

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI POMPALI KURUTUCUDA DOMATESİN KURUTMA
KARAKTERİSTİKLERİ İLE SİSTEMİN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Berkay ÖZEREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

Eş Danışman

Doç. Dr. Cüneyt TUNÇKAL

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI POMPALI KURUTUCUDA DOMATESİN KURUTMA
KARAKTERİSTİKLERİ İLE SİSTEMİN PERFORMANSININ
İNCELENMESİ

Berkay ÖZEREN tarafından hazırlanan tez çalışması 17.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Cüneyt TUNÇKAL
Yalova Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nil ACARALI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail İNCİ, Üye
İstanbul Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Isı Pompalı Kurutucuda Domatesin Kurutma Karakteristikleri ile Sistemin Performansının İncelenmesi” 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.





Aileme ve eşime

TEŞEKKÜR

Sayın tez danışmanım Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ ve eş tez danışmanım Doç. Dr. Cüneyt TUNÇKAL eşliğinde hazırlanan yüksek lisans tezimde, hiçbir zaman benden bilgisini esirgemeyen ve kıymetli vaktini bana ayıran kıymetli hocalarıma bu destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Buna ek olarak bu süreç içerisinde bana desteğini hiç esirgemeyen aileme ve eşime yanımda olup beni destekledikleri için de sonsuz minnettarlığımı bildirmek isterim.

Berkay ÖZEREN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
2 KURUTMA	4
2.1 Kurutma İşlemi	4
2.2 Meyveler ve Sebzeler	5
2.3 Kurutma Yöntemleri	6
2.4 Isı Pompalı Kurutucular	13
2.4.1 Isı pompalı kurutucuların kurutma işlemlerinde kullanılması	16
2.4.2 Isı pompalı kurutucuların performansını etkileyen faktörler	17
2.4.3 Isı pompalı kurutucuların ekipmanları	17
2.4.4 Isı pompalı kurutucu sistem örnekleri ve avantajları	18
2.5 Kuruma Hızı Eğrileri	19
2.6 Kurutmayı Etkileyen Faktörler	21
2.6.1 Havanın sıcaklığı	22
2.6.2 Havanın hızı	22
2.6.3 Havanın nemi	22
2.6.4 Yüzey alanı	22
3 DOMATES	23
3.1 Domatesle İlgili Genel Bilgiler	23
3.1.1 Kiraz domates hakkında bilgiler ve kurutulması	25
3.2 Domates Kurutmayla İlgili Yapılan Literatür Çalışmaları	27
4 MATERYAL VE YÖNTEM	34
4.1 Materyal	34
4.2 Kullanılan Ekipmanlar	34
4.3 Yöntem	38

4.3.1 Kurutma işlemine hazırlık.....	38
4.3.2 Isı pompalı kurutucuyla kiraz domates dilimlerinin kurutulması	39
4.4 Nem Tayini	42
4.5 Matematiksel Modelleme.....	42
4.6 Regresyon Analizi.....	43
4.7 Difüzyon Katsayısının ve Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	44
4.8 Renk Analizi	45
4.9 HPD Sisteminin Enerji Analizi	46
5 DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ	47
5.1 Sıcaklığın Kuruma Süresine Etkisi	47
5.2 Dilim Kalınlığının Etkisi.....	48
5.3 Hava Hızı Değişimi.....	50
5.4 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi.....	50
5.5 Difüzyon Katsayılarının Hesaplanması	52
5.6 Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	54
5.7 Kurutulmuş Ürünlerin Renk Analizi.....	55
5.8 Sistemin Enerji Performansının İrdelenmesi	57
6 SONUÇ	60
KAYNAKÇA	63
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	74

