısısı olarak kullanıldığından gıdanın yüzey sıcaklığı daha da artar. E noktasına ulaşıldığında buharlaşma durur. Çünkü kurutucu havanın içindeki nemin buhar basıncı ile gıdanın içindeki nemin buhar basıncı eşit olunca kuruma sona erer. Bu durumda, buharlaşma olmadığından verilen ısı buharlaşma ısısı olarak kullanılmaz; bu ısı, ürün sıcaklığını artırır ve kuruyan gıdanın sıcaklığı kurutucu havanın sıcaklığına (kuru termometre sıcaklığına) yaklaşır. Gıdanın nem içeriğini daha da düşürmek için kurutucu havanın sıcaklığını arttırmak ya da nemini azaltmak gerekir [21].

## **2.4 Kurutma hızına etki eden etmenler**

Kurutma hızı ürün kimyasal bileşimi, ürün tanecik boyutu, sıcaklık, atmosfer basıncı, hava besleme hızı ve neminden etkilenebilmektedir.

### **2.4.1 Ürünün Kimyasal Bileşimi**

Gıdanın kimyasal bileşimi kuruma boyunca değişir. İçerisinde tuz, şeker gibi çözülmüş maddeler bulunduran ürünler, nişasta ve pektin içeren maddeler, glikoz ve yağ içeren ürünler daha uzun sürede kurur. Gıdanın homojenliğini bozan

çözünmüş maddeler suyun buhar basıncını düşürmektedir. Bu durum gıda içerisinde bulunan suyun buharlaşmasını güçleştirir [22].

#### **2.4.2 Ürünün Boyutları**

Ürünün Boyutları: Kuruma hızı, gıdanın yüzey alanıyla doğru, kalınlıklarıyla ters orantılıdır. Bu nedenle kurutulan gıdaların yüzey alanı fazla, kalınlığı az olmalıdır. Böylece kuruma hızı olumlu yönde etkilenir [22].

#### **2.4.3 Sıcaklık**

Kurutma ortamının sıcaklığı ve gıdanın kurutulmadan önceki sıcaklığı önemlidir. Düşük kurutma sıcaklığı son ürünün kalitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmasına karşın kurutma süresini uzatmaktadır. Diğer taraftan yüksek kurutma sıcaklığı kurutma süresini azaltmasına rağmen, çok yüksek seçildiğinde yüzeyin hızla nem kaybederek kabuk bağlaması sonucu ürünün kuruma süresinin uzamasına da neden olabilmektedir [22].

#### **2.4.4 Havanın Hızı**

Havanın Hızı: Havadaki moleküllerin hareketi ve bu hareketin hızındaki artış kurutmayı olumlu yönde etkiler. Ancak yine de optimum değerlerin üzerine çıkılması durumunda istenmeyen sonuçlar gözlemlenebilir [22].

#### **2.4.5 Havanın Nemi**

Havanın bağıl nemi, kurutmanın bitirileceği nem seviyesini belirler. Kurutulmakta olan gıdayla hava nemi arasında bir denge oluşuncaya kadar kurutma işlemi devam eder [22].

#### **2.4.6 Atmosfer Basıncı**

Çevre atmosferdeki havanın basıncı azaldıkça, buharlaşma artacağından kurutma süresi kısalmır [22].

## **2.5 Kurutma İşlemi Sırasında Gıdada Meydana Gelen Kalite Değişimleri**

Kurutma işlemi sırasında karşılaşılan kalite değişiklikleri dört başlık altında aşağıda değerlendirilmiştir.

### **2.5.1 Kararma Tepkimeleri**

Kurutma esnasında gıda ürünlerine uygulanan sıcaklığa bağlı olarak Maillard tepkimesi veya enzimatik tepkimeler esmerleşmeye sebep olabilir. Enzimatik tepkimeler, fenolik bileşiklerin esmer ve siyah polimerlere dönüşmesidir. Enzimatik olmayan tepkimeler ya da Maillard tepkimeleri kompleks tepkimeler olup, indirgen şekerlerle amino asitlerin amin grupları arasında oluşurlar. Az nemli gıdalarda esmerleşme tepkimelerine katılacak girdilerin çok azı suda çözülmüş durumdadır. Ayrıca düşük su aktivitesine sahip gıdalarda difüzyon direncinin yüksek olması bu tepkimelerin hızlarını azaltmaktadır. Ancak ortamdaki suyun artmasıyla suda çözünen tepkime girdileri artmakta ve dolayısıyla difüzyon direnci de azalmaktadır. Böylece gıdada bulunan nem arttıkça enzimatik olmayan esmerleşme tepkimelerinin hızları artmaktadır. Gıdalarda kurutma esnasında oluşan esmerleşme tepkimeleri kaliteyi olumsuz olarak etkilemektedir [16].

Kararma tepkimelerinin engellenmesi için kurutulan gıdalar çok yüksek sıcaklıklara maruz kalmamalıdır [23].

### **2.5.2 Lipid oksidasyonu**

Lipid oksidasyonu oksijen bulunan ortamda değişik bileşenlerin otooksidasyonudur. Gıdalardaki lipid oksidasyonu neticesinde, istenmeyen tatlar oluşabilir ya da yağlar veya yağ içeren gıdalarda yağ asitlerinin parçalanmasıyla ransit (acılaşma) aroma meydana gelebilir [16].

Gıdalarda bulunan nem içeriği oksidasyon reaksiyon hızı üzerinde etkili olmakta ve su aktivitesinin 0,3 seviyelerine inmesi lipid oksidasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Oksijen varlığının azalması da lipid oksidasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır [23].

Yağda çözünen vitaminlerin parçalanması lipid oksidasyonu ile ilgilidir ve gıdalarda bulunan nem içeriğinin azalmasıyla bu vitaminlerin parçalanması azalmaktadır [16].

### **2.5.3 Büzülme**

Kurutma süresince gıdada oluşan en önemli fiziksel değişim gıdanın dış hacminde gerçekleşir. Nem kaybı ve kurutma sıcaklığının artması, gıdanın boyutunda küçülmeye ve şeklinde değişikliğe neden olduğundan, gıdaların hücresel yapısında bir değişime sebep olur. Kurutulan gıdanın su aktivitesi azalır, gıdadan uzaklaştırılan su miktarı arttıkça gıdanın büzülmesi de artar. Gıdadaki büzülme kurutulmuş ürünlerin kalitesini olumsuz yönde etkiler. Kurutulmuş üründe şekil değişikliği, hacmin küçülmesi ve sertleşme olması tüketici üzerinde olumsuz algıya neden olur [21].

### **2.5.4 Besin Kayıpları**

Besin kaybı yaşanmaması, kurutulmuş gıdaların kalite parametrelerindedir. Gıdalarda kurutma esnasında besin içeriği açısından ana besin öğelerinde (karbonhidrat, protein ve yağ) kayıplar gözlenmektedir. Gıdaların içeriğinde bulunan proteinler ısıya karşı oldukça duyarlı olduğu için, kurutma sıcaklığının artmasına bağlı olarak denatürasyonlar gözlenebilir. Kurutmanın gıdaların beslenme değerleri üzerine etkilerinin araştırılmasında C vitamini (askorbik asit) de bir değerlendirme parametresi olarak kullanılabilir. Gıdaların C vitamini içeriğini uzun süre korumak için düşük su aktivitesinde ve düşük sıcaklıkta saklamak gereklidir. Besinsel kayıplar uygun ön işlemlerin uygulanması, uygun kurutma yöntemlerinin kullanılması ve kurutma koşullarının optimize edilmesiyle elimine edilebilir [24].

## **2.6 Kurutmada Matematiksel Modellemenin Önemi**

Meyve ve sebzelerin etkileşim alanı ve hacmi kurutma işlemi esnasında önemli değişikliklere uğrar. Kurutma işleminde su buharlaştıkça etkileşim alanı yüzeyin büzülmesinden dolayı azalmaktadır. Değişiklikler sonrası gıdanın içerisinde ve dışarısında meydana gelen durum kurutma işleminde modelleme işlemi oldukça

karmaşık hale getirmektedir. Değişen kurutma koşulları yardımıyla kurutma kinetiğinin hesaplanması uygun kurutma koşullarının bulunmasına yardımcı olmaktadır. Farklı çalışmalarda çeşitli modeller kurutma işlemini tanımlamak için kullanılmaktadır.

Page, Modifiye Page, Logaritmik, Henderson & Pabis, Newton ve Midilli ve Küçük modelleri kurutma işlemini tanımlamak için kullanılan modellerden bazılarıdır [20].

İnce tabaka kurutma, genellikle örneklerin bir tabaka halinde kurutulması anlamını taşımaktadır. İnce tabaka eşitliklerinin kurutma çalışmalarında tercih edilmesinin nedeni kullanım kolaylığı ve az veriye ihtiyaç duyulmasıdır.

İnce tabaka eşitlikleri teorik, yarı-teorik ve ampirik modeller olarak üç başlıkta incelenebilir [25].

Teorik modeller, tüm proses koşulları için kullanılabilir. Teorik modeller Fick'in ikinci yasasından türetilmiştir. Teorik modeller ile nem transferinde sadece iç kuvvetler hesaba katılır.

Yarı-teorik modeller, Fick yasasının yanı sıra Newton'un soğuma kanunundan da türetilmektedir. Yarı-teorik modellerin uygulamaları kolaydır ve deneysel verileri kullanmak için daha az varsayıma ihtiyaç vardır. Fakat, bu modeller sadece uygulanan proses koşulları için geçerlidir.

Ampirik modeller, yarı-teorik modellere yakın özelliktedir. Deney koşullarına bağlıdır ve ürünlerin kurutma davranışları hakkında sınırlı bilgi verirler. Yarı-teorik ve ampirik modellerde gıda ile kurutucu hava arasındaki nem transferindeki dış kuvvetler de göz önünde bulundurulur.

Gıdaların kurutulması çalışmalarında genellikle yarı-teorik ve ampirik modeller tercih edilmektedir [25].

## **2.7 Kurutma Öncesi Uygulanan Ön İşlemler**

Gıdaların kurutulması sırasında ve sonrasında meydana gelen olumsuzlukları önlemek ve kurutulan gıdanın kurutma süresinin azaltılması için kurutma öncesinde bazı ön işlemler uygulanmaktadır. Taze gıdaların kurutulmasında uygulanan ön işlemler genel olarak ayıklama, sınıflandırma, yıkama vs. gibi



işlemlerden oluşur. Ayrıca, gıdaların kurutulmasında kükürtleme, alkali çözelti uygulaması, haşlama, tuzlama ve değişik çözeltilerin uygulanması gibi ön işlemler kullanılabilir. Güneşte ya da endüstriyel sistemlerle kurutmada bu ön işlemler tek veya birlikte kullanılabilir [26]. Bu ön işlemler aşağıda kısaca derlenmiştir.

### **2.7.1 Kükürtleme**

Gıdalara kurutma işlemi uygulandığında renk değişimleri görülmektedir. Gıdalarda, özellikle meyvelerde kurutma süresince meydana gelen enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşmeleri önlemek için kükürtleme uygulaması yapılır. Kurutulacak gıdanın genellikle kükürt elementi yakılarak oluşturulan kükürt dioksit gazına maruz bırakılması, sodyum metabisüfit çözeltilerine gıdanın daldırılması veya bu çözeltilerin gıda üzerine püskürtülmesi yöntemlerine denilmektedir [26].

Kükürt dioksit kurutulacak gıdanın hücredeki oksidasyon enzimlerini inaktif ederek enzimatik reaksiyonları, karbonil grubu ara ürünlerinin esmer pigmentlere dönüşümünü bloke ederek enzimatik olmayan reaksiyonları önlemektedir. Kükürt dioksit gazı geçmişte oluşan kararırma reaksiyonlarının etkisini azaltarak gıdanın renginin açılmasına da sebep olabilir.

Kükürt kullanımının bazı olumsuz etkileri vardır, özellikle astımla ilgili ciddi yan etkileri olabilmektedir. Bu nedenle Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA), Amerika'da kükürt kullanımını kısmen sınırlandırmıştır [27]. Genelde meyvelerde ön işlem olarak uygulanır.

### **2.7.2 Alkali Çözelti Uygulaması**

Parçalanmadan kurutulan ve bitkilerin deri hücreleri tarafından salgılanan kütin maddesinin bitki dış organlarında birikmesi sonucu oluşan kütikula tabakası bulunan ürünlerde bu katmanın giderilmesi, inceltmesi veya hidrofilik özellik kazandırılması gerekir. Bazı ürünlerde ön işlem olarak alkali çözeltiler (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) daldırma veya püskürtme şeklinde uygulanır. Bu ön işlemlerde amaç ürün üzerindeki mumsu tabakanın giderilerek kurumanın hızlandırılmasıdır. Bu alkali çözeltiler içinde NaOH en yaygın olarak kullanılır. Bazı durumlarda farklı alkali karışımları da kullanılır. Daldırma çözeltisinin sıcak olması üst derideki enzimlerin parçalanmasını sağlar. Az olgun ve kuru bölgelerde yetiştirilen ürünler

için kullanılan alkali çözeltilerin derişimi artırılır. Alkali çözeltiler ile ön işlem uygulanırken sertliği az olan sular kullanılmalıdır. “Bandırma çözeltisi” veya “potasa eriyiği” olarak adlandırılan çözelti %5-6  $K_2CO_3$  alkali çözeltiye %0,5 zeytinyağının ilave edilmesiyle hazırlanır. Bu ön işlem rengin korunmasına da yardımcı olur [26].

### **2.7.3 Haşlama**

Özellikle parçalanan gıda ürünlerinin kurutulmasında enzimlerden kaynaklanan besin kayıplarını önlenmek için haşlama yapılır. Gıdaların haşlanmasında, hidrojen varlığında peroksitleri parçalayan ve renk kararmasına sebep olan peroksidaz enziminin elimine edilmesi amaçlanır [26]. Genelde sebzelerde ön işlem olarak uygulanır.

### **2.7.4 Tuzlama**

Kurutulmuş ürünlerde depolama sürecinde küf ve maya oluşumu görülür. Bu amaçla kuru gıdaların mikrobiyal yükünü kontrol altına almak için ön işlem olarak tuzlama yapılmaktadır. Tuz, kurutulacak gıdaya doğrudan serpmeye, tuzlu çözeltilere daldırma veya püskürtme yöntemiyle uygulanabilir [26]. Genelde domateslerde ön işlem olarak uygulanır.

### **2.7.5 Diğer Çözeltilere Daldırma**

Kurutma sürecinde gıdayı özgün haliyle muhafaza edebilmek için ön işlem çözeltisi olarak askorbik asit, sitrik asit, sistein ve etil oleat kullanılabilir [26].

## **2.8 Kurutucu Türleri**

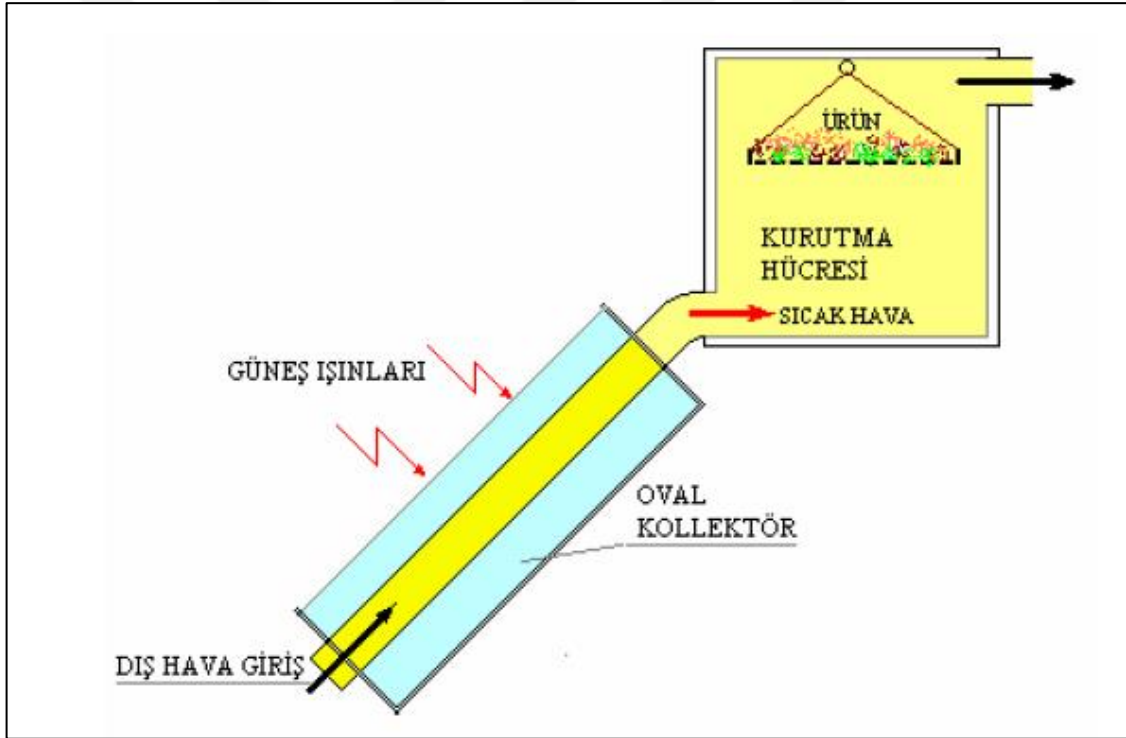
Geçmişten beri en yaygın kurutma yöntemi güneş altında kurutmadır. Ancak, her durumda güneş altında kurutmanın elverişli olmaması, kurutmanın uzun sürmesi, ürünün dış etkilere açık olması, hijyenin sağlanamaması vb. sebeplerle endüstriyel kurutma sistemleri güneşte kurutmaya tercih edilmektedir [28].

Endüstriyel kurutma, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel kurutmanın avantajları olarak daha az enerji tüketimi ile depolama ve taşımada küçük hacimli, uzun raf ömürlü ve yoğun besin değeri olan ürünler elde etmek sayılabilir.

Solar kurutucular, hava üflemeli kurutucular, vakum kurutucular, mikrodalgalı kurutucular, kızılötesi kurutucular, dondurarak kurutma sistemleri en çok tercih edilen sistemler arasında yer almaktadır. Endüstriyel olarak kolaylıkla uygulanabilen bu kurutma sistemleri, tüketiciye yüksek kaliteli, hijyenik ve homojen ürünler sunmaktadır [28].

### 2.8.1 Solar Kurutucular

Solar kurutucularda elektrik enerjisi yerine güneş enerjisi kullanılmaktadır. Bu sistemde kurutulacak ürün güneş enerjisine doğrudan maruz kalmayıp, güneş enerjisi ile ürünü kurutacak hava ısıtılır veya ısıtmada kullanılacak su buharlaştırılır (Şekil 2.2). Solar kurutucuların üretim ve kullanım maliyeti düşüktür. Ancak bu sistemde sıcaklık kontrolü yapılamamaktadır [21].



Şekil 2.2 Solar kurutucu [29]

### 2.8.2 Hava Üflemeli Kurutucular

Hava üflemeli kurutma sistemleri basit tasarımlı, farklı yapıdaki ürünlerin kurutulabildiği, hızlı, homojen ve hijyenik kurutma sağlayan sistemlerdir. Hava

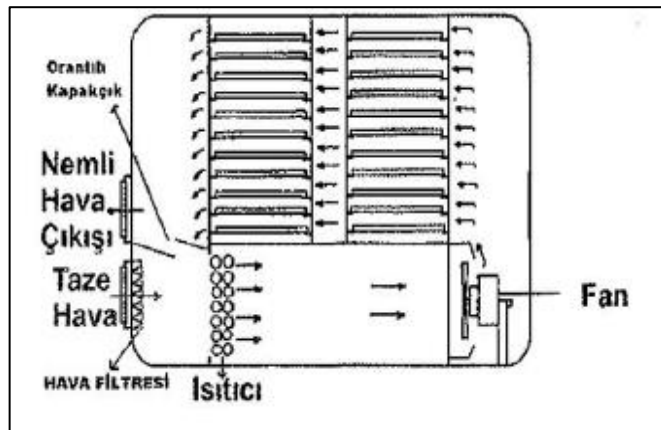
üflelemeli kurutucularda kurutucu havanın hızı, ürün kalınlığı ve sıcaklık kurutma özelliklerini ve hızını etkileyen faktörlerdir [28].

Hava üflelemeli kurutucuda sürekli olarak belli şartları sağlayan havanın kullanılması amaçlanır. Enerji verimini de dikkate alarak, sürekli taze hava kullanmaktansa, kurutucudan çıkan kullanılmış havanın bir bölümü ile taze hava karıştırılıp, bu karışımın ısıtılarak kullanılması ve kurutucu içerisinde birkaç kez dolaştırılıp nem içeriğinin belli bir değere ulaşması daha verimlidir. Kurutma süresinin artmaması için havanın bağıl nemi %60-70 olduktan sonra nemli hava kurutucudan atılır. Böylelikle kurutucu hava sürekli aynı sıcaklıkta ve nemde kurutucuya besleneceğinden kurutmaya olumsuz etkisi olmaz [28].

Hava üflelemeli kurutucular kabin kurutucu, tünel kurutucu, püskürtmeli kurutucu ve akışkan yataklı kurutucu şeklinde tasarlanabilir. Bu sistemlerde kurutucu hava doğrudan kurutulacak ürünle temas ederek gıdanın içerisindeki nemi alır.

a) Kabin Kurutucular: Bu tür kurutucular daha çok taneli ve dilimlenmiş ürünler için uygun olup, kurutulacak ürün kabin içerisinde bulunan raflar ya da kerevetler üzerine serilerek kurutulur. Bu tip kurutucularda ürüne uygun hava hızı uygulanır ve kısa kuruma süresinin yeterli olduğu ürünlerin kurutulması için elverişlidir [28].