SİMGE LİSTESİ

A	Kanal kesit alanı
C	Chroma değeri
°C	Sıcaklık
C_{pa}	Havanın özgül ısısı (kJ/kgK)
C_{pam}	Nemli havanın özgül ısısı (kJ/kgK)
C_{pv}	Su buharının özgül ısısı (kJ/kgK)
D_0	Sonsuz sıcaklıkta difüziviteye eşdeğer bir sabit (m^2/s)
D_{eff}	Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s)
DR	Kurutma hızını (kg su/ (kg kuru madde $\times$ dakika))
E_a	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
L	Dilim yarı kalınlığı (m)
M	Nem içeriğini (kg su/kg kuru madde)
$\dot{m}_a$	Havanın kütleli debisi (kg/s)
m_d	Kuru madde miktarını (kg)
M_e	Denge su miktarı (kg su/kg kuru madde)
M_0	T =0 anındaki nem içeriği (kg su/kg kuru madde)
M_t	t anındaki nem içeriğini (kg su/kg kuru madde)
m_w	Su miktarını (kg)
MR	Nem oranı
MR_{exp}	Deneysel nem oranı
MR_{pre}	Tahmin edilen nem oranı
P	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
$\dot{Q}_{kond}$	Kurutma sistemine verilen ısı miktarı (kW)
v	Hava hızı (m/s)
R	Üniversal gaz sabiti (8.314 kJ/(mol $\times$ K))

R^2	Regresyon katsayısı
RMSE	Tahminin standart hatası
T	Kurutma sıcaklığıdır (°C)
t	zaman (dakika)
ω_a	Mutlak nem oranı
W_f	Kurutma havası dolaşım fanı enerji tüketimi (kW)
$\dot{W}_{komp}$	Kompresör enerji tüketimi (kW)
χ^2	Khi-kare



KISALTMA LİSTESİ

CFF	Kloroflorokarbonlar
COP	Performans katsayısı
cm ³	Santimetreküp
dak	Dakika
EVO	Enerji verimlilik oranı
FD	Dondurucu kurutma
g	Gram
h	Saat
HAD	Sıcak hava kurutucu
HFCF	Hidrokloroflorokarbonlar
HPD	Isı pompalı kurutucu
kg	Kilogram
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
MVD	Mikrodalga vakum kurutucu
s	Saniye
SCD	Güneş kabin kurutucu
UV	Ultraviyole ışınları
V	Volt
W	Watt

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kurutulmuş meyve örnekleri.....	5
Şekil 2.2 Güneşle kurutma yöntemi örnekleri	7
Şekil 2.3 Püskürtmeli kurutucu	12
Şekil 2.4 Isı pompalı kurutucu örneği	14
Şekil 2.5 Basit ısı pompalı kurutucu şeması.....	17
Şekil 2.6 Nem içeriği ve zaman arasındaki ilişki	20
Şekil 2.7 Kuruma hızı ve zaman arasındaki ilişki	20
Şekil 2.8 Nem içeriği-kuruma hızı arasındaki ilişki	20
Şekil 3.1 Kiraz domates örneği.....	25
Şekil 3.2 Kurutulmuş kiraz domates örneği	26
Şekil 4.1 Deneyler sırasında tepsiye dizilmiş domates dilimleri.....	34
Şekil 4.2 Deneylerin yapıldığı kurutma sistemi	35
Şekil 4.3 Kurutma sisteminin başka açıdan resmi	35
Şekil 4.4 Denemelerin yapıldığı sistemin şematik çizimi	36
Şekil 4.5 Kurutma sisteminde kullanılan elektrik sayacı	37
Şekil 4.6 Kurutma sisteminde kullanılan kompresör ve buharlaştırıcı.....	38
Şekil 4.7 Sistemde kullanılan soğutucu bağlantıları.....	38
Şekil 4.8 Kurutma işlemi sürecinin akışı.....	39
Şekil 4.9 Isı pompalı kurutucunun kabin kısmı	40
Şekil 4.10 Isı pompalı kurutucunun enerji ölçüm ve hız kontrol ekipmanları	40
Şekil 4.11 Deneyler sonucunda kurutulmuş kiraz domates örnekleri	41
Şekil 4.12 Konica Minolta Cr-400 cihazının genel görünüşü.....	45
Şekil 5.1 Farklı sıcaklıklardaki ve $v=1$ m/s hava hızında kurutulan domates dilimlerine (1/4) ait nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi.....	48
Şekil 5.2 Farklı kalınlıktaki domates dilimlerinin 45°C sıcaklıkta kurutulan örneklerinin nem miktarının kurutma süresiyle değişimi	49
Şekil 5.3 Farklı hava hızlarında ve 40°C’de kurutulan domates dilimlerine (1/4) ait nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimi.....	50
Şekil 5.4 Domates dilimlerine ait deneysel ve Midilli & Küçük modelinden elde edilen tahmini nem oranı değerleri	52
Şekil 5.5 Domates dilimlerinin (1/4) efektif difüzyon katsayıları.....	54
Şekil 5.6 Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi.....	54

Şekil 5.7 Taze ve farklı sıcaklıklarda kurutulan örneklerin renk parametreleri56



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Deney çalışma verileri	3
Tablo 2.1 Tarımsal ürünlerin kurutma yöntemleri	9
Tablo 3.1 Yenilebilir 100 g domates ve domates ürünlerinin mineral madde bakımından verileri	24
Tablo 3.2 Yenilebilir 100 g domates ve domates ürünlerinin farklı vitamin değerleri	24
Tablo 4.1 Kurutulmuş numunelerin kurutma parametreleri	41
Tablo 4.2 Matematiksel modelleme için uygulanan denklemler	43
Tablo 5.1 Domates numunelerinin (1/4) kuruma süreleri	47
Tablo 5.2 Farklı sıcaklıklarda kurutulan kiraz domates dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler	51
Tablo 5.3 Farklı sıcaklıklarda kurutulan domates dilimlerinin (1/4) efektif difüzyon katsayısı değerleri.....	53
Tablo 5.4 Literatürden farklı domates türleri için efektif difüzyon katsayı değerleri.....	53
Tablo 5.5 Farklı domates türleri için literatürdeki aktivasyon enerjileri	55
Tablo 5.6 Domates dilimleri için renk değerlerinin sonuçları	56
Tablo 5.7 1/4 dilim kalınlığı ve 1 m/s hava hızında farklı kurutma sıcaklıklarında COP_{sis} değerleri	57
Tablo 5.8 1/4 dilim kalınlığı ve 40°C kurutma sıcaklığında farklı hava hızlarında COP_{sis} değerleri.....	58
Tablo 5.9 1/2 dilim kalınlığı ve 45°C kurutma sıcaklığında farklı hava hızlarında COP_{sis} değerleri.....	58

ISI POMPALI KURUTUCUDA DOMATESİN KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİ İLE SİSTEMİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Berkay ÖZEREN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İbrahim DOYMAZ

Eş Danışman: Doç. Dr. Cüneyt TUNÇKAL

Kurutma sebze ve meyvelerin sahip olduğu %85-90 oranındaki su miktarını %10-20 oranlarına kadar getirerek içerisindeki suyu uzaklaştırmak ve gıdaların raf ömrünü uzatmak amacıyla uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Kurutmanın temel mantığı, sebze ve meyvelerde bulunan suyun kimyasal ve mikrobiyal reaksiyonlara sebep olmaması için uygulanan bir yöntemdir. Kurutmanın diğer bir faydası ise kurutulan ürünün hacmi küçüldüğünden dolayı paketlemede ve depolamada sağlanan kazançtır. Bu çalışmada, kiraz domateslerin boyutları çap olarak 29 ± 1 mm, boyları ise 28 ± 1 mm olacak şekilde seçilmiştir. Deney sırasında kiraz domatesler yarım ($1/2$) ve çeyrek ($1/4$) boyutlarında dilimlenmiştir, deneyler sırasında ortam sıcaklığı $24.4 \pm 1^\circ\text{C}$ sabitlenmiştir ve ortam nemi %46-54 arasında değişmiştir. Kiraz domatesler, 35, 40 ve 45°C sıcaklıklarda ısı pompalı kurutucuda kurutulmuştur. Isı pompalı kurutucuda kurutma için kullanılan hava hızları 0.5, 0.75 ve 1 m/s olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak kurutma nem oranı/kuruma zamanı eğrileri modellenmiştir. Deneylerde farklı kurutma modelleri uygulanmış olup Midilli & Kucuk modelin uygun olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak deneyler sırasında