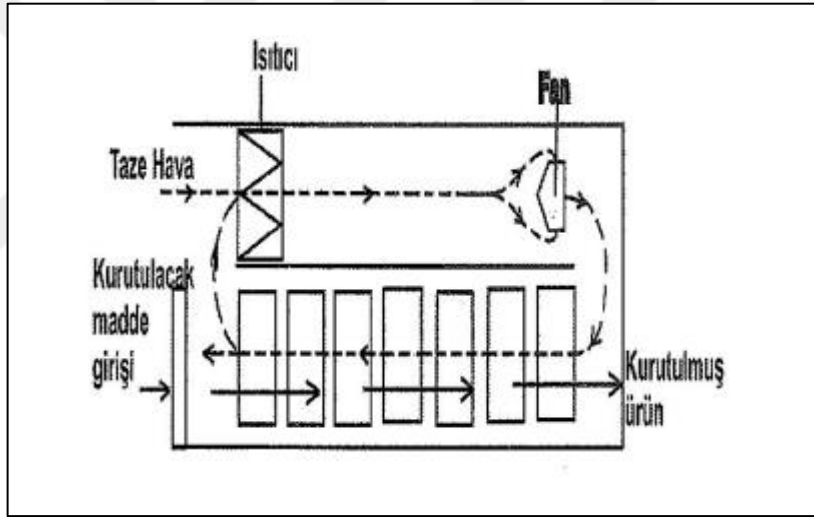
Kurutulacak ürün alt tarafı ızgara ya da elek şeklinde olan kerevetlere yerleştirilir (Şekil 2.3). Kerevetler üst üste kurutma kabine koyulur. Kurutma boyunca kerevetler hareketsizdir. Isıtılmış hava, kabinin yan duvarlarından girerek kerevetler arasında dolaşır ve kurutma sonrası nemlenen hava yan duvarlardan kabin dışına çıkarak ısıtıcıya ulaşır [22].



### Şekil 2.3 Kabin kurutucu [22]

Kabin kurutucuların dezavantajı kabinin her yerinde aynı hava hızının, sıcaklığın ve nemin sağlanamayışından dolayı aynı kurutma hızının sağlanamamasıdır. Bunu önleyebilmek için ısıtıcı fanın pozisyonu değiştirilerek çalıştırılır veya uygun pozisyonda sabit olarak yerleştirilmiş çift fan kullanılır [22].

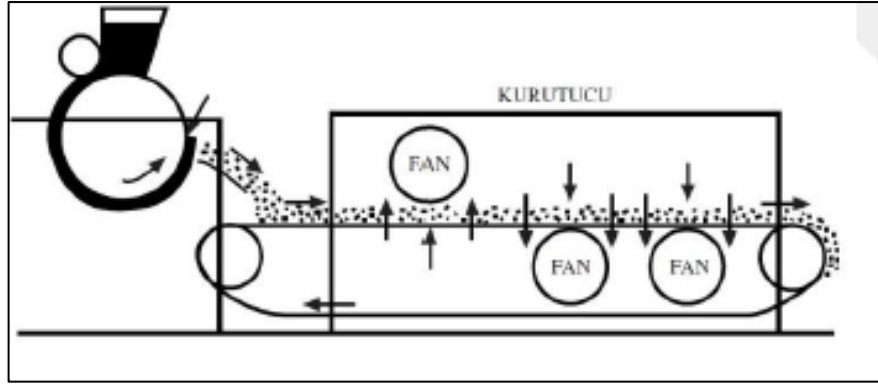
b) Tünel Kurutucular: Bu tip kurutucularda malzeme bir tünel içinde hareket eden kurutma vagonları içine uygun bir biçimde yerleştirilir. Tünel kurutucuların kabin kurutuculardan en önemli farkı, sıralı raflardan oluşan arabaların tünel boyunca hareket etmesi olup, bu kurutucuda kurutulacak ürünü taşıyan araba tünele girdiğinde, kurumuş ürünü taşıyan araba tünelden dışarı çıkar (Şekil 2.4). Eğer arabalarla sıcak hava aynı yöne hareket ederse bu tip tünellere “paralel akış tüneli”; zıt yönde hareket ederse bu tip tünellere “zıt akış tüneli“ denir [30].



Şekil 2.4 Tünel kurutucu [30]

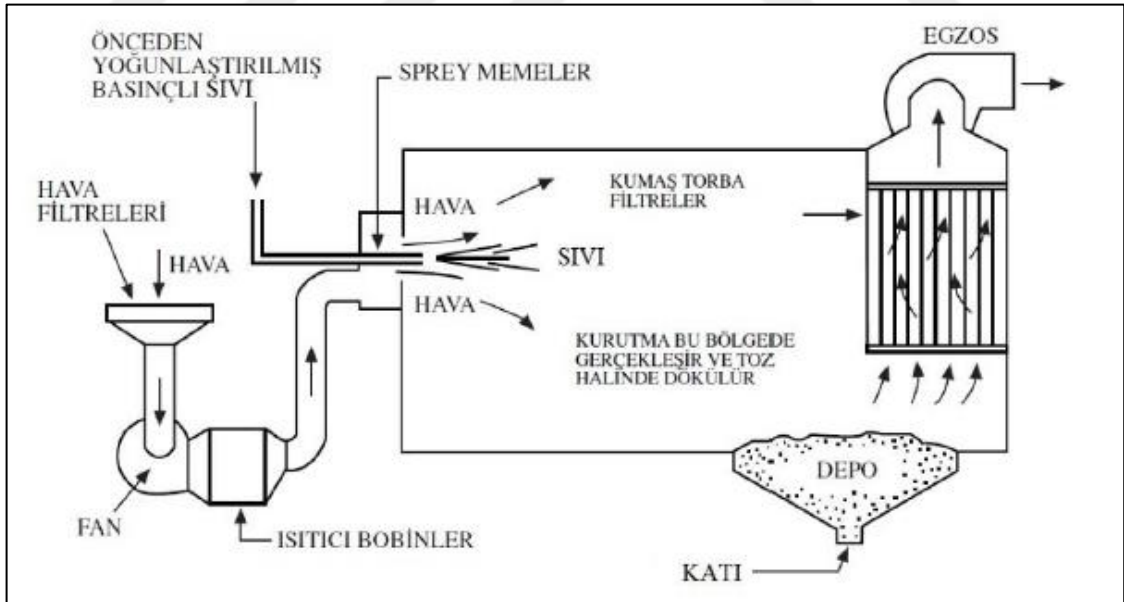
Paralel akış ve zıt akışlı iki kademesi olan kurutma tünelleri de bulunmaktadır [22].

Konveyör kurutucu ya da sürekli bant sisteminde (Şekil 2.5) sürekli çalışan ızgara ya da elek şeklinde bir bant bulunmakta olup, kurutulacak ürüne alttan ve üstten sıcak hava uygulanır. Konveyör kurutucular, parçalanmış gıdaları büyük miktarda kurutmak için uygundur [22].



**Şekil 2.5** Sürekli bant kurutucu [31]

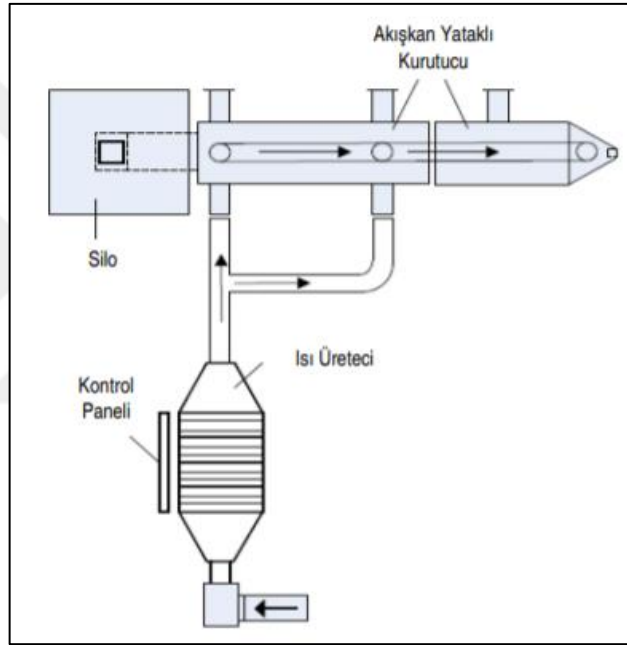
c) Püskürtmeli Kurutucular: Püskürtmeli kurutucular süt tozu ve kahve üretiminde kullanılmakta olup, kurutulmuş madde damlacık veya tanecik yapısı olarak aynı yapıdadır ve kuruma süresi 5-15 saniye gibi oldukça kısadır. Püskürterek kurutmada, sıcak hava ile sıvı kurutma odasına küçük tanecikler biçiminde verilir (Şekil 2.6). Sıcak hava, dökülen ürün damlacıklarıyla aynı veya ters yönde sisteme verilebilir. Kuruyan madde yerçekimi etkisiyle depoya dökülür. Kurutucu hava içerisindeki ürün parçacıkları, siklon ayırıcılar veya hava filtreleri aracılığıyla toplanır [31].



**Şekil 2.6** Püskürtmeli kurutucu [31]

ç) Akışkan Yataklı Kurutucular: Çoğunlukla akışkanlaşabilen ıslak partiküler ve granüler materyallerin kurutulması için kullanılmaktadır. Akışkan yataklı

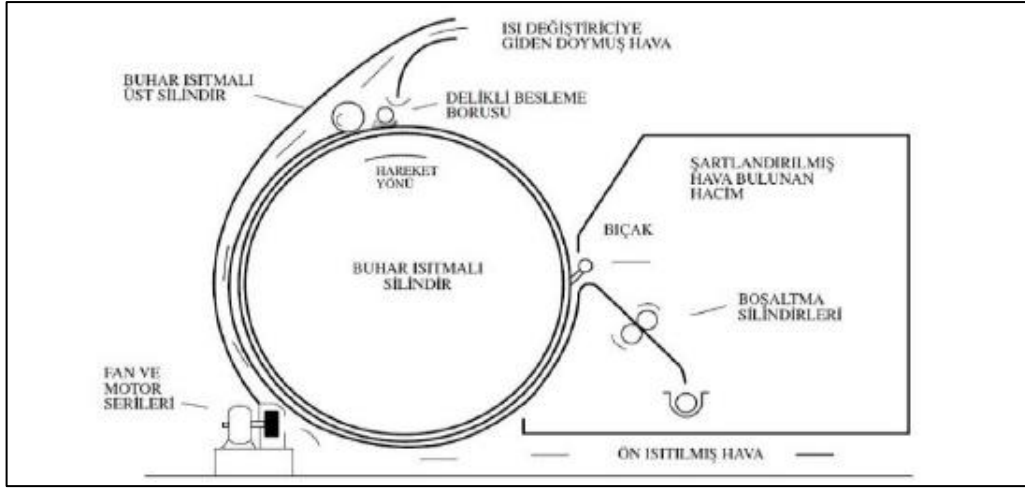
kurutucuda kurutulacak gıda maddesi aşağıdan yukarı doğru çıkan sıcak hava akımı içerisinde, ağırlığı karşılıklı olarak askıda kalacak şekilde tutulur (Şekil 2.7). Gıda maddesini kurutucu boyunca taşımak için yatay bir hava akımı da bulunabilir. Havadan gıda maddesine ısı çoğunlukla konveksiyon yoluyla iletilir. Kimyasallar, karbonhidratlar, gıda ürünleri, biyomateryaller, içecek ürünleri, seramikler, toz veya kapsül formundaki ilaçlar, sağlık ürünleri, pestisitler ve tarımsal kimyasalları, boya maddeleri ve pigmentler, deterjanlar ve yüzey aktif maddeler, gübreler, polimerler ve reçineler, taninler, yanma-tutuşma-külleştirme ürünleri, atık yönetim prosesleri ve çevre koruma işlemlerinde akışkan yataklı kurutucular kullanılmaktadır [32].



Şekil 2.7 Akışkan yataklı kurutucu [32]

### 2.8.3 Döner Kurutucular

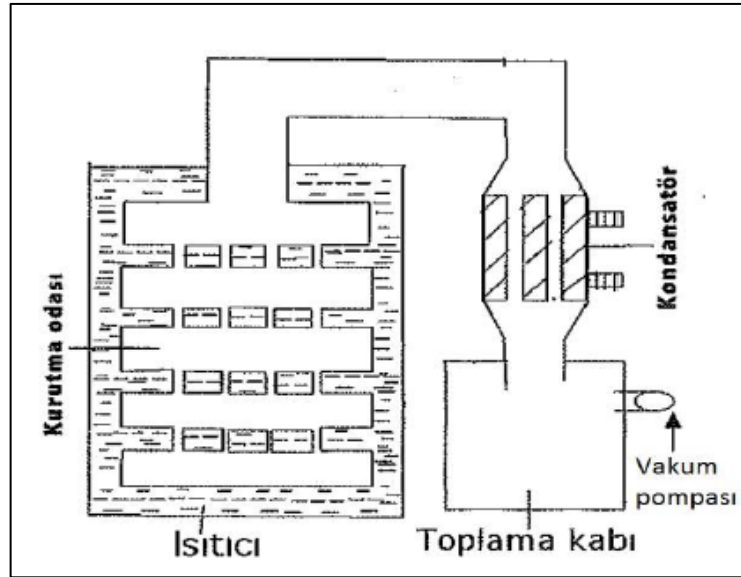
Döner kurutucularda gıda maddesi içten ısıtılan ve dönen metal bir silindirin yüzeyine beslenir. İç silindir üzerinde sıcak havalı bir dış silindir daha bulunur. İç silindir belirli bir hızla döner, bu süreçte ürün iç silindirin yüzeyinde kalarak kurutma tamamlanır ve kurumuş ürün kurutucunun özel kazıyıcısı (bıçak) ile kazınarak iç silindirin üzerinden alınır (Şekil 2.8). Döner kurutucular süt tozu, hazır çorba, bazı çocuk mamaları ve patates tozu yapımında kullanılır [30].



Şekil 2.8 Döner kurutucu [31]

#### 2.8.4 Vakum Kurutucular

Vakum kurutma özellikle meyveler gibi uzun sürede kuruyan gıda ürünleri için kullanılan önemli bir alternatif yöntemdir (Şekil 2.9). En önemli avantajı kurutma işlem süresini diğer metotlara nazaran çok kısalttığını göstermiştir. Vakum gıdada bulunan suyun düşük sıcaklıklarda atmosferik koşullardan daha kolay buharlaşmasını sağlamaktadır. Suyun uzaklaştırılması esnasında ortamda hava bulunmadığı için oksidasyon reaksiyonlarını azaltmaktadır. Vakum kurutucularda kurutulmuş olan gıdalarda renk, doku ve tat aslına yakın olarak korunur. Ancak bu yöntem pahalı bir yöntemdir [33].

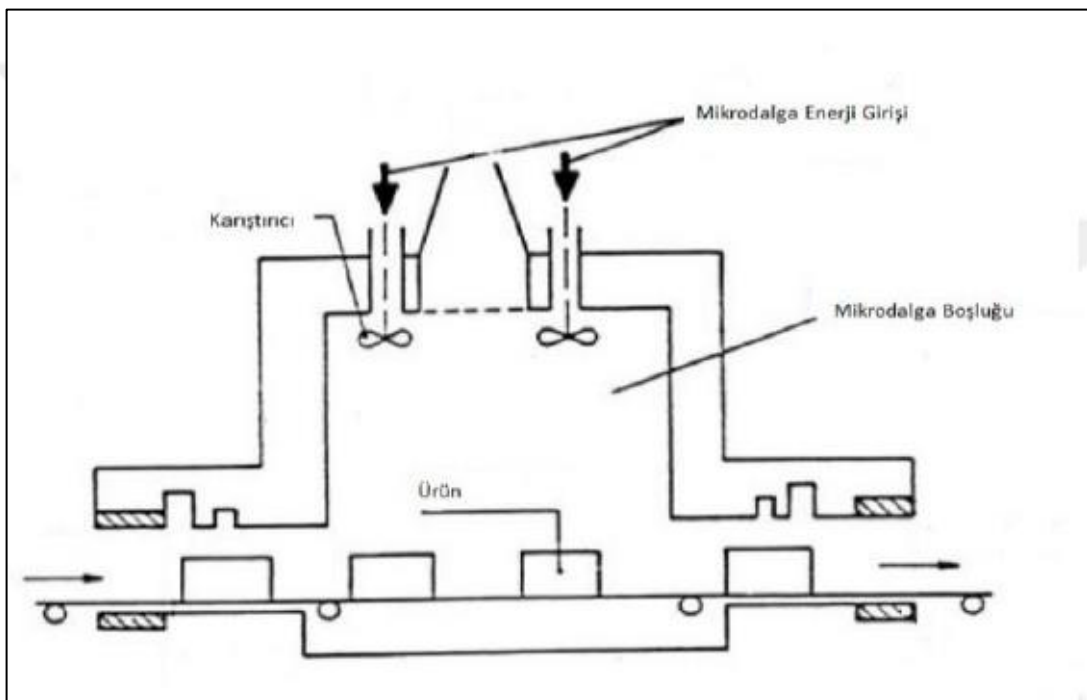


Şekil 2.9 Vakumlu kurutucu [21]



### 2.8.5 Mikrodalga Kurutucular

Mikrodalga kurutucular, hava üflemeli veya vakum kurutucularla birlikte kullanılarak ürün kalitesi ve enerji verimliliğini arttırmaktadır (Şekil 2.10). Mikrodalga, materyaldeki polar molekülleri (gıda içerisinde bulunan nem) etkileyerek elektromanyetik (mikrodalga) enerjinin termal enerjiye dönüşümünü sağlar. Meyveler, tahıl ürünleri ve ilk nem seviyesi yüksek olan birçok gıda ürünü kurutulabilir. Mikrodalga avantajları; kısa kurutma süresi, enerji verimliliği, düşük maliyet ve kurutulan gıdanın yüksek besin değeridir [28].

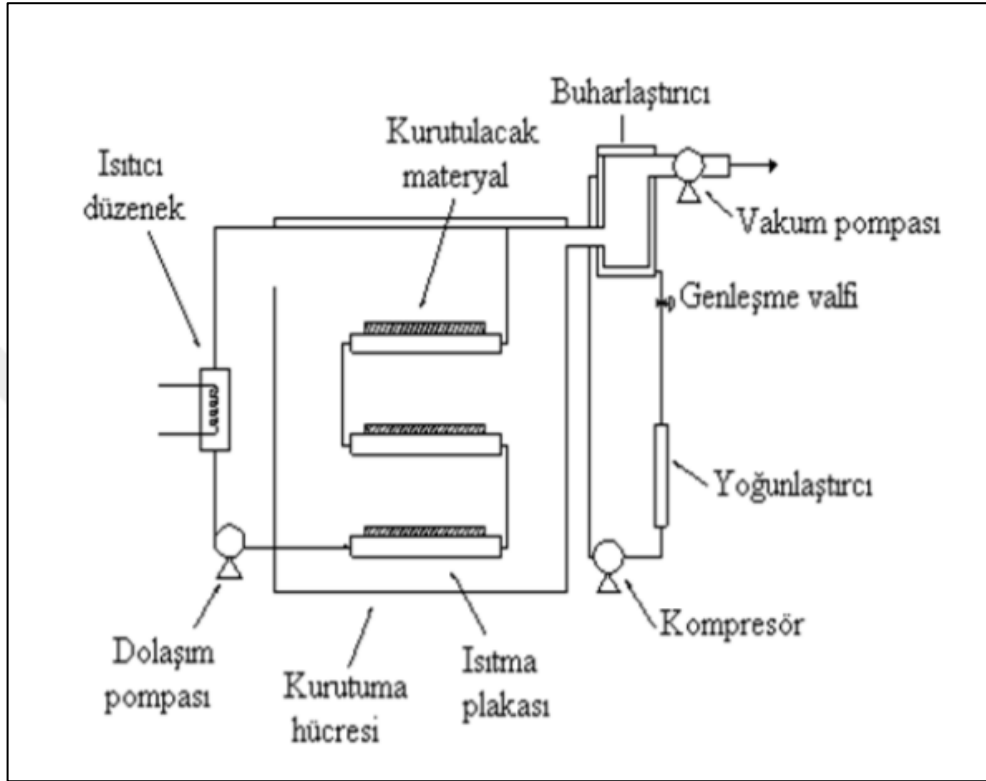


Şekil 2.10 Mikrodalga kurutucu [21]

### 2.8.6 Dondurarak Kurutma Yapan Kurutucular

Dondurarak kurutma yöntemi çok düşük basınç altında donmuş malzeme veya donmuş çözeltilerden çözücünün (serbest su) süblimasyonla, uzaklaştırılması (desorpsiyon) işlemidir (Şekil 2.11). Bu yöntemde gıda içerisinde sıvı halde su bulunmamalı ve ortam sıcaklığı düşük olmalıdır. Bu şartlar sağlandığında mikrobiyal ve enzimatik bozulmalar durduğu için kurutulmuş gıda yüksek besin içeriğine sahip olur. Dondurarak kurutma işlemi yavaş ve pahalı olmasına rağmen

kurutma sonunda diğer kurutma teknikleriyle karşılaştırıldığında en kaliteli ürün elde edilmektedir [34].



Şekil 2.11 Dondurarak kurutma yapan kurutucu [34]

### 2.8.7 Kızılötesi Kurutucular

Kızılötesi enerji, elektromanyetik spektrumda mikrodalga (1 ile 1000 mm) ile görünür bölgeler (0,38 ile 0,78  $\mu\text{m}$ ) arasında yer alan elektromanyetik enerji olup kızılötesi kurutucular da bu aralıkta çalışır [35].

Mikrodalga enerji gibi kızılötesi enerjinin de gıda ile etkileşimde bulunması, gıdanın sıcaklık profili üzerinde etkilidir. Gıda üzerine gelen kızılötesi ışınların bir kısmı yansıtılır, bir kısmı geçirilir, bir kısmı da gıda tarafından emilir. Kızılötesi kurutma yöntemi ayrıca nem tayin etme yöntemi olarak kullanılmakta olup, baharat ve bitkilerin vitaminlerini kaybetmeden kurutulmasını sağlamaktadır [23].

Kızılötesi enerji özellikle diğer kurutma yöntemleriyle beraber kullanıldığı zaman işlem sürelerinin kısaldığı ve enerji sarfiyatının ciddi oranda düştüğü görülmüştür [35], [36].

Ayrıca sıcak hava kurutma sistemlerinin sebep olduğu, üründe su kaybı sorunlarının kızılötesi enerji ile sıcak hava kombine kurutma sisteminde azaldığı görülmüştür.

Kızılötesi radyasyonun kullanım alanı günümüzde araba boyalarının ve kâğıtların kurutulmasından, tıp ve savunma sanayi sektörüne kadar uzanmaktadır. Gıda endüstrisinde kızılötesi radyasyonun kullanım alanı oldukça geniştir. Kurutma, haşlama kızartma ve sterilizasyon bunlardan bazılarıdır [35].

Kızılötesinin kurutmada kullanımı gıda alanında diğer işlemlere göre daha yoğundur. Güneş altında kurutmanın bir alternatifi olarak düşünülen kızılötesi ile kurutmanın sıcak hava ile kurutmaya göre pek çok avantajı bulunmaktadır. Sıcak hava üfleme kurutma ile karşılaştırıldığında kızılötesi kurutma daha kısa işlem süresi, son ürün kalitesinde artış, işlem sırasında enerji tasarrufu ve kontrol mekanizmalarının daha rahat kurulması gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca temiz bir enerji kaynağı olan kızılötesi enerji herhangi bir toksik üretime de yol açmaz [35].

### 3.1 Kereviz Sebzesi

Kereviz (*Apium graveolens*), maydanozgiller ( *Apiaceae* ) ailesine ait bir sebze türü olup dünya çapında yaygın olarak ekilmektedir. Besinsel değerinin yanında sahip olduğu ftalid bakımından zengin esansiyel yağların aromasından dolayı da değerli bir sebzedir [37].

Aromatik sebze olarak sınıflandırılabilir. Kökleri, sapları, yeşil yaprakları, medikal amaçlar ve baharat olarak kullanılan tohumları için dünyanın çeşitli bölgelerinde yetiştirilir. Kökeni tam olarak bilinmemekle birlikte yabani türü sulak ve ılıman Avrupa ve batı Asya'ya dayanmaktadır [38]. Yabani kerevizlerin ayıklama ve ıslahı ile tohumla veya fide halindeyken şaşırtma yöntemiyle çoğaltılabilen iki yıllık bir tarım bitkisi ortaya çıkmıştır [39]. Hasat edilen kereviz sebzesi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1** Kereviz sebzesi [40]

Kerevizin antik çağlardan beri tıbbi amaçlı ve baharat olarak kullanıldığı bilinmektedir [41]. Tıbbi kullanım alanları arasında antihipertansif, antihiperlipidemik, antikarsinogenik, diüretik, antioksidan etkileri vardır [42].

### 3.2 Kerevizin Besin İçeriği

Kerevizin kimyasal kompozisyonu bitkinin kısımlarına (kök, sap ve yaprak), yetiştirilen coğrafi bölgeye, hasat dönemine, üretim tipi ve yöntemine göre farklılık göstermektedir [38]. Kereviz beta karoten, folik asit, C vitamini, sodyum, magnezyum ve lif açısından çok zengin bir bitkidir [42]. Tablo 3.1'de 100 gr kök kereviz için besin değerleri tablosu yer almaktadır.

**Tablo 3.1** Kerevizin besin değerleri [43]

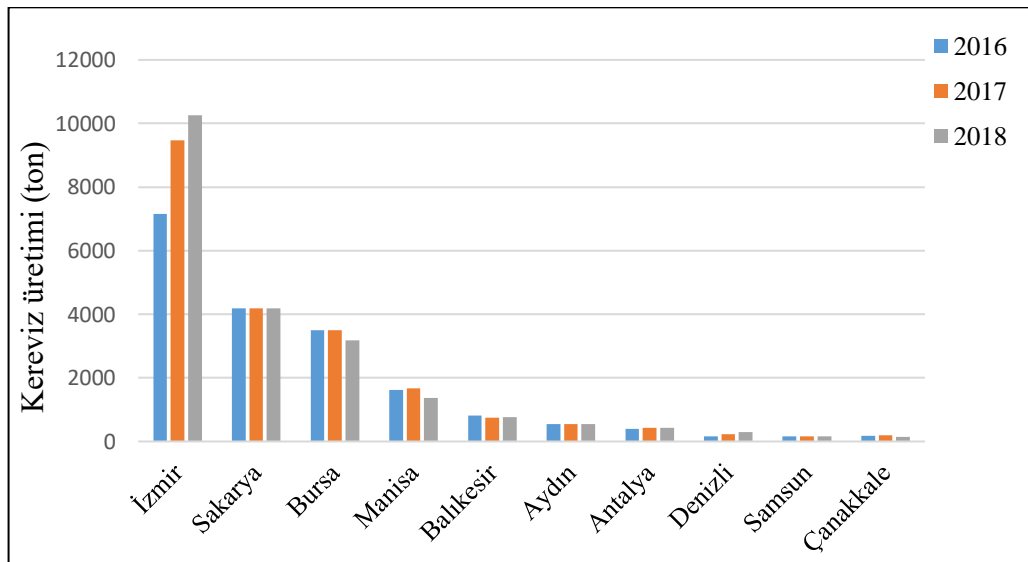
Besin Değeri	Birim	Ortalama	Minimum	Maksimum
Enerji	Kcal	31	28	37
Su	G	90,17	89,16	91,4
Kül	G	1,01	0,79	1,44
Protein	G	0,82	0,69	0,94
Azot	G	0,13	0,11	0,15
Yağ, toplam	G	0,29	0,24	0,35
Karbonhidrat	G	5	3,78	6,3
Lif, toplam diyet	G	2,7	1,63	3,12
Lif, suda çözünür	G	0,36	0,02	0,88
Lif, suda çözünmeyen	G	2,34	1,6	3,1
Sakaroz	G	0,91	0,54	1,22
Glukoz	G	1,66	1,41	1,8
Fruktoz	G	0,16	0,06	0,35
Tuz	Mg	259	205	328
Demir, Fe	Mg	0,34	0,26	0,61
Fosfor, P	Mg	67	60	78
Kalsiyum, Ca	Mg	38	30	51
Magnezyum, Mg	Mg	22	18	27
Potasyum, K	Mg	279	182	345
Sodyum, Na	Mg	104	82	131
Çinko, Zn	Mg	0,22	0,19	0,28
C vitamini	Mg	11,2	8,5	13,5

**Tablo 3.2** Kerevizin besin değerleri [43] (devam)

<b>L-askorbik asit</b>	Mg	11,2	8,5	13,5
<b>Tiamin</b>	Mg	0,04	0,025	0,058
<b>Riboflavin</b>	Mg	0,096	0,051	0,14
<b>Niasin</b>	Mg	0,723	0,247	0,89
<b>B-6 vitamini, toplam</b>	Mg	0,233	0,153	0,274
<b>Folat, gıda</b>	µg	8	4	12
<b>A vitamini</b>	RE	3	2	3
<b>Beta-karoten</b>	µg	32	25	37
<b>Lutein</b>	µg	11	9	12
<b>K-1 vitamini</b>	µg	115,6	106,1	119,3

### 3.3 Kereviz Üretimi

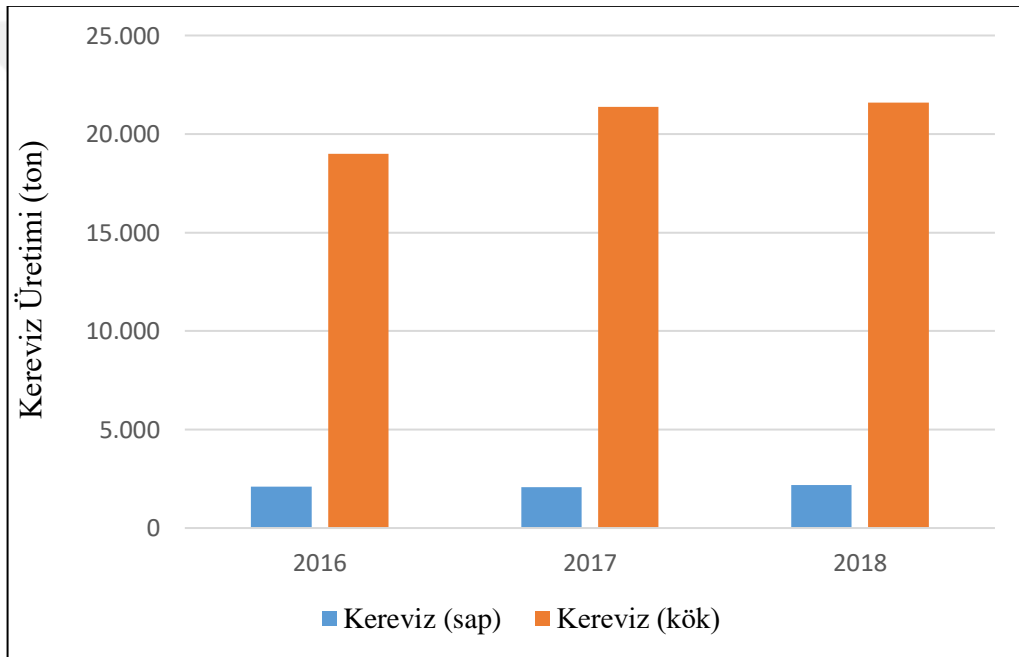
Kereviz kışları ılık, yazları fazla sıcak ve kurak geçmeyen yerlerde çok iyi gelişme göstermektedir. Yetiştirme döneminde optimum sıcaklık isteği 15–20 °C'dir. Düşük ve yüksek sıcaklıklardan hoşlanmaz. Kereviz toprak istekleri açısından seçici bir bitki olmamakla birlikte derin bünyeli tınlı kumlu nitelikli toprakları sever ve buralarda iyi gelişir [44]. Şekil 3.2'de son üç yıllık TÜİK verilerine göre Türkiye'de il bazında kereviz üretim miktarlarına yer verilmiş olup İzmir üretim açısından her geçen yıl artan bir grafik göstermektedir.



**Şekil 3.2** İller bazında son üç yıllık kereviz üretim miktarları

Kereviz sebzesi sap kereviz ve kök kereviz olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Kök kerevizde depo kök oluşurken sap kerevizde bu oluşum yoktur. Kök kerevizlerin yaprak sapsarı daha uzun lifli bir yapıya sahiptir. Yaprak sapsının ortası boştur. Sap kerevizin yaprak sapsı biraz daha kısa bir yapıya sahip olup ortası doludur [44]. Şekil 3.3'de TÜİK verilerine göre Türkiye genelinde son üç yıllık sap ve kök kereviz üretim miktarları yer almaktadır.

Kök kereviz hasat aşamasında boyutlarına göre büyük (400 g ve üzeri), orta (200-400 g) ve küçük (200 g altı) olarak sınıflandırılır. Kök kereviz hasadı genellikle olgunluğa erişenlerin alınması (seyreltme) yöntemiyle yapılmakta olup ortalama 24 hafta süre içerisinde gerçekleşir [44].



Şekil 3.3 Son üç yıla ait TÜİK verileri kereviz üretim miktarları

### 3.4 Kerevizin Kurutulması

Taze kök kereviz yaklaşık %90-95 oranında su içermektedir. Kuruma esnasında su buharlaşır ve geriye kerevizin besin değerlerince özellikle karbonhidrat, protein, vitamin ve mineral bakımından zengin özü kalır [46].

Kurutulmuş kereviz çorbalarda, taze sebzelerle birlikte yemeklerde ve salata çeşnisi olarak ve toz haline getirilerek bire bir oranda tuz ile karıştırılıp kereviz tuzu olarak kullanılabilir [45].

## 4.1 Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılan kereviz sebzeleri İstanbul'da bir süpermarketten temin edilmiş ve taze olarak deneylerde kullanılmıştır. Ön işlem çözeltisi hazırlanmasında kullanılan Sitrik asit ise Merck Firması'ndan (Almanya) temin edilmiştir.

## 4.2 Yöntem

### 4.2.1 Kurutma Teknikleri

Bu tez çalışması, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümündeki Gıda ve Polimer Teknolojileri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Kerevizin kurutma deneyleri kabin kurutucu (APV&Pasilac Ltd., Cumbria, İngiltere) ve Snijders marka kızılötesi kurutucuda (Tilburg, Hollanda) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kurutucuların genel görünüşü Şekil 4.1'de yer almaktadır.



**Şekil 4.1** Sıcak havalı kabin kurutucu ve kızılötesi kurutucu

Çelikten imal edilen kabin kurutucunun duvarları 50 mm'lik yarı sert, yassı izolasyon malzemesi ile kaplanmıştır. Kabin içerisinde raflı ve delikli tepsiler mevcut olup, hava sirkülasyonu ve homojen sıcaklık dağılımına izin vermektedir.



Hızı değiştirilebilen sirkülasyon fanı sayesinde kabin içerisinde dolaşan havanın akışı kontrol edilebilmektedir. Bu fan, 0,37 kW gücünde bir elektrik motoruyla çalışmaktadır. Kurutucunun ısıtılması hava sirkülasyon fanının karşısında bulunan 14 adet şerit ısıtıcı ile sağlanmaktadır. Kabin kurutucu, maksimum 200°C sıcaklığa kadar çalışabilmektedir. Sıcaklık, cihazın sol tarafında bulunan dijital kontrol panelinden ayarlanmaktadır.

Kızılötesi kurutucu ise 250 W halojen lamba ile çalışan bir nem analiz cihazıdır.

#### **4.2.2 Kuru Madde Analizi**

Kök kerevizlerin ve kereviz yapraklarının, kurutma deneylerinden önce nem içeriğinin belirlenmesi için kuru madde analizi yapılmıştır.

Darası önceden belirlenmiş saat camlarında yaklaşık 5 gram civarında tartılan örnekler, 105°C'ye ayarlanmış Selecta (Barcelona, Spain) marka etüvde yaklaşık 5 saat boyunca sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Desikatörde 15 dakika bekletilip soğutulması sağlanmış ve Precisa marka (model XB220A, Precisa Instruments AG, Dietikon, İsviçre) hassas terazide tartılmıştır. Örneklerin içerdiği nem miktarı ve kuru madde miktarı analiz edilmiştir.

Kurutma denemelerinde kullanılacak taze kök kerevizlerin nem içeriği  $9,43 \pm 0,20$  kg su/kg, kuru madde miktarı (%90,57 yaş baz) olarak belirlenmiştir. Taze yaprak kerevizlerin nem içeriği ise  $15,94 \pm 0,20$  kg su/kg kuru madde (%84,06 yaş baz) olarak belirlenmiştir.

#### **4.2.3 Kurutma Denemeleri**

Kabin kurutucuda yapılan kereviz kurutma çalışmaları için öncelikle ön işlem uygulanacak olan numuneler için %1'lik Sitrik asit çözeltisi hazırlanmıştır. Kök kerevizler soyulmuş ve  $6 \pm 0,5$  mm'lik küp şeklinde kesilmiştir. Kerevizler 2 gruba ayrılarak ortalama 30 g olacak şekilde, Mettler marka (model BB3000, Grefensee, Switzerland) bir terazi ile tartımları alınmıştır. Birinci grup kereviz kontrol numunesidir. İkinci grup kereviz ise 2 dakika süre ile Sitrik asit çözeltisinde bekletilmiştir.

Kabin kurutucuda yapılan tüm kurutma denemelerinde sıcak havanın akış hızı, Testo 440 Vane Anemometre (AM-4201, Taipei, Taiwan) ile 2 m/s olarak

ölçülmüştür. Kabin kurutucuda 55, 65 ve 75°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen denemelerde öncelikte kurutucunun deneyin yapılacağı sıcaklığa gelmesi beklenmiş ve daha sonra kontrol ve ön işleme tabi tutulan numuneler kurutucuya yerleştirilerek kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kurutma süresince her 15 dakikada bir tartım alınarak kaydedilmiş ve son nem içeriği yaklaşık %10 oluncaya kadar işleme devam edilmiştir.

Benzer şekilde kereviz yaprakları saplardan ayıklanıp, yıkanıp temizlendikten sonra 25 g'lık numuneler tartılmıştır. Yaklaşık %5 nem içeriğine ulaşıncaya kadar, her 15 dakikada bir tartım alınarak 55, 65 ve 75 °C sıcaklıkta kurutulmuştur.

Kök kerevizler, kabin kurutucuda olduğu gibi  $6\pm 0,5$  mm'lik küp şeklinde hazırlanıp 30 g'lık tartımlar alınarak kızılötesi kurutucuda 62, 74, 88 ve 104 W güç seviyelerinde her 15 dakikada bir tartım alınarak son nem içeriği %10 oluncaya kadar kurutulmuştur.

İki farklı kurutma tekniğinin birleştirilmesinin kurutma hızı üzerinde etkisini belirlemek amacıyla kombine kurutma yöntemi denemesi yapılmıştır. Numuneler 30 g tartım alındıktan sonra, ilk olarak 30 dakika 74 W güç seviyesinde kurutulmuş ardından sıcak havalı kabin kurutucuda %10 nem içeriğine ulaşıncaya kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. İkinci denemede kızılötesi kurutucuda 60 dakika kurutma yapılarak aynı işlemler tekrarlanmıştır.

Kurutma işlemi tamamlanan örnekler oda sıcaklığında yaklaşık 10 dakika soğuduktan sonra polietilen torbalara aktarılmış ve Krups, Vacupak 2 Plus (Fransa) torba ağzı kapama cihazı yardımıyla paketlenerek saklanmıştır.

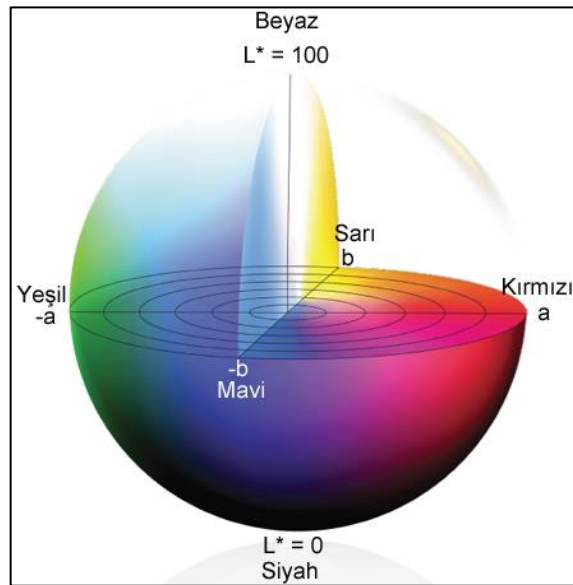
#### **4.2.4 Renk Analizi**

Kontrol grubu olarak taze kereviz ve yaprakların, kurutulmuş tüm numunelerin ölçümü Şekil 4.2'de gösterilen Konica Minolta Kromametre (CR-400, Osaka; Japan) ile yapılmıştır. Her kurutma grubundan rastgele alınan "L\*", "a\*" ve "b\*" değerlerinin ortalaması alınarak kıyaslama yapılmıştır.



**Şekil 4.2** Kromametre

Günümüzde en çok kullanılan ve temel alınan renk evreni Şekil 4.3' de gösterilen CIE LAB evrendir.  $L^*a^*b^*$  renk modeli, dikey sarı-mavi ve yeşil-kırmızı eksenlerine dayanan dörtgensel koordinatlar kullanır. Bir rengin aynı zamanda hem yeşil hem kırmızı veya hem mavi hem sarı olamayacağı teorisine dayanmaktadır.  $L^*$  parlaklığı,  $a^*$  kırmızı/yeşil ve  $b^*$  sarı/mavi değerini gösterir [47].



**Şekil 4.3** CIE LAB renk evreni [47]

#### 4.2.5 Matematiksel Modelleme

Kurutma deneylerinde kullanılan örneklerin nem içeriği kuru bazda (4.1) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$M = \frac{m_w}{m_d} \quad (4.1)$$

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

Kurutma hızı ise (4.2) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır [4]:

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (4.2)$$

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

Nem oranı (MR) (4.3) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [6]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4.3)$$

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

Deneylerde elde edilen veriler Tablo 4.1'de gösterilen ve Lewis, Henderson & Pabis, Page, Logaritmik, Midilli & Küçük, Wang & Singh, Vega- Lemus ve Vega-Galvez olmak üzere toplamda sekiz adet yarı deneysel model kullanılarak nem içeriğinin zamanla nasıl değiştiğini analiz edilmiş ve modeller arasında sonuçlar istatistiksel açıdan kıyaslanmıştır.

Lineer olmayan regresyon yöntemi kullanılarak deney sonuçlarından elde edilen veriler ile model sabitleri hesaplanarak kerevizin kök ve yapraklarının kurutma işlemini en iyi tanımlayan model belirlenmiştir.

**Tablo 4.1** Kullanılan matematiksel modeller

Model Adı	Model	Kaynak
Lewis	MR = exp (-kt)	[48]
Henderson & Pabis	MR = a exp(-kt)	[49]
Logaritmik	MR = a exp(-kt)+ c	[50]
Page	MR = exp(-kt <sup>n</sup> )	[51]
Midilli & Küçük	MR = a exp(-kt <sup>n</sup> )+bt	[52]
Wang & Singh	MR = 1 + at + bt <sup>2</sup>	[53]
Vega- Lemus	MR = (a+bt) <sup>2</sup>	[54]
Vega-Galvez	MR = exp (n+kt)	[54]

#### 4.2.6 Regresyon Analizi

İstatistiki doğrulama için Statistica programı (Statsoft, Inc., Tulsa, OK) kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Matematiksel modeller yardımıyla oluşturulan ve örneklerin kuruma kinetiği hakkında en doğru bilgiyi veren eğrinin seçilmesi için regresyon katsayısı (R<sup>2</sup>) ölçüt olarak seçilmiştir. Bunun yanında eşitlik (4.4) de belirtilen ki-kare ( $\chi^2$ ) ve hataların ortalama karekökü (RMSE) eşitlik (4.5) gibi istatistiki değerlendirme ölçütleri de denklemin doğrulanmasında yardımcı olarak değerlendirmeye alınmıştır [7].