kiraz domatesin dilim boyutlarının kurutma süresindeki ve kurutma hızındaki etkisi de incelenmiştir. İnceleme sonucunda 1/4 boyutundaki dilim kiraz domates dilimleri daha kısa sürede kuruduğu görülmüştür.

DeneySEL verilerden yararlanılarak efektif difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerji değERLERİ hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısı 1/4 boyutundaki dilim kiraz domateslerde 35, 40 ve 45°C sıcaklıklarda sırasıyla 2.32×10^{-10} , 3.53×10^{-10} ve 3.99×10^{-10} m²/s olduğu gözlemlenmiştir. Aktivasyon enerjisi 44.39 kJ/mol olarak bulunmuştur. Sistemin enerji analizi yapıldığında 1/4 dilim kalınlığında 1 m/s hava hızında kurutma sıcaklığı 45°C olan kurutma sisteminde; kurutma süresi 357 dakika, toplam kompresör enerji tüketimi 4.212 kWh, toplam enerji tüketimi 4.783 kWh ve COP_{sis} 2.715 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, 24°C'den istenen sıcaklığa ulaşma süresi 758 saniye olarak gerçekleşmiştir ve yapılan analizlerde enerji tüketimi bakımından en avantajlı sistem olmuştur. Kurutulan numuneler renk değİşİmleri açısından değERlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kiraz domates, ısı pompalı kurutucu, kurutma, kinetik model, renk

INVESTIGATION OF THE DRYING CHARACTERISTICS OF TOMATO AND THE PERFORMANCE OF THE SYSTEM IN A HEAT PUMP DRYER

Berkay ÖZEREN

Department of Chemical Engineering

Master Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim Doymaz

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cüneyt TUNÇKAL

Drying is a method that has been used for many years to increase the water content of vegetables and fruits from 85-90% to 10-20%, to remove the water present in them and to prolong the shelf life of the vegetables and products. The basic principle of drying is a method used to prevent water in vegetables and fruits from causing chemical and microbial reactions. Another advantage of drying is the benefit in terms of packaging and storage due to the reduced volume of the dried product. In this study, cherry tomatoes were selected with a diameter of 29.1 mm and a length of 28.1 mm. During the experiment, cherry tomatoes were cut into half (1/2) and quarter (1/4), room temperature was set at 24.4°C throughout the experiment and ambient humidity ranged from 46 to 54%. Cherry tomatoes were dried in a heat pump dryer at 35°C, 40°C and 45°C. The drying air velocities are 0.5 m/s, 0.75 m/s and 1.0 m/s. Using the data obtained from the experiments, drying rate/drying time and moisture/drying time curves were modeled. Different drying models were applied in the experiments, and it was determined that the Midilli & Kucuk model was suitable. In addition, the effect of cherry tomato slice

size on drying time and speed was also studied in the experiments. Test results show that 1/4 sized slices of cherry tomatoes dry faster.