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N-z} \quad (4.4)$$

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

#### 4.2.7 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Gıdaların kurutulması sırasında ince tabaka kurutma işlemi yaygın olarak uygulama alanı bulmuş ve bu kurutma işleminde boyutsuz nem oranını bulmak için Fick ikinci yasasının kararsız halde (4.6) difüzyon denkleminde verilmiştir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{\text{eff}}\nabla M) \quad (4.6)$$

Yukarıdaki denklemin çözümünde, kurutulacak örneğin geometrisi Crank [55] tarafından (4.6) denklemi küresel koordinatlarda difüzyon katsayısı sabit alınarak çözümlenip uygun olan sınır şartları ile basitleştirilirse,

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (4.7)$$

Eşitlik (4.7)'de  $D_{\text{eff}}$  değeri efektif difüzyon katsayısı ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $r$  değeri yarıçapı ( $\text{m}$ ) ve  $t$  değeri süre ( $\text{s}$ ) olarak verilmektedir. Kurutma süresinin uzun olduğu durumlarda yukarıdaki denklemin çözümünden elde edilen ilk terim kullanılır.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (4.8)$$

Eşitlik (4.8)'de görülen kurutma süresine karşı  $\ln(MR)$  çizilen eğrinin eğimi efektif difüzyon katsayısının hesaplanmasında kullanılır. Eğrinin eğimi ( $K$ ) aşağıda verilen eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$K = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{r^2} \quad (4.9)$$

#### 4.2.8 Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Efektif difüzyon katsayısı ve sıcaklık arasındaki ilişki Arrhenius tipi bir fonksiyon ile eşitlik (4.10)'da gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte  $D_{\text{eff}}$  değeri efektif difüzyon katsayısını ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $D_0$  değeri sonsuz sıcaklıkta difüzyon katsayısını ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $E_a$  değeri aktivasyon enerjisini ( $\text{kJ/mol}$ ),  $R$  değeri

evrensel gaz sabitini (kJ/mol×K) ve T değeri kurutma sıcaklığını (°C) göstermektedir.

Aktivasyon enerjisi değeri, ln (D<sub>eff</sub>) ve 1/(T+273,15) arasında çizilen eğrinin eğiminden yararlanarak hesaplanır [55].

İnfrared kurutucuda gerçekleştirilen kurutma işlemleri sırasında kurutucu içerisinde sıcaklık ölçülemediğinden aktivasyon enerjisi hesabında eşitlik (4.11)'de verilen revize edilmiş Arrhenius denklemi kullanılmıştır. Bu eşitlikte difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi sıcaklık yerine infrared kaynağının gücünün kurutulmuş örnek miktarına oranı ile ilişkilendirilmiştir [56].

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \times m}{p}\right) \quad (4.11)$$

(4.11) eşitliğinde D<sub>eff</sub> değeri efektif difüzyon katsayısını (m<sup>2</sup>/s), D<sub>0</sub> değeri sonsuz sıcaklıkta difüzyon katsayısını (m<sup>2</sup>/s), E<sub>a</sub> değeri aktivasyon enerjisini (kJ/kg), m değeri kurutulacak maddenin kütlesini (kg) ve p değeri infrared kurutucunun gücünü (W) göstermektedir.

## 5.1 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Elde Edilen Bulgular

### 5.1.1 Sıcaklığın ve Ön İşlem Çözeltisinin Kurutma Süresi Üzerine Etkisi

Kabin kurutucuda yapılan çalışmalarda küp şeklinde  $6\pm 0,5$  mm'lik kesilen kerevizlerden yaklaşık 30'ar gramlık numuneler tartılmıştır. Ön işlem yapılacak numune, hazırlanan %1'lik sitrik asit çözeltisinde 2 dakika süre ile bekletilmiş ve kontrol grubu ile 55, 65 ve 75 °C sıcaklığındaki sıcak hava ile son nem içeriği yaklaşık %10 olana kadar kurutulmuştur. Şekil 5.1'de numunelerin kuruma öncesi şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.1 Kereviz numuneleri

Her sıcaklık için yaklaşık %10 nem içeriğine ulaşıncaya kadar kurutma sağlanmıştır. Buna bağlı olarak kurutma sıcaklıklarına bağlı olan toplam süre Tablo 5.1'de verilmiştir. Toplam kuruma süreleri incelendiğinde uygulanan ön işlemin toplam kurutma süresine etki etmediği ancak kurutma sıcaklığının artması ile toplam kuruma süresinin azaldığı gözlemlenmiştir.

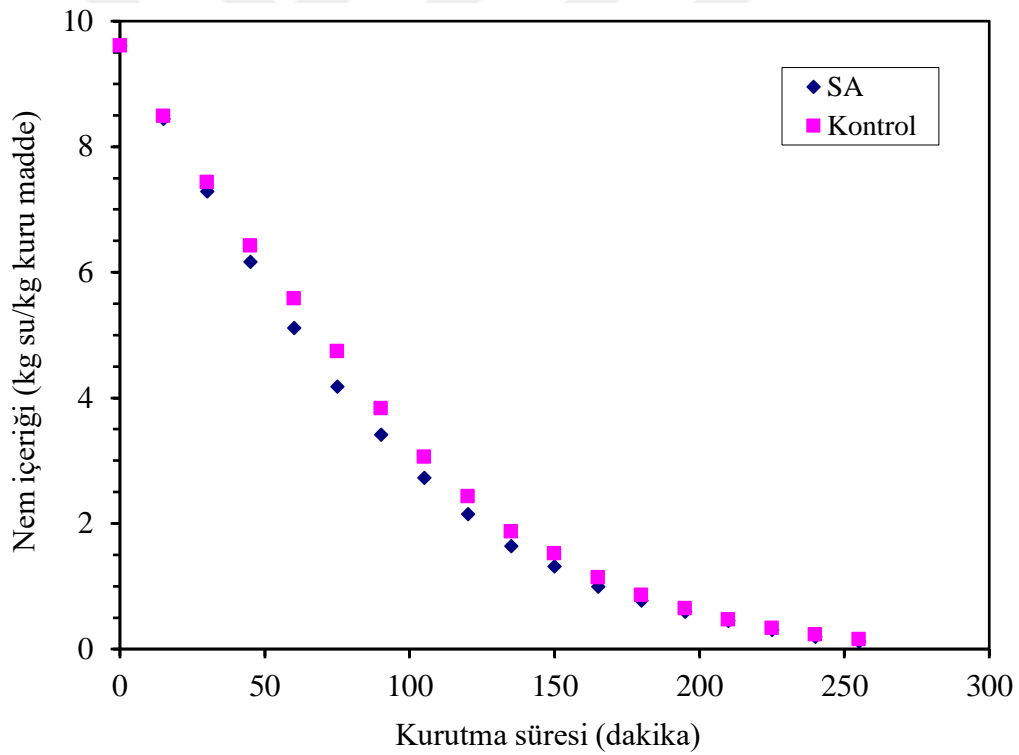


Tablo 5.1’de görüldüğü gibi kurutma hava sıcaklığındaki 10°C artışı yaklaşık olarak örneklerin kuruma sürelerinde %18-36 arasında bir azalma sağlamıştır.

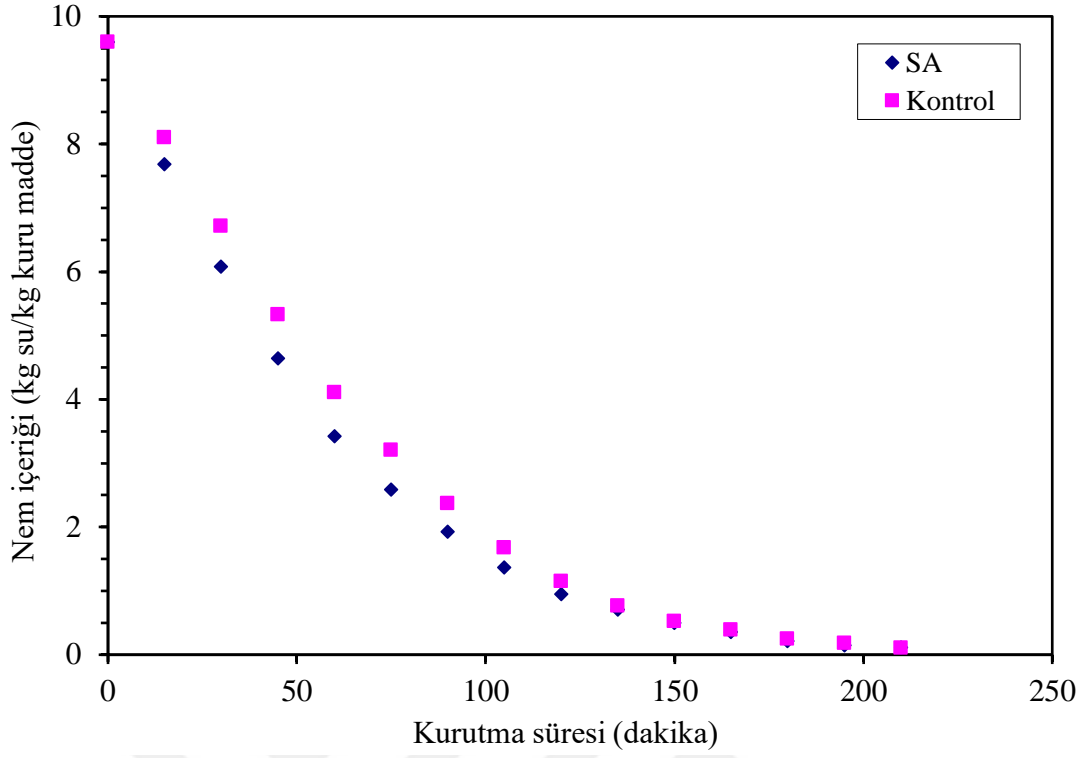
**Tablo 5.1** Sıcaklığa bağlı toplam kurutma süreleri

Sıcaklık (°C )	Sitrik Asit	Kontrol
55	255	255
65	210	210
75	135	135

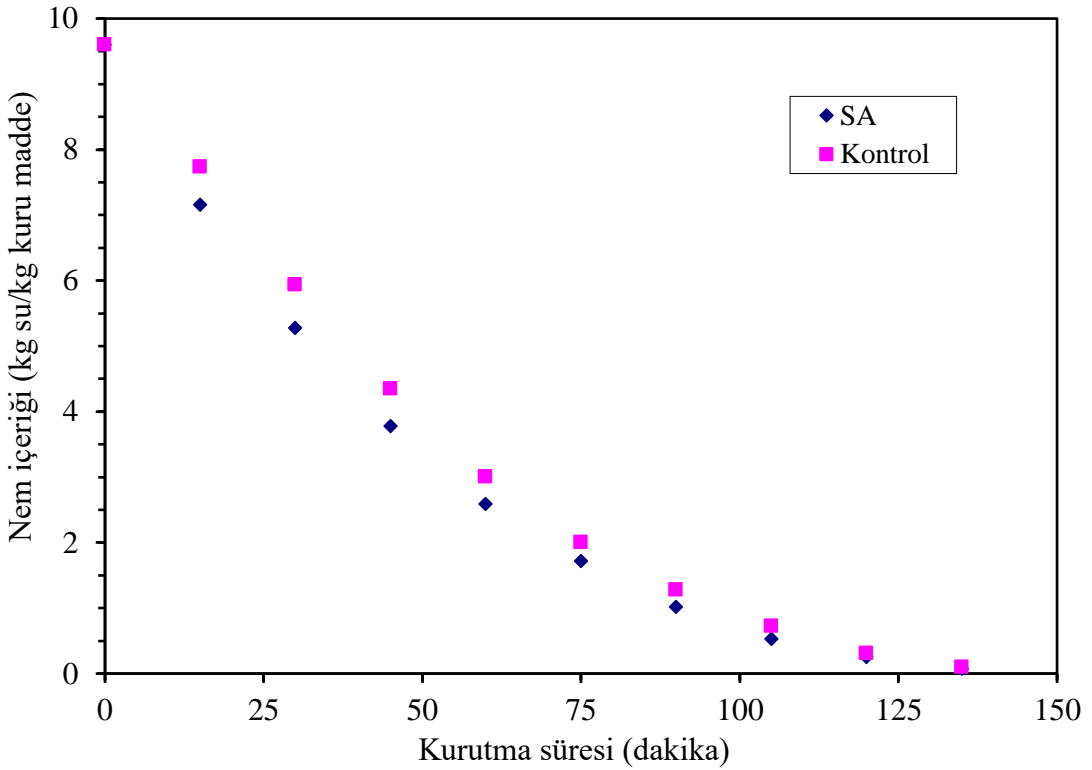
Kurutma sıcaklıklarına bağlı olarak kereviz numunelerinin nem içeriğinin kuruma süreleri ile değişimleri Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görülmektedir. Sitrik asit çözeltisi ile yapılan ön işlemin üç farklı kurutma sıcaklığı için de belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



**Şekil 5.2** Kerevizin 55 °C’da kurutma süresi-nem içeriği grafiği



Şekil 5.3 Kerevizin 65 °C'da kurutma süresi-nem içeriği grafiği



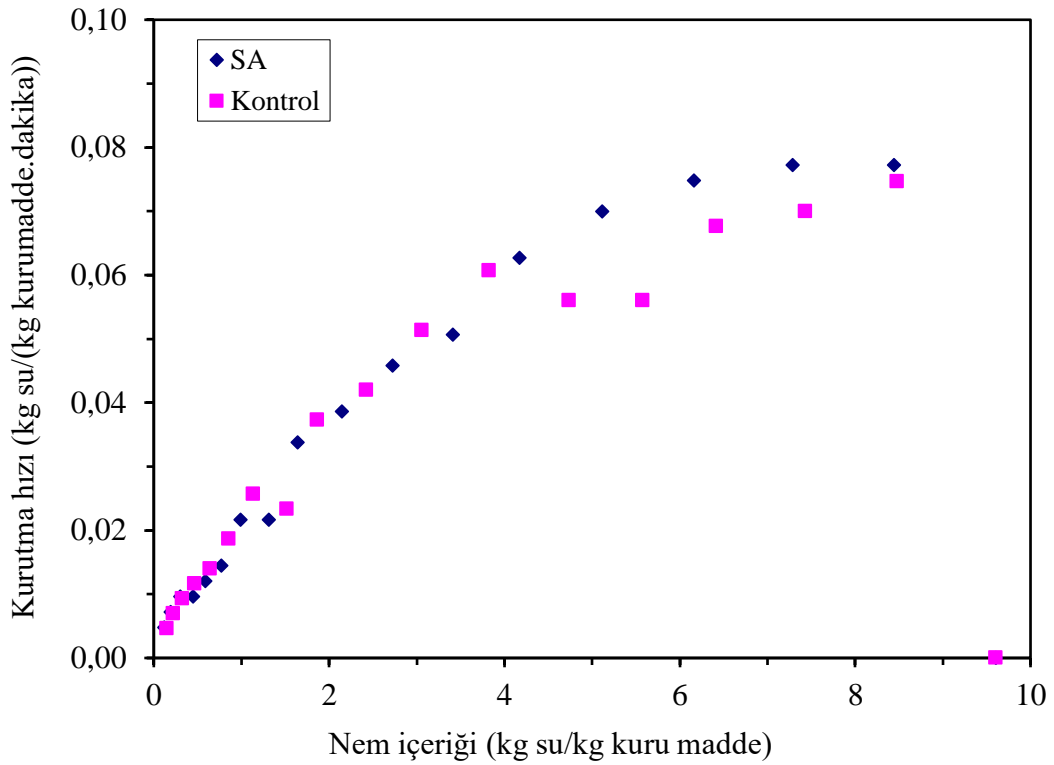
Şekil 5.4 Kerevizin 75 °C'da kurutma süresi-nem içeriği grafiği

### 5.1.2 Sıcaklığın ve Ön İşlem Çözeltisinin Kurutma Hızına Etkisi

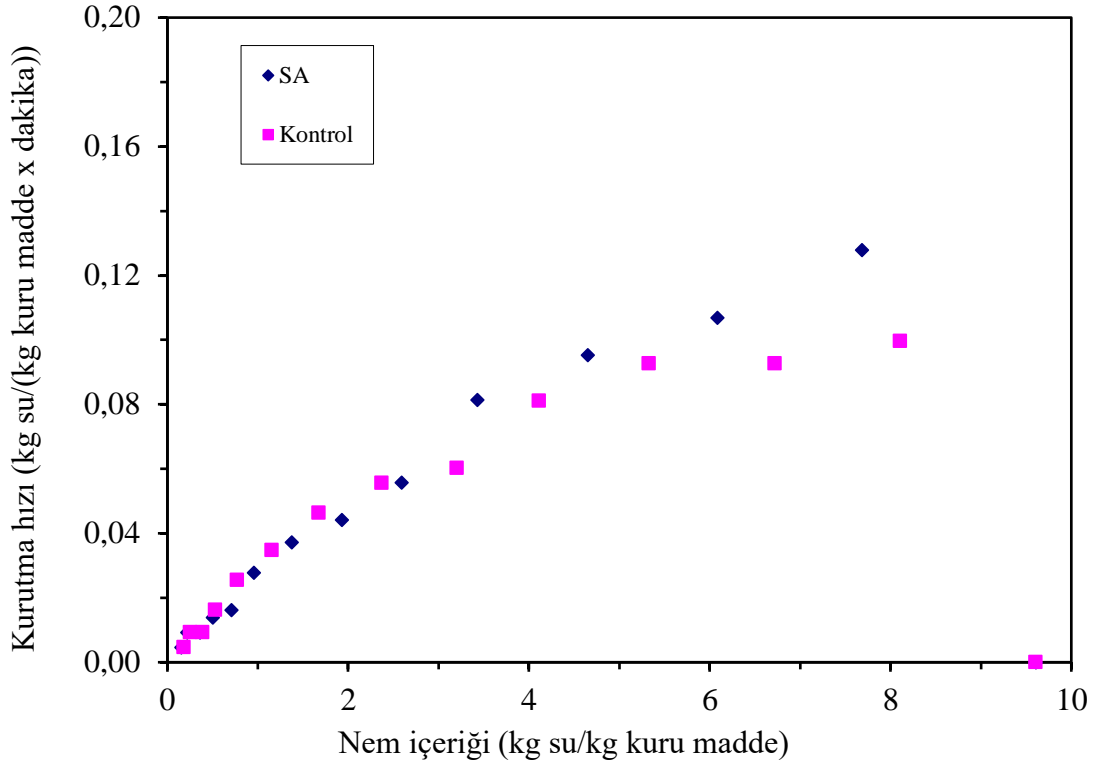
Sıcaklığın ve ön işlem çözeltisinin kurutma hızına etkisi Şekil 5.5 ve Şekil 5.7 arasında verilen kuruma hızı-nem içeriği grafiklerinde görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, kurutma eğrilerinde azalan hız periyodu görülmektedir.

Sıcaklığın artması ile kuruma hızının da arttığı ancak Sitrik asit çözeltisi ile yapılan ön işlemin üç farklı kurutma sıcaklığı için de kuruma periyodu üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

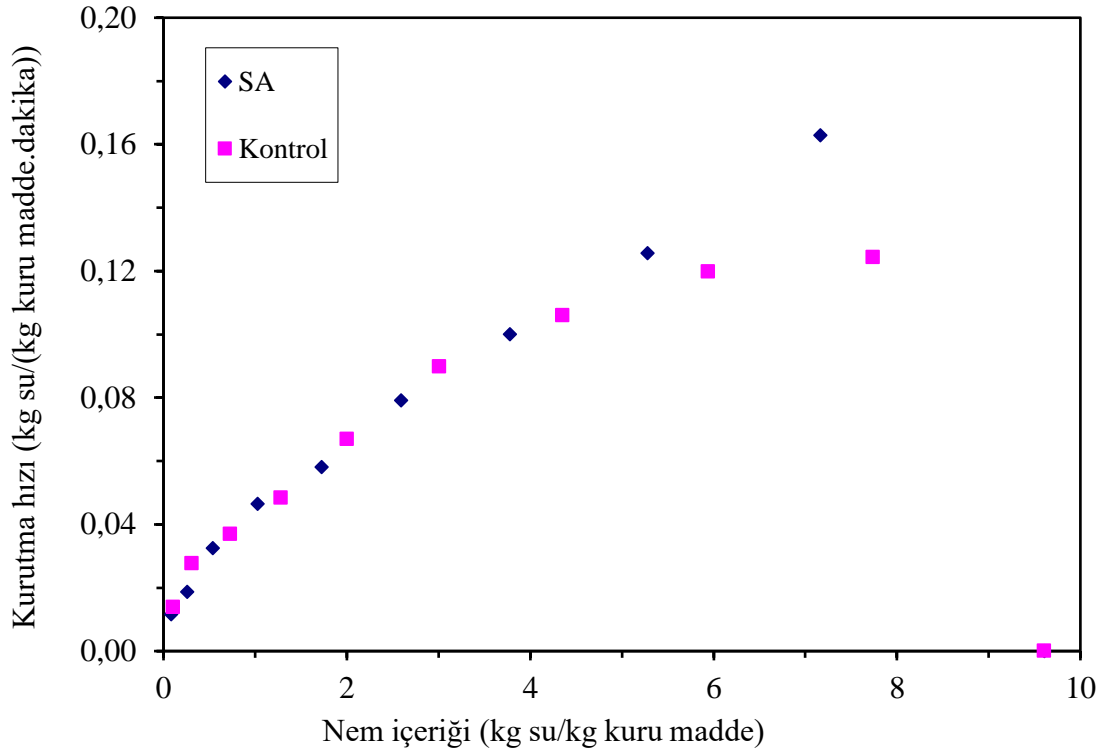
Benzer bir sonuç Heybeli, Ertekin ve Dikici tarafından yapılan çalışmalarda [5], infrared kurutucu ile kereviz kurutma denemesinde ön işlem olarak iki dakika süre ile buharda haşlama ve kaynar suda haşlama uygulanmış ve bu ön işlemlerin kurutma hızı ve süresi üzerine etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.5 Kerevizin 55 °C'de kurutma hızı-nem içeriği grafiği



Şekil 5.6 Kerevizin 65 °C'de kurutma hızı-nem içeriği grafiği



Şekil 5.7 Kerevizin 75 °C'de kurutma hızı-nem içeriği grafiği

### 5.1.3 Sıcak Havalı Kabin Kurutucu İçin Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi

Ön işlem çözümlerinin belirgin bir etkisi olmadığından matematiksel modelleme yapılırken kontrol grubu deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak kuruma süresi ve nem içeriğinin değişim grafiği üzerinde eğri uydurulmuştur. Eğriyi uydururken lineer olmayan regresyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Matematiksel modelleme için kullanılan denklemler Tablo 4.1 verilmiş olup matematiksel modeller kullanılarak hesaplanan regresyon katsayısı ( $R^2$ ), ki-kare ( $\chi^2$ ) ve hataların ortalama karekökü (RMSE) değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Hataların ortalama karekökü, modelden elde edilen tahmini ve deneysel veri arasındaki sapmayı ve ki-kare uyumun iyilik derecesini göstermektedir. En uygun model için ki-kare ve hataların ortalama karekökü değerinin sıfıra,  $R^2$ 'nin ise bire yakın olması gerekmektedir [57].