The activation energy and diffusion coefficient were calculated using experimental data. The diffusion coefficient was observed to be 2.32×10^{-10} , 3.53×10^{-10} and 3.99×10^{-10} m²/s in 1/4 size slices of cherry tomatoes at temperatures of 35°C, 40°C and 45°C, respectively. Activation energy was found to be 44.39 kJ/mol. When the energy analysis of the system is made, in the drying system with 1/4 slice thickness and 1 m/s air speed, the drying temperature is 45 °C; The drying time was 357 minutes, total compressor energy consumption was 4.212 kWh, total energy consumption was 4.783 kWh, COP_{sys} was 2.715, and the time to reach the desired temperature from 24 °C was 758 seconds, and in the analysis, it was the most advantageous system in terms of energy consumption. Dried samples were evaluated in terms of color changes.

Keywords: Cherry tomato, heat pump dryer, drying, kinetic modelling, colour

1.1 Literatür Özeti

Sebzelerin ve meyvelerin kurutulması işlemi yıllardır yapılan bir koruma ve saklama yöntemidir. Dünyada ilk olarak yapılan kurutma şekillerinden biri olan solar yani güneşte kurutma yeteri kadar sağlıklı ve hijyenik olmadığından dolayı insanlar arasında yetersiz olduğu düşüncesiyle geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda birçok yapay kurutma yöntemi geliştirilmiş ve bunlar her geçen yıl üzerinde çalışmalar yapılarak olabilecek en iyi hale getirilmeye çalışılmıştır. Düşük enerji kullanımı ile yüksek dozajda üretim hedeflenmiş ve bunun üzerine yüksek ısı pompalı kurutucular geliştirilmiştir.

İçerdiği mineral ve besin ögeleri açısından oldukça zengin olan kiraz domates, içerisinde çok fazla miktarda su bulundurur. Kiraz domateslerin asıl üretildiği bölge Güney ve Orta Amerika olmasının yanı sıra, Akdeniz iklim kuşağında rahatça üretilme imkânı bulurlar. Ayrıca, sera domatesi olduklarından dolayı ülkemizin ve dünyanın birçok yerinde de üretildikleri bilinmektedir. Bulundurduğu yüksek su dolayısıyla kurutulması diğer sebzelere kıyasla daha zordur ve geleneksel kurutma yöntemleri ile kurutulması çok uzun zaman alır. Ayrıca bu uzun geçen zaman ve hava teması, içerisinde mineraller ve besin ögelerini kaybetmesinde büyük rol oynar. Ek olarak, en yaygın kurutma yöntemi olan geleneksel kurutma yöntemi hava koşullarından oluşabilecek herhangi beklenmedik olayda verimi ve ürünün kalitesini etkileyeceğinden riskli bir işlemdir. Fakat yapay kurutma yöntemleri arasında geliştirilen kurutma yöntemlerinden biri olan yüksek ısı pompalı kurutma yönteminin kullanılması hem zaman hem de enerji bakımında büyük tasarruf sağladığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, yapılan bu kurutma yöntemlerinden sonra kiraz domatesin içerisinde bulunan önemli bileşenleri de kaybetmemiş ve hatta zenginleştirdiği görülmüştür. Kurutulan bu küçük domateslerin kullanımı, nakliyesi ve raf ömürleri de bu şekilde arttırılmayı hedeflenmiştir. Başka bir deyişle, kurutulan sebze ve meyveler uzun süre muhafaza edilebilir ve her mevsim tüketilebilirken

hem ağırlık hem de hacimleri bakımından küçüldüklerinden dolayı daha az maliyetli ve nakil işlemlerinde kolaylık sağlanmış olur.