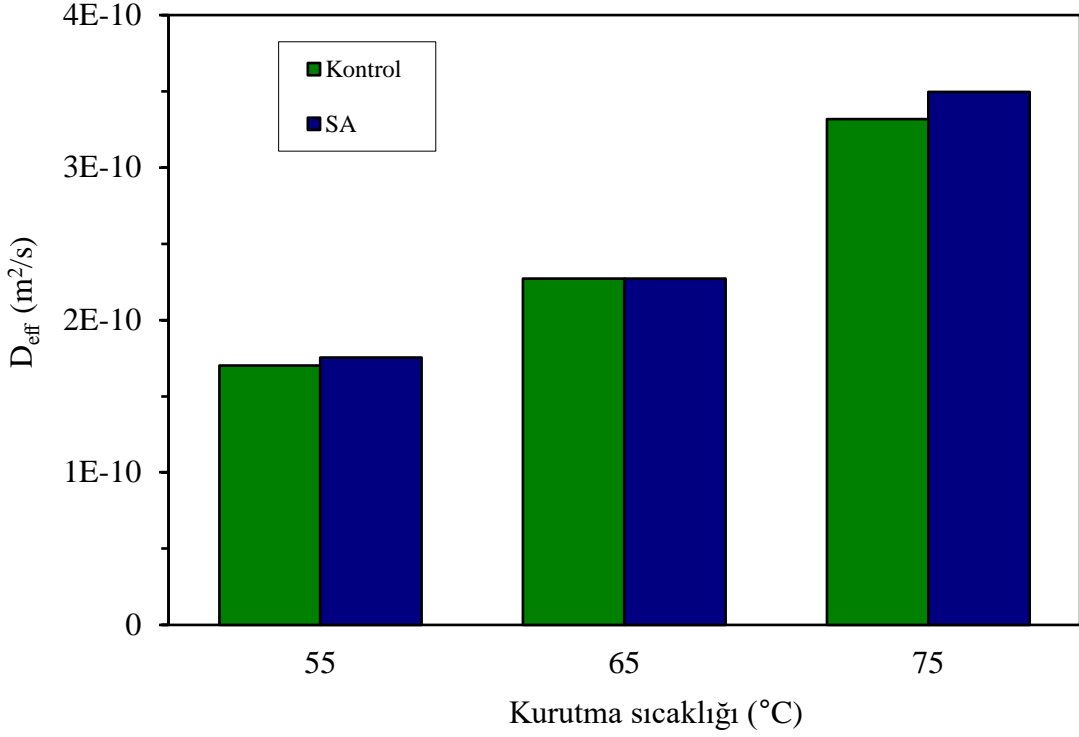
Tablo 5.2 incelendiğinde 55 °C sıcaklıkta Wang ve Singh modelinin  $R^2$  değerinin 0,9993,  $\chi^2$  değeri 0,000074, RMSE değeri ise 0,028052 olarak en iyi tanımlayan model olduğu, bu değerlere en yakın değerlerin ise Midilli vd. modelinde yer aldığı anlaşılmıştır. 65 ve 75 °C için ise sırasıyla  $R^2$  değerinin 0,9995-0,9998,  $\chi^2$  değeri 0,000055-0,000024, RMSE değeri ise 0,019765-0,010345 olarak en açıklayan modelin Midilli vd. olduğu anlaşılmaktadır.

**Tablo 5.2** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı modeller için  $R^2$ ,  $\chi^2$  ve RMSE değerleri

Sıcaklık °C	Model	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
55	Lewis	0,9804	0,002003	0,167481
	Henderson ve Pabis	0,9855	0,001578	0,144327
	Logaritmik	0,9964	0,000412	0,069052
	Page	0,9984	0,000165	0,041601
	Midilli vd.	0,9992	0,000097	0,029875
	Wang ve Singh	0,9993	0,000074	0,028052
	Vega-Lemus	0,9980	0,000208	0,047162
	Vega-Galvez	0,9855	0,001578	0,144328
65	Lewis	0,9851	0,001576	0,132185
	Henderson ve Pabis	0,9888	0,001272	0,117040
	Logaritmik	0,9961	0,000475	0,065431
	Page	0,9993	0,000070	0,022864
	Midilli vd.	0,9995	0,000055	0,019765
	Wang ve Singh	0,9981	0,000215	0,041112
	Vega-Lemus	0,9976	0,000272	0,050831
	Vega-Galvez	0,9888	0,001272	0,117040
75	Lewis	0,9800	0,002366	0,126918
	Henderson ve Pabis	0,9838	0,002159	0,121613
	Logaritmik	0,9978	0,000335	0,043699
	Page	0,9986	0,000181	0,030588
	Midilli vd.	0,9998	0,000024	0,010345
	Wang ve Singh	0,9996	0,000051	0,017603
	Vega-Lemus	0,9992	0,000100	0,024710
	Vega-Galvez	0,9838	0,002159	0,121613

#### 5.1.4 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Kurutma işlemi sırasında ön işlem uygulanan ve ön işlem uygulanmadan kurutulan örneklerin difüzyon katsayısı her bir kurutma sıcaklığı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısının hesaplanmasında (4.9) denklemi kullanılmış hesaplanan değerler kabin kurutucuda kurutulan örnekler için Şekil 5.8’de verilmiştir.



**Şekil 5.8** Kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin efektif difüzyon katsayıları

Kabin kurutucu içerisinde kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayısı değerlerinin kontrol grubu örnekler için  $1,701 \times 10^{-10}$  ile  $3,317 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında, sitrik asit çözeltisi ile ön işlem uygulanan örnekler için  $1,753 \times 10^{-10}$  ile  $3,797 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında değiştiği yapılan çalışma ile ortaya çıkmıştır. Sıcaklık artışıyla birlikte efektif difüzyon katsayıları artmıştır. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere en yüksek difüzyon katsayısı 75°C’de ön işlem uygulanarak kurutulan kerevizlerde gözlemlenmiştir.

Literatürde yapılan incelemeler neticesinde farklı sıcaklıklarda kurutulan farklı sebzelerin difüzyon katsayıları Tablo 5.3’de gösterilmiştir. Deneysel verilerle elde edilen sonuçlar, literatürdeki  $10^{-9}$  -  $10^{-11}$  aralığında değişen difüzyon katsayıları ile kıyaslandığında uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 5.3** Literatürde farklı sıcaklıklarda kurutulan farklı sebzelerin difüzyon katsayıları

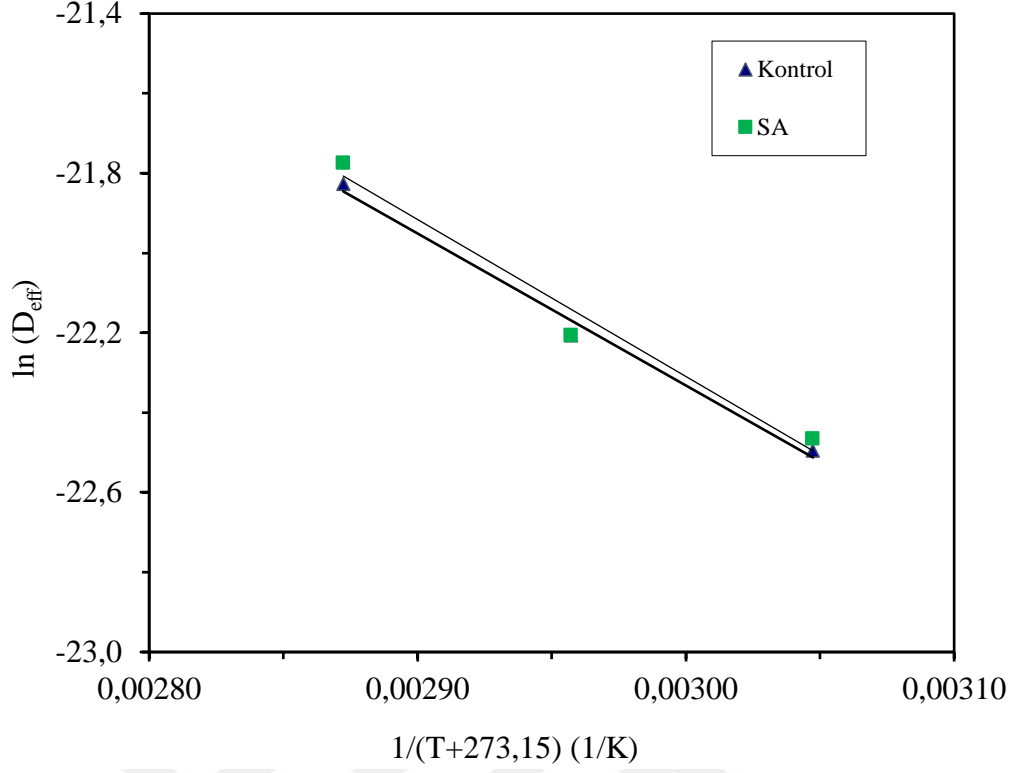
Ürün	T (°C)	Ön işlem	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	Kaynak
Tatlı Patates	50,60,70	Haşlama	$9,323 \times 10^{-11}$ - $1,758 \times 10^{-10}$	[4]
Kereviz	50,60,70,80	-	$1,957 \times 10^{-9}$ - $9,016 \times 10^{-9}$	[7]
Havuç	50,60,65,70	Haşlama	$0,776 \times 10^{-9}$ - $9,335 \times 10^{-9}$	[9]

Wei, Fan ve arkadaşlarının kök kereviz ile yapmış olduğu çalışmada [7], elde edilen difüzyon katsayılarındaki farklılığın, kurutma sıcaklığından, sıcak hava akış hızından, kereviz numunelerinin boyutsal farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 5.1.5 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Kereviz numunelerinin kabin kurutucuda istenilen seviyeye kadar kurutulması için gereken aktivasyon enerjisi hesabında (4.10) denklemi kullanılmıştır. Kabin kurutucuda her bir sıcaklık değeri için aktivasyon enerjisi hesabında kullanılacak  $\ln(D_{eff})$  ile  $1/(T+273,15)$  arasında çizilen eğriler Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Kurutma işlemi için gerekli olan aktivasyon enerjisi değerleri, eğrilerin eğimlerinden yararlanarak hesaplanmıştır.





**Şekil 5.9** Aktivasyon enerjisinin tahmini için difüzyon hızı ile mutlak sıcaklık arasındaki ilişki

Sitrik Asit (SA)

$$D_{eff} = 2,732 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{3933,9}{(T + 273,15)}\right) \quad R^2=0,9744 \quad (4.12)$$

Kontrol

$$D_{eff} = 1,837 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{3809,1}{(T + 273,15)}\right) \quad R^2=0,9911 \quad (4.13)$$

Yukarıda gösterilen eşitliklerden yararlanarak sitrik asit ve kontrol kodlu kereviz örneklerinin aktivasyon enerji değerleri sırasıyla 32,70 ve 31,66 kJ/mol olarak bulunmuştur.

## 5.2 Kızılötesi (Infrared) Isıtıcıda Elde Edilen Bulgular

### 5.2.1 Farklı Güç Seviyelerinin Kurutma Süresi Üzerine Etkisi

Kızılötesi kurutma çalışmaları için kereviz küp şeklinde  $6\pm 0,5$  mm'lik kesilmiş, yaklaşık 30'ar gramlık numuneler tartılmış ve dört farklı güç seviyesinde yaklaşık %10 nem içeriğine gelinceye kadar kurutulmuştur. Şekil 5.10'de kurutma öncesi numune görüntüsüne yer verilmiştir.



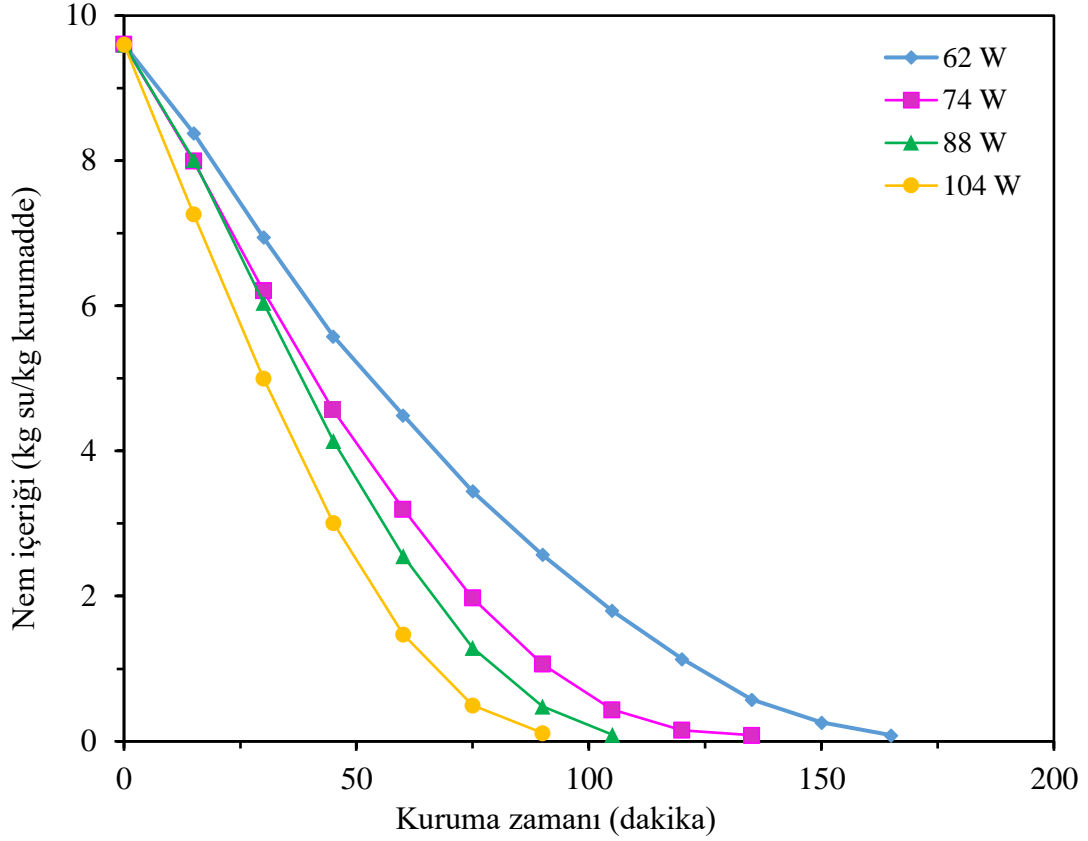
Şekil 5.10 Kızılötesi kurutucu tavaında kereviz numunesi

Her güç seviyesi için toplam kurutma süreleri Tablo 5.4'de gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde kızıl ötesi güç seviyesi arttıkça, kerevizin aynı son nem içeriğine ulaşmaya kadar geçen sürenin azaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.4 Farklı güç seviyelerinde kerevizin toplam kurutma süreleri

Güç Seviyesi (W)	62	74	88	104
Toplam Süre (dakika)	165	135	105	90

Farklı güç seviyeleri için yapılan deney sonuçlarına göre nem içeriğinin kurutma süresi boyunca değişim eğrileri Şekil 5.11'de gösterilmektedir.

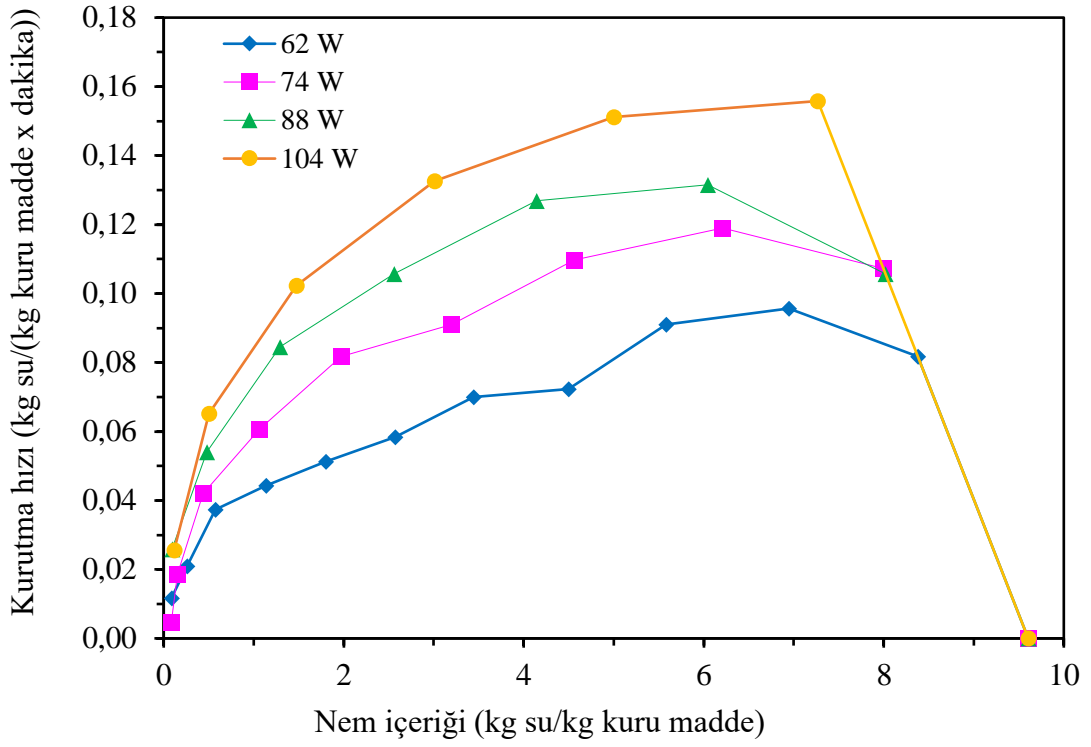


**Şekil 5.11** Farklı güç seviyelerinde kurutulan kerevizlerin nem içeriği-kurutma süresi grafiği

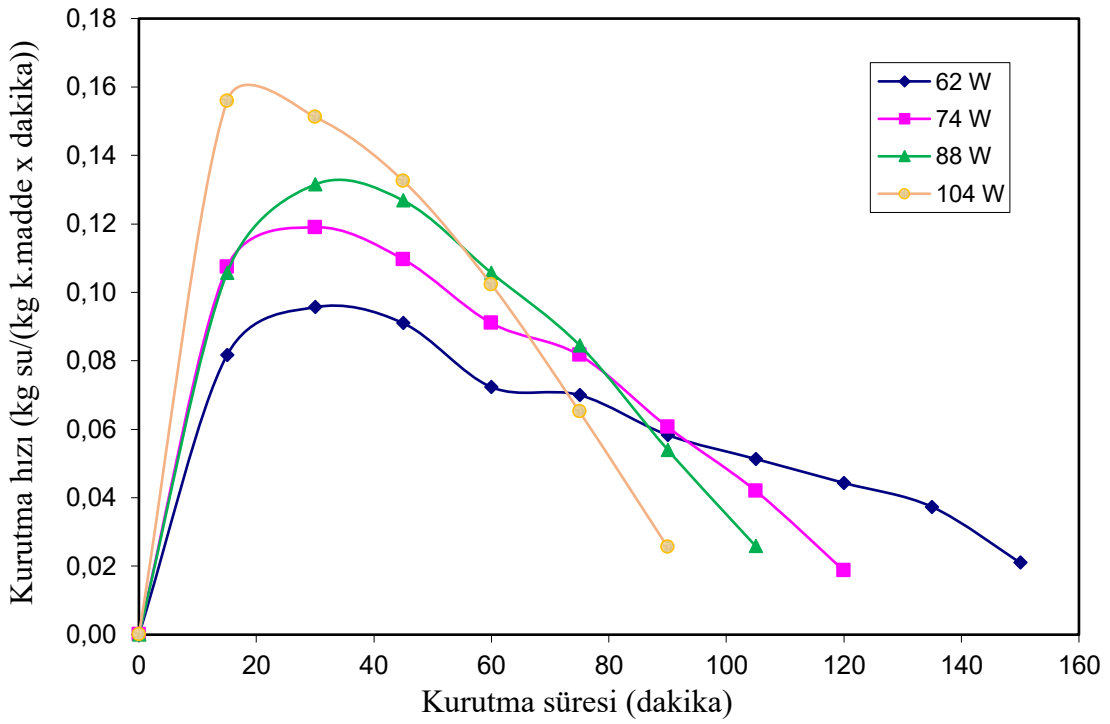
### 5.2.2 Farklı Güç Seviyelerinin Kurutma Hızı Üzerine Etkisi

Kerevizin farklı güç seviyelerinde kurutulması sonucu elde edilen deneysel verilerle Şekil 5.12 kuruma hızı-nem içeriği grafiği ve Şekil 5.13 kuruma hızı-kurutma süresi grafiği hazırlanmıştır. Güç seviyesi arttıkça kuruma hızının da arttığı, en yüksek kuruma hızının 104 W güç seviyesinde kurutulan örneklerde olduğu gözlemlenmiştir.

Grafikler incelendiğinde, kurutma eğrilerinde azalan hız periyodu görülmektedir. Benzer sonuçlara Toğrul [60] tarafından yapılan çalışmada, kızılötesi kurutucu kullanılarak havuç kurutulması işleminde de rastlanmaktadır. Ortalama kuruma hızı değerlerinin sıcaklık 50 °C'dan 80°C'a arttıkça 0,043-0,086 (g su/g kuru madde x dakika) aralığında değiştiği anlaşılmaktadır. Aynı çalışmada kuruma süresinin de sıcaklık arttıkça azaldığı 50°C'da 230 dakika iken 80°C'da 90 dakika olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12 Kerevizin farklı güç seviyeleri için kurutma hızı- nem içeriği grafiği



Şekil 5.13 Kerevizin farklı güç seviyeleri için kurutma hızı- kurutma süresi grafiği

### 5.2.3 Kızıl Ötesi Kurutucu İçin Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi

Matematiksel modelleme için kullanılan denklemler Tablo 4.1 verilmiş olup matematiksel modeller kullanılarak hesaplanan regresyon katsayısı ( $R^2$ ), ki-kare ( $\chi^2$ ) ve hataların ortalama karekökü (RMSE) değerleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

Hataların ortalama karekökü, modelden elde edilen tahmini ve deneysel veri arasındaki sapmayı ve ki-kare uyumun iyilik derecesini göstermektedir. En uygun model için ki-kare ve hataların ortalama karekökü değerinin sıfıra,  $R^2$ ’nin ise bire yakın olması gerekmektedir [57].

**Tablo 5.5** Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı modeller için  $R^2$ ,  $\chi^2$  ve RMSE değerleri

IR güç seviyesi	Model	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
62 W	Lewis	0,9671	0,003810	0,177461
	Henderson ve Pabis	0,9744	0,003256	0,162827
	Logaritmik	0,9977	0,000313	0,045495
	Page	0,9965	0,000437	0,058555
	Midilli vd.	0,9996	0,000062	0,018325
	Wang ve Singh	0,9991	0,000114	0,023372
	Vega-Lemus	0,9993	0,000088	0,022232
	Vega-Galvez	0,9744	0,003256	0,162827
74 W	Lewis	0,9641	0,004599	0,181086
	Henderson ve Pabis	0,9708	0,004205	0,173649
	Logaritmik	0,9937	0,001023	0,074210
	Page	0,9975	0,000352	0,046037
	Midilli vd.	0,9990	0,000182	0,028563
	Wang ve Singh	0,9975	0,000358	0,042915
	Vega-Lemus	0,9983	0,000239	0,038208
	Vega-Galvez	0,9708	0,004205	0,173648

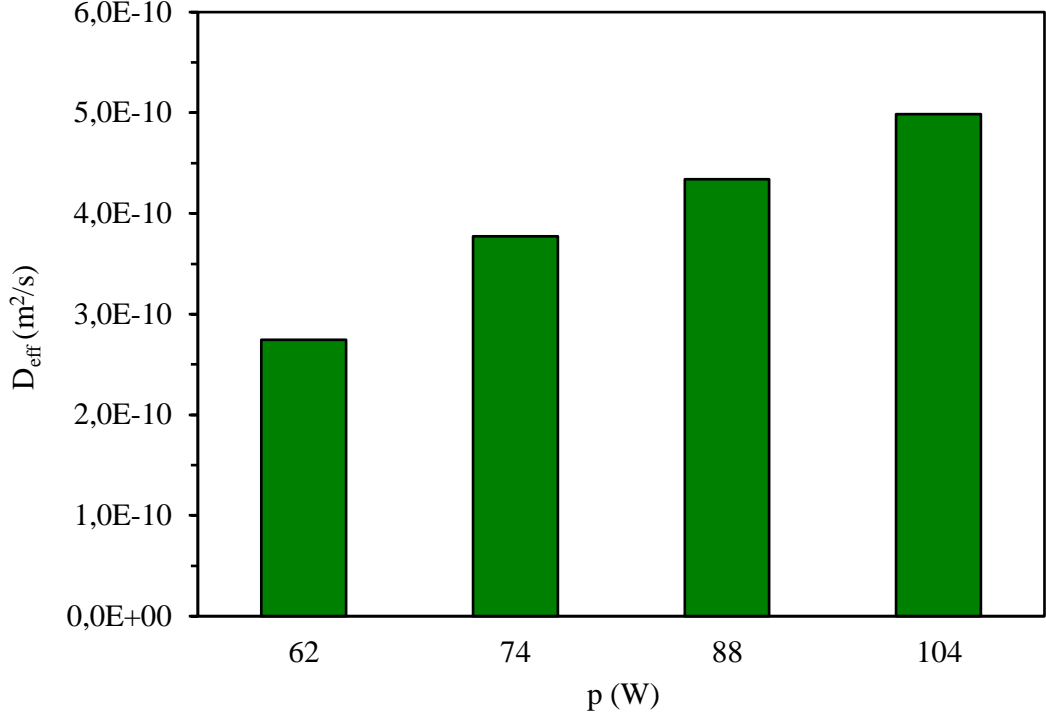
**Tablo 5.6** Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı modeller için  $R^2$ ,  $\chi^2$  ve RMSE değerleri (devamı)

88 W	Lewis	0,9500	0,006866	0,188368
	Henderson ve Pabis	0,9587	0,006614	0,185113
	Logaritmik	0,9936	0,001216	0,070901
	Page	0,9977	0,000354	0,037812
	Midilli vd.	0,9996	0,000080	0,016719
	Wang ve Singh	0,9946	0,000862	0,058113
	Vega-Lemus	0,9943	0,000914	0,066087
	Vega-Galvez	0,9587	0,006614	0,185113
104 W	Lewis	0,9665	0,004685	0,143835
	Henderson ve Pabis	0,9707	0,004915	0,147733
	Logaritmik	0,9958	0,000868	0,056186
	Page	0,9973	0,000444	0,038988
	Midilli vd.	0,9993	0,000194	0,023007
	Wang ve Singh	0,9982	0,000299	0,033338
	Vega-Lemus	0,9983	0,000281	0,031880
	Vega-Galvez	0,9707	0,004915	0,147729

Tablo 5.5 incelendiğinde tüm güç değerleri için en uygun modelin Midilli vd. modeli olduğu ve  $R^2$  değerinin 0,9990-0,9996 aralığında  $\chi^2$  değeri 0,000062-0,000194, RMSE değeri ise 0,016719-0,028563 aralığında yer aldığı anlaşılmaktadır.

#### 5.2.4 Kızılötesi Kurutucuda Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

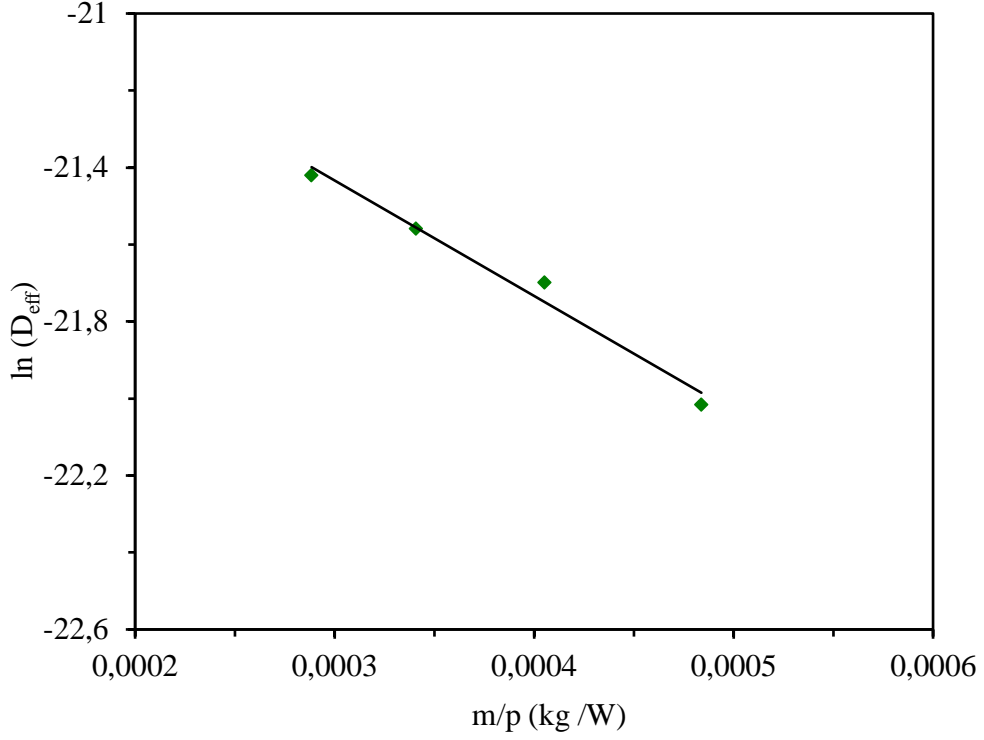
Kurutulan örneklerin difüzyon katsayısı farklı kızılötesi güç seviyeleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısının hesaplanması için (4.9) denklemi kullanılmış hesaplanan değerler Şekil 5.14'te verilmiştir.



**Şekil 5.14** Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin efektif difüzyon katsayıları Kızılötesi kurutucu ile ön işlem görmeden kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayısı değerleri 62, 74, 88 ve 104 W gücünde çalıştırılan kurutucu için hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin sırasıyla  $2,7459 \times 10^{-10}$ ,  $3,7717 \times 10^{-10}$ ,  $4,3422 \times 10^{-10}$ ,  $4,9867 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  olduğu bulunmuştur. Güç seviyesi arttıkça efektif difüzyon katsayısı değerleri artmıştır.

### 5.2.5 Kızılötesi Kurutucuda Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Kereviz numunelerinin istenilen seviyede kurutulması için gereken aktivasyon enerjisi hesabında (4.11) denklemi kullanılmıştır. İnfrared kurutucuda her bir deneysel çalışma için aktivasyon enerjisi hesabında kullanılacak  $\ln(D_{\text{eff}})$  ile  $m/p$  arasında çizilen eğri Şekil 5.15'te verilmiştir. Kurutma işlemi için gerekli olan aktivasyon enerjisi eğrinin eğimi üzerinden hesaplanmıştır.



**Şekil 5.15** Aktivasyon enerjisinin tahmini için difüzyon hızı ile kütle/güç arasındaki ilişki

Kızılötesi kurutucu içerisinde ön işlem uygulanmadan kurutulan kerevizlerin aktivasyon enerjisi değeri (4.14) denklemi yardımıyla 2,99 kW/kg olarak bulunmuştur.

$$D_{eff} = 1,283 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{2998,9 \times m}{p}\right) \quad R^2=0,9796 \quad (4.14)$$

### 5.3 Kombine Kurutma (Kızılötesi + Sıcak hava) ile Elde Edilen Bulgular

Kızılötesi kurutucu (IR)'nin kuruma süresi ve hızına etkisinin daha iyi incelenebilmesi amacıyla iki kademeli kurutma denemeleri yapılmıştır.

#### 5.3.1 Kombine Kurutmanın Kurutma Süresine Etkisi

Kızıl ötesi kurutucu ile 30 dakika ve 60 dakika süre ile kurutulan numuneler daha sonra 65 °C sıcak havalı kurutucuda %10 nem içeriğine ulaşınca kadar kurutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.6'da gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, kızıl ötesi kurutmanın toplam kurutma süresini kısalttığı



gözlemlenmiştir. 30 dakika 74 W kızılötesinde yapılan kurutma toplam kuruma süresini %7,14 azaltırken, 60 dakika kurutmanın %14,78 azalttığı tespit edilmiştir.

Benzer sonuçlara Hebbar, Vishwanathan ve Ramesh tarafından havuç ve patates sebzeleri için yapılan kombine kurutma çalışmasında rastlanmıştır. Yaptıkları deney çalışmaları sonucunda, kombine kurutmada 80 °C kurutma havası sıcaklığında ve 1 m/s kurutma hava hızında diğer yöntemlere göre kurutma süresinin %48 azaldığı ve aynı zamanda diğer koşullara göre %63 enerji tasarrufu sağladığını tespit etmişlerdir [58].

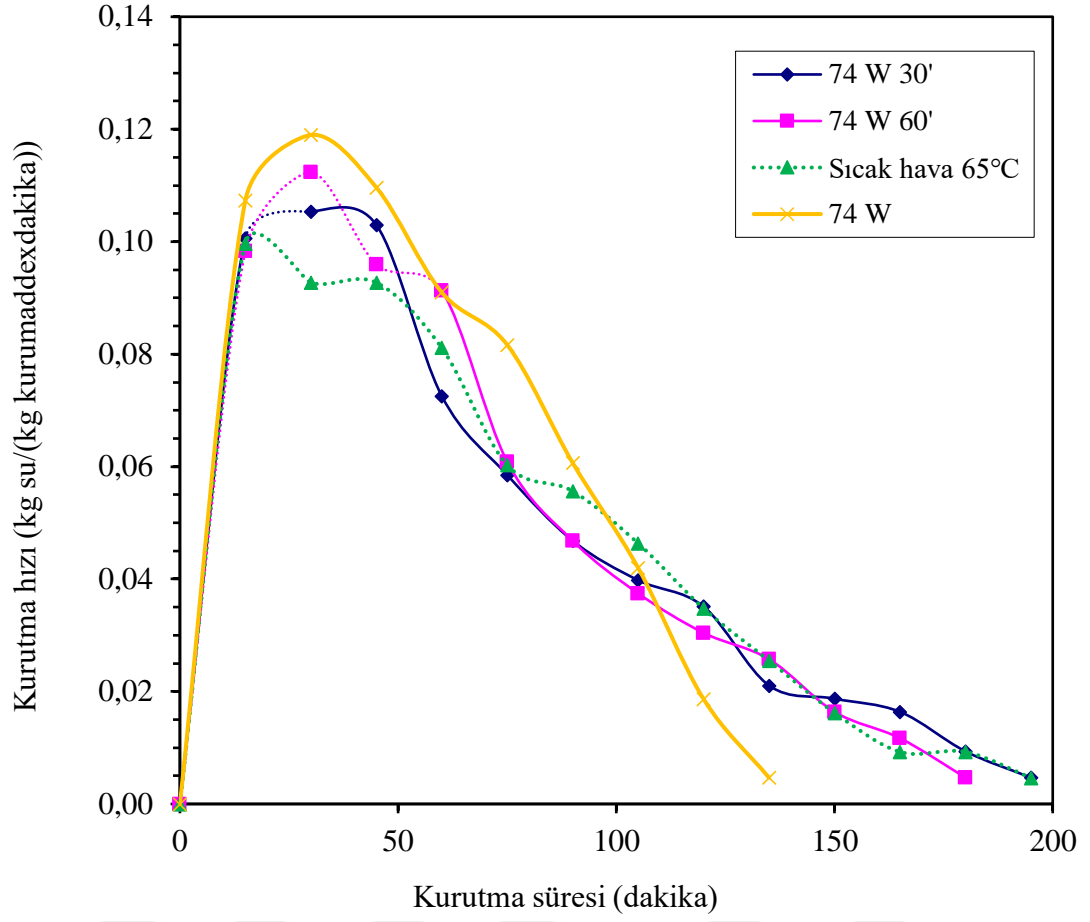
**Tablo 5.7** Kombine kurutma ile kurutma süreleri değişimi

<b>Uygulama</b>	<b>Toplam Süre (dakika)</b>
<b>Sıcak hava 65°C</b>	210
<b>IR 74 W 30 dak. + 65°C</b>	195
<b>IR 74 W 60 dak + 65°C</b>	180

### **5.3.2 Kombine Kurutmanın Kurutma Hızına Etkisi**

Kurutma süresine karşılık kuruma hızı grafiği Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Önce 60 dakika kızılötesi kurutma ile başlayan ve sıcak hava ile devam eden numunenin, kurutma hızı değerlerinin kızılötesi 74 W güç seviyesinde kurumaya benzer bir eğilimde olduğu görülmüştür.

Onwude D.I vd.'nin [59] tatlı patates için kombine kızılötesi ve sıcak havalı kurutma çalışmasında, toplam kuruma süresi (113-120 dakika), spesifik enerji tüketimi (27,67-41,44 kWh/kg) ve toplam renk değişimi (17,15-26,48) değerlerine dayanarak en uygun kurutma metodu olduğu sonucuna varmışlardır.

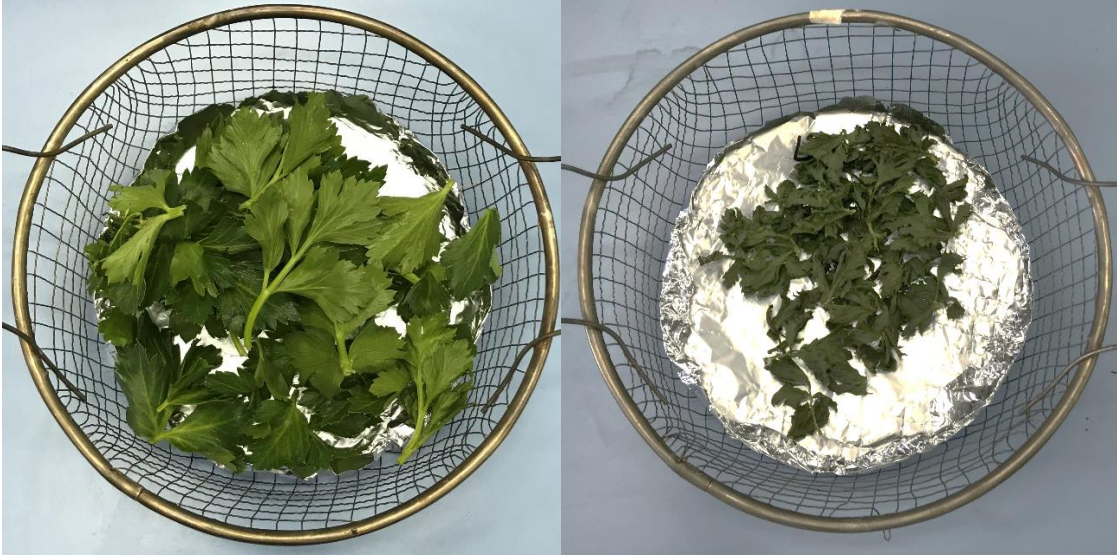


Şekil 5.16 Kerevizin farklı kurutucular için kurutma süresi-kuruma hızı grafiği

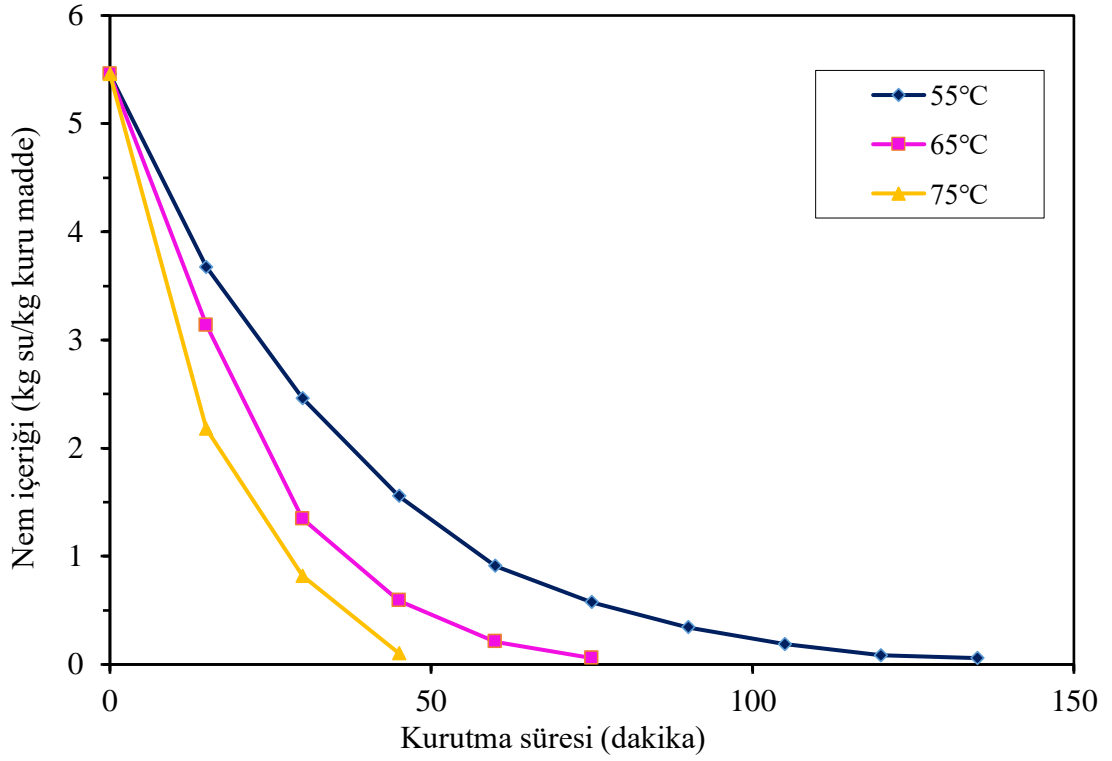
#### 5.4 Kereviz Yapraklarının Sıcak Havalı Kabin Kurutucu ile Kurutulması

Kereviz yaprakları saplarından ayrıldıktan sonra yaklaşık 25 gramlık numuneler halinde tartılarak kurutma sepetlerine yerleştirildi. Kurutma öncesi ve kurutma sonrası kereviz yapraklarının görünüşü Şekil 5.17'de gösterilmiştir.

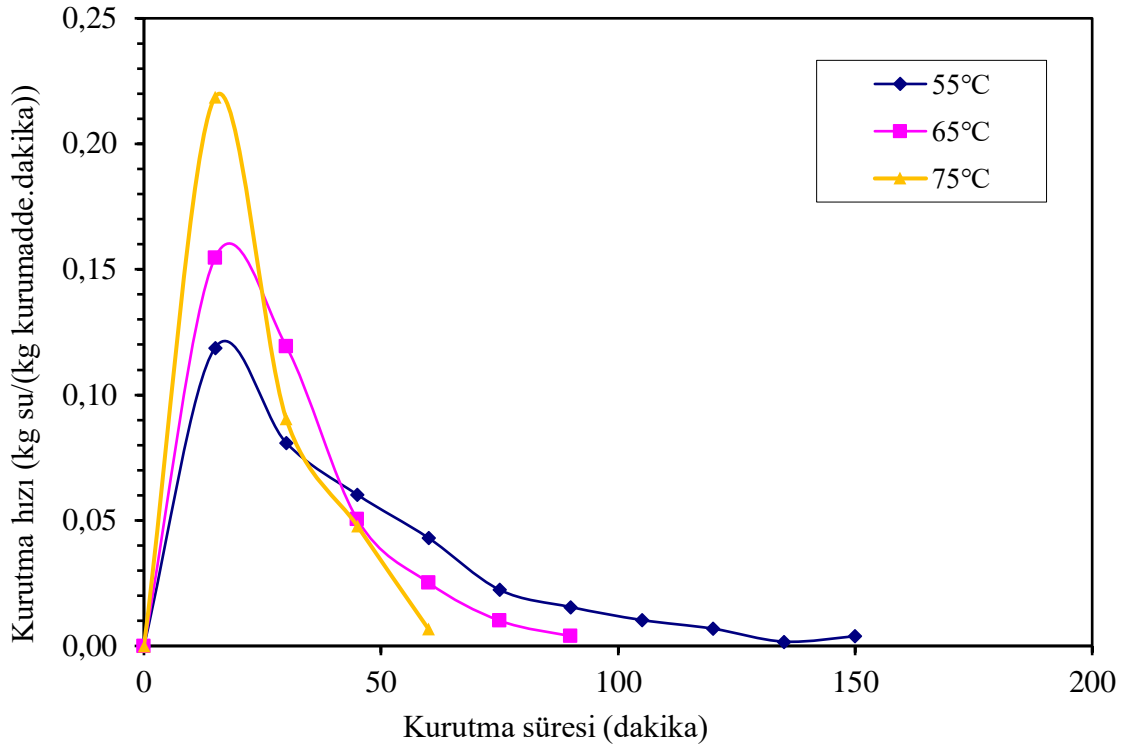
Sıcak havalı kabin kurutucuda 55, 65 ve 75 °C sıcaklıkta yaklaşık %5 nem içeriğine ulaşınca kadar kurutulmuş ve kurutma süresi boyunca nem içeriği ve kuruma hızı grafikleri Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 de gösterilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak en yüksek kuruma hızının 75 °C'da 45 dakika olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.17** Kereviz yapraklarının kurutma öncesi ve kurutma sonrası görünüşü



**Şekil 5.18** Kereviz yapraklarının farklı sıcaklık değerlerinde kurutma süresi nem içeriği grafiği



**Şekil 5.19** Kereviz yapraklarının farklı sıcaklık değerlerinde kurutma süresi nem içeriği grafiği

#### 5.4.1 Kereviz Yapraklarının Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellemesi

Matematiksel modelleme için kullanılan denklemler Tablo 4.1 verilmiş olup matematiksel modeller kullanılarak hesaplanan regresyon katsayısı ( $R^2$ ), ki-kare ( $\chi^2$ ) ve hataların ortalama karekökü (RMSE) değerleri Tablo 5.6'de verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde sıcaklık değeri için en uygun modelin Midilli vd. modeli olduğu ve  $R^2$  değerinin 0,9997-1 aralığında  $\chi^2$  değeri 0,000000-0,000073, RMSE değeri ise 0,000000 – 0,012221 aralığında yer aldığı anlaşılmaktadır.

**Tablo 5.8** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kereviz yapraklarının farklı modeller için  $R^2$ ,  $\chi^2$  ve RMSE değerleri

Sıcaklık °C	Model	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
55	Lewis	0,9976	0,000262	0,044078
	Henderson ve Pabis	0,9978	0,000263	0,044229
	Logaritmik	0,9993	0,000093	0,020364
	Page	0,9996	0,000043	0,014832
	Midilli vd.	0,9997	0,000040	0,012221
	Wang ve Singh	0,9827	0,002146	0,112962
	Vega-Lemus	0,9875	0,001543	0,100661
	Vega-Galvez	0,9978	0,000263	0,044229
65	Lewis	0,9915	0,001274	0,065284
	Henderson ve Pabis	0,9920	0,001490	0,069382
	Logaritmik	0,9963	0,000903	0,044298
	Page	0,9997	0,000038	0,009645
	Midilli vd.	0,9998	0,000073	0,009920
	Wang ve Singh	0,9955	0,000831	0,060479
	Vega-Lemus	0,9957	0,000792	0,049894
	Vega-Galvez	0,9920	0,001490	0,069379
75	Lewis	0,9970	0,000558	0,027740
	Henderson ve Pabis	0,9970	0,000830	0,029457
	Logaritmik	0,9997	0,000145	0,010448
	Page	0,9986	0,000384	0,021432
	Midilli vd.	1,0000	0,000000	0,000000
	Wang ve Singh	0,9948	0,001450	0,043248
	Vega-Lemus	0,9934	0,001863	0,056004
	Vega-Galvez	0,9970	0,000830	0,029458

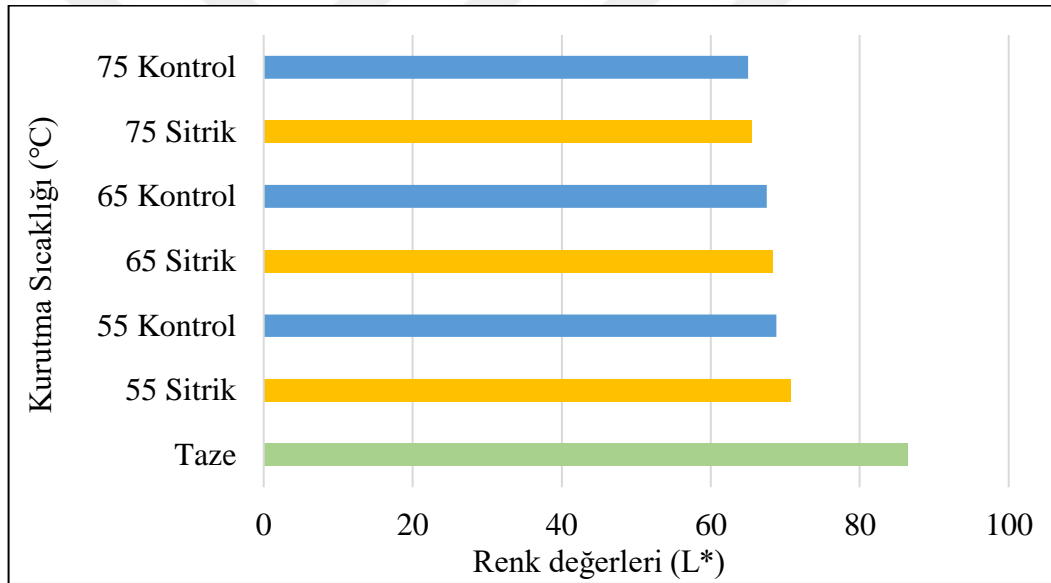
## 5.5 Kurutulan Kerevizin Renk Analizi

### 5.5.1 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Kurutma Sonucu Renk Analizi

Sıcak havalı kabin kurutucuda ön işlem uygulanan ve uygulanmayan kerevizler ile kereviz yapraklarının “L\*”, “a\*” ve “b\*” değerleri ölçülerek taze kereviz ve yaprakların “L\*”, “a\*” ve “b\*” değerleri ile karşılaştırılmıştır.

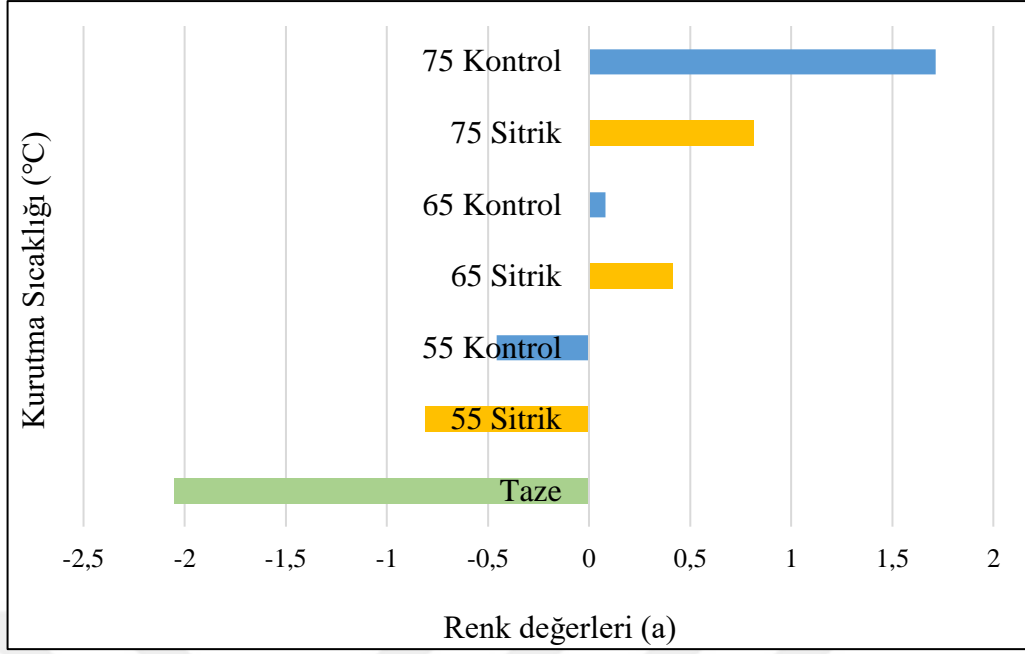
Taze kerevizlerin “L\*” parametresi ortalama 86,50, “a\*” parametresi -2,05 ve “b\*” parametresi 11,33 olarak ölçülmüştür.

Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “L\*” parametresi ortalama 70,75-65,05 arasında, “a\*” parametresi -0,80-1,71 arasında ve “b\*” parametresi 15,1-20,16 değerleri arasında ölçülmüştür. Ön işlem uygulanan ve uygulanmayan kerevizlerin renk analiz grafiği Şekil 5.20, 5.21 ve 5.22’de gösterilmiştir.

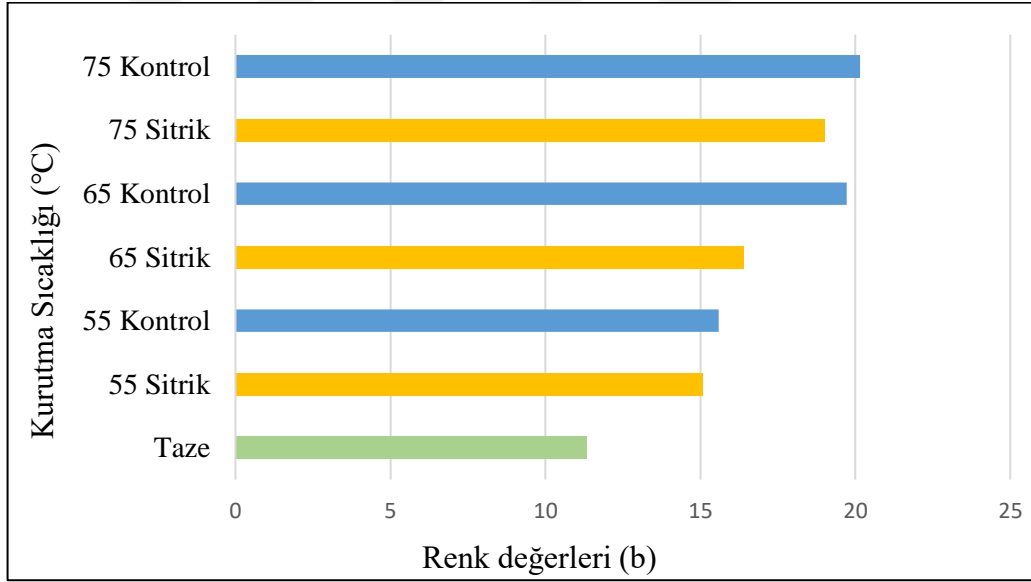


**Şekil 5.20** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “L\*” parametresi değişimi

Şekil 5.20 incelendiğinde sıcaklık arttıkça L\* parametresinin azaldığı yani rengin koyulaştığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.21** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “a” parametresi değişimi

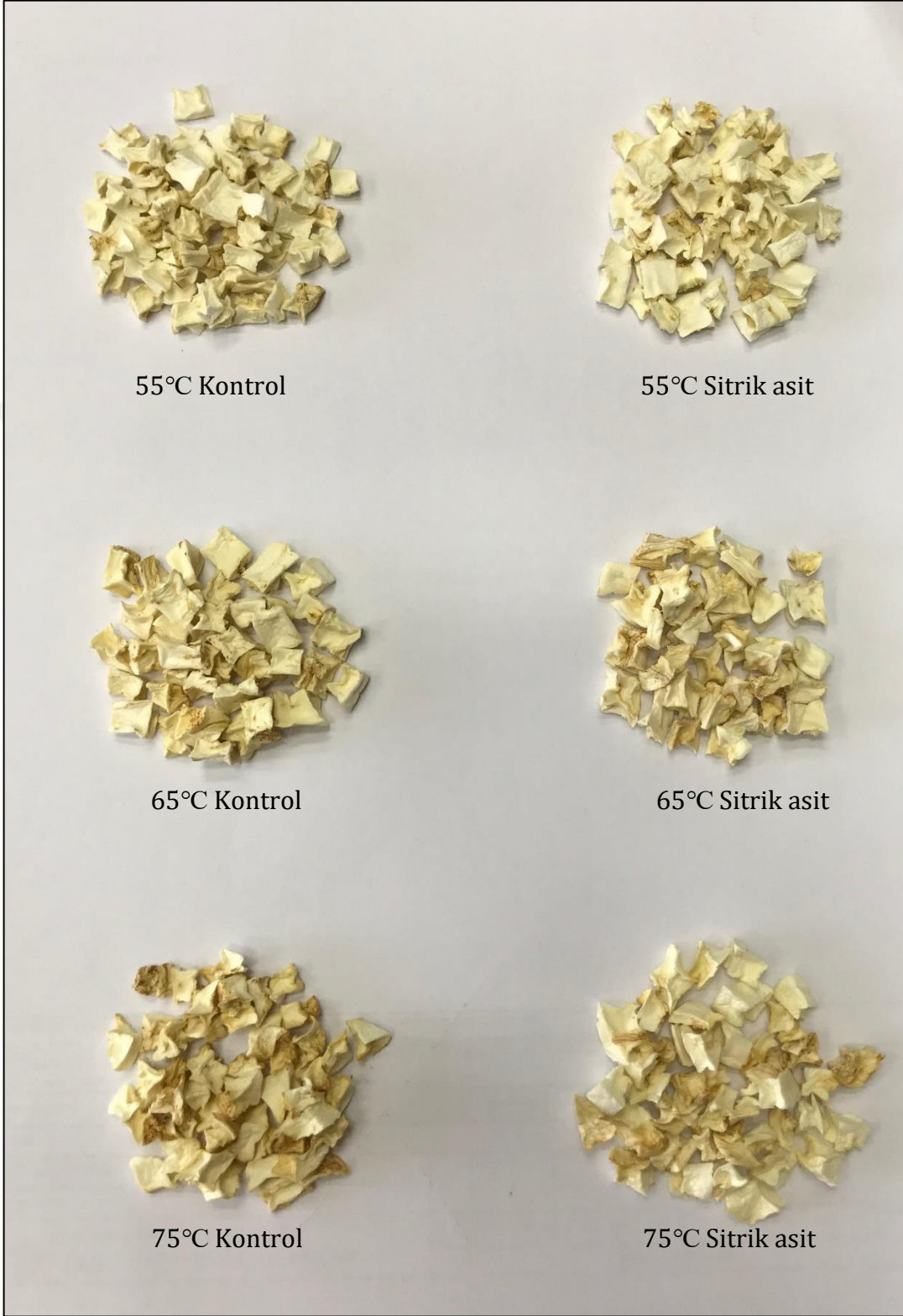


**Şekil 5.22** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin “b” parametresi değişimi

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 incelendiğinde kurutma sıcaklığı arttıkça a\* ve b\* parametresinin arttığı rengin kızılılaşıp sarardığı gözlemlenmiştir.

Ön işleme tabi tutulan numunelerin, tüm sıcaklık dereceleri için renk parametrelerinin kontrol örneklerine kıyasla taze örneklerle daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Taze kereviz örneklerine en yakın sonuçların sitrik asitte bekletilerek 55 °C sıcaklıkta kurutulan kerevizlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Ön işlem uygulanan ve uygulanmayan kereviz numunelerinin farklı sıcaklıklarda kurutma sonucu görsel numuneleri Şekil 5.23’de gösterilmiştir.



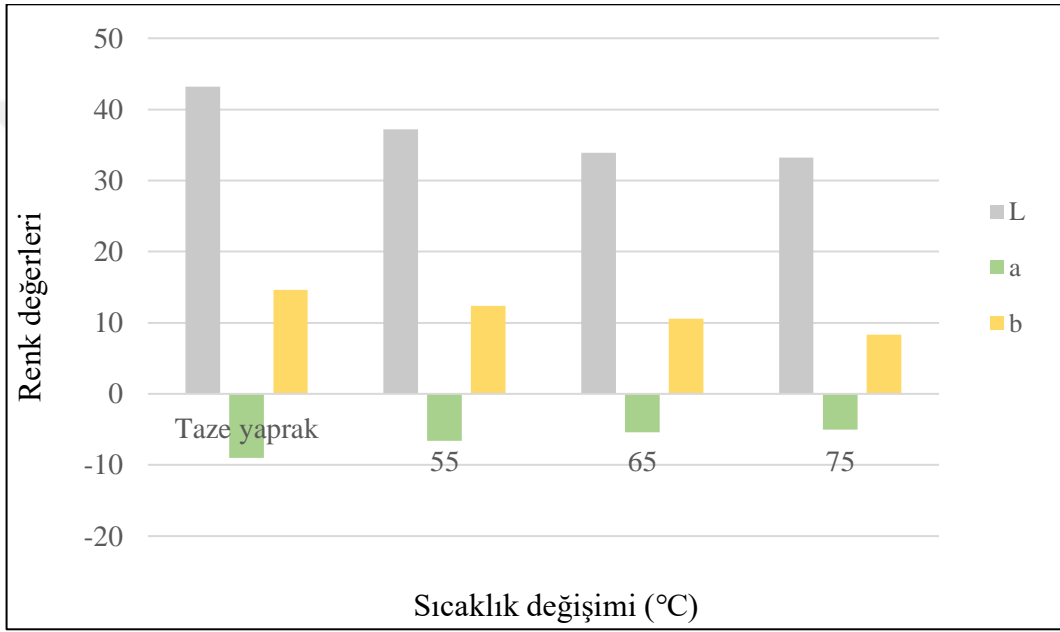
**Şekil 5.23** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı sıcaklık ve ön işlem çözeltilisine bağlı olarak renk değişimi



### 5.5.2 Sıcak Havalı Kabin Kurutucuda Kurutulan Yaprakların Renk Analizi

Taze kereviz yapraklarının “L\*” parametresi ortalama 43,21, “a\*” parametresi -9,00 ve “b\*” parametresi 14,60 olarak ölçülmüştür.

Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan yaprakların “L\*” parametresi ortalama 37,19-33,20 arasında, “a\*” parametresi -6,56-(-5,02) arasında ve “b\*” parametresi 12,34-8,29 değerleri arasında ölçülmüştür. Kereviz yapraklarının renk analiz grafiği Şekil 5.24 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.24** Sıcak havalı kabin kurutucuda kurutulan kereviz yapraklarının sıcaklığa bağlı olarak renk değişimi

Kereviz yapraklarının sıcaklık arttıkça “L\*” ve “b\*” parametrelerinin düştüğü buna karşılık “a\*” değerinin arttığı yani yapraklarının, sıcaklık artışına bağlı olarak

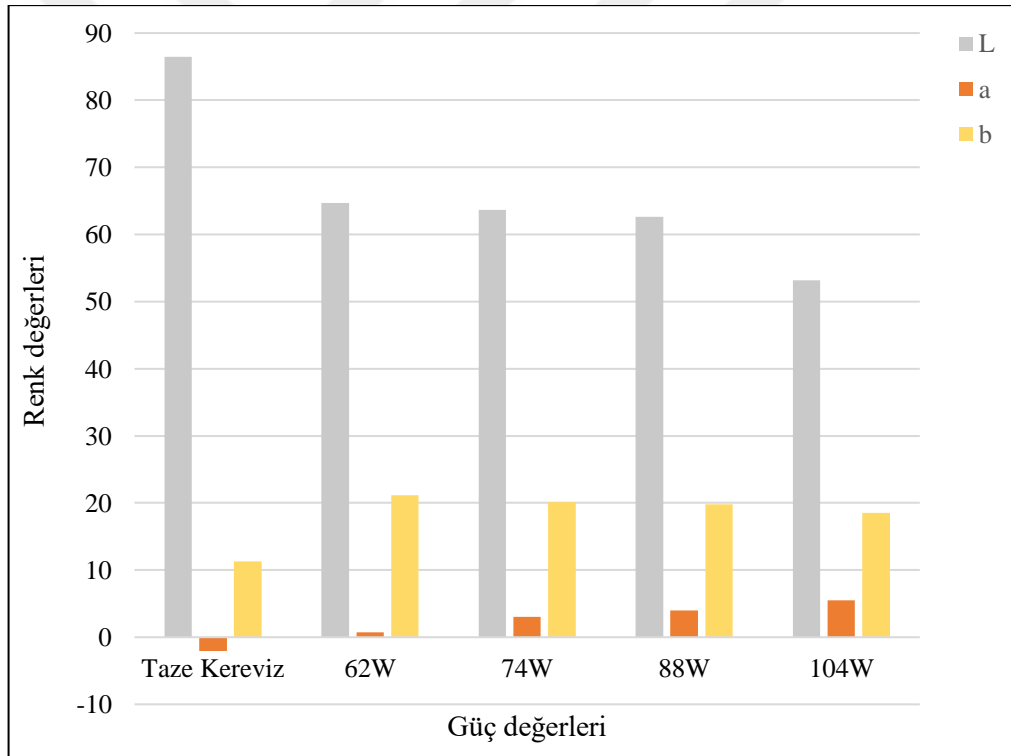
koyulaştığı ve taze yaprağa kıyasla yeşil rengin azaldığı, solgunlaştığı anlaşılmaktadır.

Benzer bir sonuç, Roman vd. [6]'nin yapmış oldukları çalışmada, 50°C üzeri kurutma sıcaklıklarının renge ve ürünün kabul edilebilirliğine zarar verdiği görülmektedir.

### 5.5.3 Kızılötesi Kurutucuda Kurutma Sonucu Renk Analizi

Taze kerevizlerin "L\*" parametresi ortalama 86,50, "a\*" parametresi -2,05 ve "b\*" parametresi 11,33 olarak ölçülmüştür.

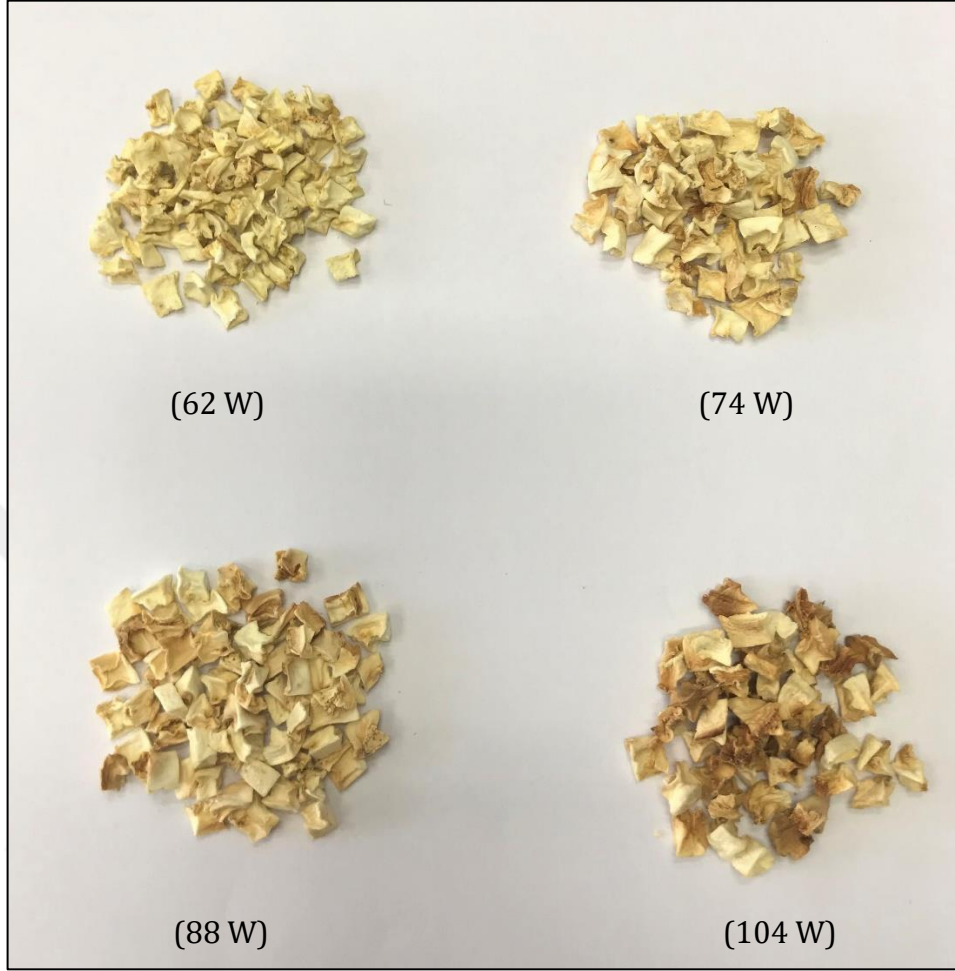
Kızılötesi kurutucuda kurutulan yaprakların "L\*" parametresi ortalama 64,72-53,16 arasında, "a\*" parametresi 0,73-5,52 arasında ve "b\*" parametresi 21,11-18,53 değerleri arasında ölçülmüştür. Farklı güç seviyeleri için oluşturulan renk değerleri grafiği Şekil 5.25'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.25** Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin farklı güç seviyelerine göre renk değerleri değişimi

Kızılötesi kurutucunun güç seviyesi arttıkça "L\*" ve "b\*" parametresinin azaldığı, buna karşılık "a\*" parametresinin arttığı, dolayısı ile rengin koyulaştığı ve kızılaştığı gözlenmektedir. Ayrıca "b\*" parametresinin azalması ile rengin sarılığının azaldığı

gözlenmiştir. Aynı zamanda Farklı güç değerlerinde kurutulan kereviz numuneleri Şekil 5.26'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.26** Kızılötesi kurutucu ile kurutulan kerevizlerin farklı güç seviyelerinde renk değişimleri

Besin içeriği açısından çok zengin olan kereviz sebzesi, sıcak havalı kabin kurutucu, kızılötesi kurutucu ve her iki kurutucunun bir arada kullanıldığı kombine sistem olmak üzere 3 farklı kurutma tekniği ile kurutulmuş ve kurutma kinetiği incelenmiştir.

Sabit hızda ve üç farklı sıcaklıkta (55, 65 ve 75 °C) kabin kurutucuda ön işlem uygulanarak ve kontrol grubu olarak kurutulan kerevizlerde sıcaklık arttıkça kuruma hızının arttığı, kuruma süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir. En hızlı kuruma 75 °C'da 135 dakika olarak gerçekleşmiştir. Ön işlem olarak uygulanan Sitrik asit çözeltisinin, tüm sıcaklık değerleri için toplam kurutma süresi ve kuruma hızları üzerine belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Kızılötesi kurutucuda dört farklı güç seviyesinde (62, 74, 88 W ve 104 W) sadece kontrol grubu olarak kurutulmuştur. Kurutma güç seviyesi arttıkça kurutma kuruma hızının arttığı, kuruma süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir. En hızlı kuruma 104 W'da 90 dakika olarak gerçekleşmiştir.

Kızılötesi kurutucuda 74 W güç seviyesinde 30 ve 60 dakika kurutulduktan sonra 65°C'de sıcak hava ile kabin kurutucuyla devam edilen kombine kurutma çalışmasının, kurutma süresini azalttığı görülmekte olup, kızılötesi ile kurutma süresi arttıkça, toplam kurutma süresinin %7-15 arasında azaldığı görülmektedir.

İki farklı kurutucuda kurutulan kerevizlerin renk analizi yapıldığında; "L\*" parametresinin, kurutma sıcaklığı ve kızılötesi kurutucunun güç seviyesi arttıkça azaldığı, kabin kurutucu için 70,75 ile 65,05 arasında, kızılötesi kurutucuda 64,72-53,16 arasında değiştiği dolayısı ile rengin koyulaştığı gözlenmiştir. "a\*" parametresinin kurutma sıcaklığı arttıkça -0,80 ile 1,71 arasında değiştiği ve güç seviyesi arttıkça 0,73-5,52 arasında değiştiği, dolayısı ile kırmızılığının arttığı gözlenmiştir. Ön işleme tabi tutulan numunelerin, tüm sıcaklık dereceleri için renk

parametrelerinin kontrol örneklerine kıyasla taze örneklerle daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kereviz yapraklarının da sıcaklık arttıkça “L\*” parametresinin azalarak 37,19-33,20 arasında değiştiği ve “a\*” parametresinin artarak -6,56-5,02 arasında değiştiği yani rengin koyulaştığı ve yeşilliğini kaybettiği tespit edilmiştir.

Sıcak havalı kabin kurutucuda ve kızılötesi kurutucuda yapılan çalışmalar neticesinde kereviz kök ve yaprakları için elde edilen kurutma eğrileri Lewis, Henderson & Pabis, Page, Logaritmik, Midilli & Küçük, Wang & Singh, Vega- Lemus ve Vega-Galvez olmak üzere toplamda sekiz adet yarı deneysel modelle test edilmiş ve R<sup>2</sup> değerleri için en yüksek,  $\chi^2$  ve RMSE değerleri için en düşük veriler Midilli & Küçük modelinde gözlenmiştir. Bu sebeple kerevizlerin kurutma eğrilerinin kurutma modeli olarak Midilli vd. modeli seçilmiştir.

Kabin kurutucuda kurutulan kerevizlerin difüzyon katsayısı değerlerinin kontrol grubu örnekler için  $1,7009 \times 10^{-10}$  ile  $3,317 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında, sitrik asit çözeltisi ile ön işlem uygulanan örnekler için ise  $1,753 \times 10^{-10}$  ile  $3,797 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında değiştiği bulunmuştur. Aktivasyon enerji değerleri kontrol grubu için 31,66 kJ/mol ve ön işlem grubu için 32,70 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Kızılötesi kurutucuda kurutulan kerevizlerin difüzyon katsayısı değerlerinin kontrol grubu örnekler için  $2,7459 \times 10^{-10}$  ve  $4,9867 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s arasında değiştiği, aktivasyon enerjisi değeri ise 2,99 kW/kg olarak hesaplanmıştır.

.

- [1] V. C. Marianni, C. A. Perussello, A. Cancelier, T. J. Lopes, A. Silva, "Hot-air Drying Characteristics of Soybeans and Influence of Temperature and Velocity on Kinetic Parameters," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 37, pp. 619–627, 2015.
- [2] K. Ramachandraiah, K. B. Chin, "Impact of Drying and Micronization on the Physicochemical Properties and Antioxidant Activities of Celery Stalk," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 97, pp. 4539–4547, 2017.
- [3] M. Beigi, I. Ahmadi, "Artificial Neural Networks Modeling of Kinetic Curves of Celeric (Apium graveolens L.) in Vacuum Drying," *Food Science and Technology*, ISSN:0101-2061, 2018.
- [4] İ. Doymaz, "Thin-layer Drying Characteristics of Sweet Potato Slices and Mathematical Modeling," *Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 3, pp. 277-285, 2011.
- [5] N. Heybeli, C. Ertekin, G. Dikici, "Infrared Kurutucu ile Kerevizin Kurutulması," *Tralleis Elektronik Dergisi*, vol.1 pp.16-25, 2013.
- [6] F. Román, O. Hensel, "Effect of Air Temperature and Relative Humidity on The Thin-Layer Drying of Celery Leaves (Apium graveolens var. secalinum)," *Agricultural Engineering International The CIGR Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1-8, 2011.
- [7] X. Wei, K. Fan, J. He, F. Yan, "Characterization of Thin Layer Hot Air Drying of Celery Root," *Advance Journal of Food Science and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 412-421, 2015.
- [8] Z. Yıldız, A. Sarımeseli, "Optimization of Microwave Drying of Celery Using Response Surface Method," *Focusing on Modern Food Industry* vol. 5, pp. 16-24, 2016.
- [9] İ. Doymaz, "Convective Air Drying Characteristics of Thin Layer Carrots," *Journal of Food Engineering*, vol. 61, pp. 359–364, 2004.
- [10] I. Bialobrzewski, "Determination of The Mass Transfer Coefficient During Hot-air Drying of Celery Root," *Journal of Food Engineering*, vol. 78, pp. 1388–1396, 2007.
- [11] I. Bialobrzewski, "Determination of The Heat Transfer Coefficient by Inverse Problem Formulation During Celery Root Drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 74, pp. 383–391, 2006.

- [12] O. A. Karabacak, Ö.G. Sınır, S. Suna, "Mikrodalga ve Mikrodalga destekli Kurutmanın Çeşitli Meyve ve Sebzelerin Kalite Parametreleri Üzerine Etkileri," Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, vol. 29, no. 2, pp. 125-135, 2015.
- [13] A. Kaya, M. S. Kamer, H.E. Şahin, "Trabzon Hurmasının (Diospyros Kakı L.) Kuruma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi," Gıda, vol. 40, no.1, pp. 15-21, 2015.
- [15] H. Ayan, "Güneşte ve Yapay Kurutucuda Kurutulmuş Domates (*Lycopersitcum esculentum*) Üretimi ve Proses Sırasındaki Değişimlerin Belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, 2010.
- [14] N. Tuğrul, İ. Doymaz, M. Pala, "Dereotunun Kurutma Karakteristiklerinin İncelenmesi," Gıda Dergisi, vol. 26, no. 6, pp. 403-407, 2001.
- [16] M. Pala, Y. B. Saygı, "Su Aktivitesi ve Gıda İşlemedeki Önemi," Gıda Dergisi, vol. 8, no. 1, pp. 33-39, 1983.
- [17] G. Özay, M. Pala, Y.B. Saygı, "Bazı Gıdaların Su Aktivitesi Yönünden İncelenmesi," Gıda Dergisi, vol. 18, no. 6, pp. 377-383, 1993.
- [18] M. Soydan, "Elmanın Kurutulması: Matematiksel Modelleme ve Bazı Kalite Problemlerinin Belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2019.
- [19] Z. Deniz, "Akışkan Yataklı Kurutucu Modellemesi ve Analizi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2010.
- [20] G. M. Yılmaz, "The Effect of Ultrasound Pretreatment on Drying Characteristics of Apple Slices," Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [21] N. Sarıkulak, "Kirazın Farklı Kurutucularda Kurutulması ve Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2017.
- [22] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, MEGEP Gıda Teknolojisi Sebzeleri Kurutma, [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Sebzeleri%20Kurutma.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Sebzeleri%20Kurutma.pdf), 25 Mayıs 2019.
- [23] G. Bingöl, Y. O. Devres, "Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2009.
- [24] F. İçier, S. Sabancı, "Kurutma Sistemleri: Kurutma ve İşletmede Hijyen," 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, İzmir, 2013.
- [25] N. Kutlu, A. İsci, Ö. Ş. Demirkol, "Gıdalarda İnce Tabaka Kurutma Modelleri," Gıda Dergisi, vol. 40, no.1, pp. 39-46, 2014.
- [26] F. Şen, "Meyve ve Sebzelerin Kurutulmasında Ön İşlemler," 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, İzmir, 2013.

- [27] N. Türkmen, F. Sarı, "Minimal İşlem Görmüş Meyve ve Sebze Üretimi ve Gıda Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi," Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 5, no. 2, pp. 223-232, 2004.
- [28] B. Erbay, E. Küçüköner, "Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri," Türkiye 10. Gıda Kongresi, 21-23 Mayıs, Erzurum, 2008.
- [29] H. Doğan, "Kurutmada Kullanılan Hava Isıtma Kollektörlerinin Deneysel Karşılaştırılması," Teknoloji Dergisi, vol. 1, no. 2, pp. 75-82, 2001.
- [30] A. Güngör, "Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri," 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, İzmir, 2013.
- [31] H. Günerhan, "Endüstriyel Kurutma Sistemleri," Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Temel Bilgiler Tasarım ve Uygulama Eki, vol. 13 pp. 1-11, 2005.
- [32] R. Çalhan, D. Kaya, G. Tulger, M. Eyidoğan, "Organik Gübre Kurutma Teknolojileri: Akışkan Yataklı Kurutucular," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, vol. 53, no. 634, pp. 22-33, 2012.
- [33] J. Yongsawatdigul, S. Guneseckaran, "Microwave-Vacuum Drying of Cranberries: Part II. Quality Evaluation," Journal of Food Processing and Preservation, vol. 20, pp.145-156, 1996.
- [34] V. Kırmacı, "Dondurarak Kurutma Sisteminin Tasarımı, İmalat ve Performans Deneylerinin Yapılması," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [35] N. Yılmaz, N. B. Tuncel, "Kızılötesi Teknolojisi ve Gıda İşlemedeki Kullanımı," Akademik Gıda Dergisi, vol. 14, no. 2, pp. 196-203, 2016.
- [36] M. Aktaş, M. İlbaş, A. Yalçın, M. Şahin, "Kızılötesi Işınımlı Bir Kurutucuda Kuruma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi," Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 28, no. 4 pp. 767-775, 2013.
- [37] A. Kokotkiewicz, M. Luczkiewicz, "Celery (*Apium graveolens* var. *dulce* (Mill.) Pers.) Oils," Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety, vol. 37, pp. 325-338, 2016.
- [38] S. K. Malhotra, "Handbook of Herbs and Spices," Volume 2, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 2016.
- [39] Şifalı Bitkiler Kütüphanesi <http://www.ebitki.com/index.php?hq=Apium%20graveolens&gr=Latince>, 29.04.2019
- [40] Buy Celeriac [https://www.crocus.co.uk/plants/\\_/celeriaprinz/classid2000014706](https://www.crocus.co.uk/plants/_/celeriaprinz/classid2000014706), 20.03.2019
- [41] S. Başak, F. Candan, "Apium Graveolens Linn. (Apiaceae) Tohumu Uçucu Yağının Kimyasal Bileşimi ve In vitro Antioksidan Aktivitesi," İTÜ Dergisi/c Fen Bilimleri, vol. 6, pp. 3-13, 2008.



- [42] Ö. Güngör, "Katalaz Enziminin Kerevizden (*Apium graveolens*) Safılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2015.
- [43] Veri Bankası, Kereviz, kök, Ulusal Gıda Kompozisyon Veri Tabanı, <http://www.turkomp.gov.tr/food-kereviz-kok-265>, 20 Mart 2019.
- [44] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Bahçecilik, Kereviz Yetiştiriciliği [http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/alanprogramlari/bahcecilik/beceri/beceri\\_alt/kereviz\\_yetistirciligi.html](http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/alanprogramlari/bahcecilik/beceri/beceri_alt/kereviz_yetistirciligi.html), 29 Mart 2019
- [45] D. DeLong, "How to Dry Foods Revised Edition," Penguin Group, New York, 2006.
- [46] Kurutulmuş Sebzeler, Kuru Meyveler, Sebze Tozları <https://www.kurucum.com/kurutulmus-kereviz.html>, 22 Mart 2019
- [47] E. Köse, T. Şahinbaşkan, "Renk Yönetiminde Kullanılan Standart ICC Profillerinin Türkiye'de Oluşturulmuş Bazı Profiller ile Karşılaştırılması," Politeknik Dergisi, vol. 11, no. 4, pp. 365-371, 2008.
- [48] A. El-Beltagy, G. R. Gamea, A. H. A. Essa, "Solar Drying Characteristics of Strawberry," Journal of Food Engineering, vol. 78, pp. 456-464, 2007.
- [49] Z. Erbay, F. Icier, "Thin-layer Drying Behaviours of Olive Leaves (*Olea Europaea L.*)", Journal of Food Process Engineering, vol. 33, pp. 287-308, 2010.
- [50] T. J. Afolabi, T. Y. Tunde-Akintunde, J. A. Adeyanju, "Mathematical Modeling of Drying Kinetics of Untreated and Pretreated Cocoyam Slices," Journal of Food Science and Technology, vol. 52 pp. 2731-2740, 2015.
- [51] K. O. Falade, O. S. Ogunwolu, "Modeling of Drying Patterns of Fresh and Osmotically Pretreated Cooking Banana and Plantain Slices," Journal of Food Processing and Preservation, vol. 38, pp. 373-388, 2014.
- [52] A. Midilli, H. Kucuk, "Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Pistachio by Using Solar Energy," Energy Conversion and Management, vol. 44, pp. 1111-1122, 2003.
- [53] L. Z. Deng, X. H. Yang, A. S. Mujumdar, J. H. Zhao, D. Wang, Q. Zhang, J. Wang, Z. J. Gao, H. W. Xiao, "Red Pepper (*Capsicum annum L.*) Drying: Effects of Different Drying Methods on Drying Kinetics, Physicochemical Properties, Antioxidant Capacity and Microstructure," Drying Technology, vol. 36, no. 8, pp. 893-907, 2018.
- [54] A. Vega-Galvez, K. D. Scala, K. Rodriguez, R. Lemus-Mondaca, M. Miranda, J. Lopez, M. Perez-Won, "Effect of Air-drying Temperature on Physico-Chemical Properties, Antioxidant Capacity, Colour and Total Phenolic Content of Red Pepper," Food Chemistry, vol. 117, pp. 647-653, 2009.
- [55] J. Crank, "The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press," 1975.
- [56] H. Darvishi "Quality, Performance Analysis, Mass Transfer Parameters and Modeling of Drying Kinetics of Soybean," Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 34, pp.143-158, 2017.

- [57] N. Kutlu, A. İşçi, "Farklı Kurutma Yöntemlerinin Patlıcanın Kurutma Karakteristikleri Üzerine Etkisi ve Kurutmanın Matematiksel Modellenmesi," Akademik Gıda, vol. 14, no.1, pp. 21-27, 2016.
- [58] H. Hebbar, K. H. Vishwanathan, M. N. Ramesh, "Development of Combined Infrared and Hot-air Dryer for Vegetables," Journal of Food Engineering, vol. 65, pp. 557-563, 2004.
- [59] D. I. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, R. Janius, G. Chen, "The Effectiveness of Combined Infrared and Hot-air Drying Strategies for Sweet Potato," Journal of Food Engineering, vol. 241, pp. 75-87, 2019.
- [60] H. Toğrul, "Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot," Journal of Food Engineering, vol. 77, pp. 610-619, 2006.