Güncel kullanılan teknolojilerden biri olan yüksek ısı pompalı kurutucular hem zamandan kar ettirirken hem de üretimin miktarını arttıırırlar. Buna benzer alternative birden çok kurutma yöntemi bulunurken bu çalışmada yüksek ısı pompalı kurutucular kullanılarak kiraz domatesler kurutulmaya çalışılmış ve maksimum verim alınmaya çalışılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmadaki amaç, kiraz domatesin ısı pompalı kurutucu ile kurutulması sırasında meydana gelen değişimlerin ve davranışların belirlenmesi olup, kurutma işleminin ne derecede başarılı olduğunu renk parametreleri gibi göstergeyle tespit etmektir. Isı pompalı kurutucularda farklı parametreler ile kurutulan kiraz domateslerin kurutulma performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, ısı pompalı kurutucunun kurutma performansına, süresine ve ürünün kurutulduktan sonraki renk kalitesine bakılıp karşılaştırma yapılacaktır. Bunlara ek olarak deneyler sırasında elde edilen ölçümler ile kuruma eğrileri çizilecektir. Ayrıca, farklı kurutma modelleri kullanılarak işlemin matematiksel modellemesi yapılacaktır. Kurutma sıcaklığının kuruma süresine etkisi, dilim kalınlığının kurutmaya etkisi, kurutma hava hızının değişimi, difüzyon katsayılarının hesaplanması, aktivasyon enerjisinin hesaplanması ve sistemin enerji performansı bakımında değerlendirilmesi yapılacaktır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, kiraz domatesler kabukları soyulmadan yarım (1/2) ve çeyrek (1/4) olacak şekilde kesilmişlerdir. Isı pompalı kuruculu sistemde kurutma hava hızları 1, 0.75 ve 0.5 m/s olacak şekilde kurutma işlemleri yapılmıştır. Kiraz domatesler ısı pompalı kurutucuda 35, 40 ve 45°C sıcaklıklarda kurutulmuştur. Kiraz domateslerin çapları 29 ± 1 mm, boyları ise 28 ± 1 mm olacak şekilde seçilmiştir. Deneyler yapılırken ortam sıcaklığı sabit 24.4°C olacak şekilde, aynı zamanda ortam nemi de %46 ile %54 arasında çalışılmıştır. Deneyler aşağıdaki Tablo 1.1’de verilen veriler şeklinde sekiz adet olacak şekilde yapılmıştır.

Tablo 1.1 Deney çalışma verileri

Deney Grupları	Sıcaklık	Kurutma Hava Hızı	Kiraz Domates Boyutu
1. Grup	35°C 40°C 45°C	1 m/s	1/4
2. Grup	40°C	0.5 m/s 0.75 m/s 1 m/s	1/4
3. Grup	45°C	0.5 m/s 0.75 m/s 1 m/s	1/2

Yukarıdaki tabloda verilen deney şartlarıyla ısı pompalı kurutucuda kurutma işlemleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilere göre kurutma eğrileri çizilmiştir. Tabloda verilen sıcaklık değerleri, kurutma hava hızı değerleri ve kiraz domatesin boyutunun kurutma kalitesine ve kurutma sürelerine etkileri gözlemlenmiştir. Matematiksel modelleme çalışmalarında literatürde yer alan farklı matematiksel modelleme yöntemleri kullanılarak en uygun olanı seçilmiş ve uygulanmıştır. Renk analizlerinde ise kurutulmuş olan örneklerden alınan numuneler doğrultusunda ve taze kiraz domateslerden alınan numuneler ile kıyaslanıp, kaliteleri orjinaline en uygun olana göre uygun sıcaklık, kurutma hava hızı, kiraz domateslerin boyutu ve kurutma sıcaklık değeri tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda enerji analizleri de yapılmıştır.

2.1 Kurutma İşlemi

Kurutma işlemi, temel anlamda kontrolsüz koşullar ve kontrollü koşullar olacak şekilde gerçekleşir. Kontrollü olarak yapılan veya kontrolsüz olarak yapılan kurutma işlemi ürünün kalite değerlerini direk olarak etkiler. Aynı zamanda kurutma, tarım ürünlerinin bozulmasını önlemek için bilinen ve kullanılan en geleneksel yöntemdir. Yapılan kurutma ile gıdanın içerisindeki su aktivitesi değerlerinde azalma meydana gelir. Bu, yiyeceklerin bozulmasını yavaşlatır. Kurutma işlemi sayesinde yiyecekler uzun süre saklanabilir. Kurutma işlemi birçok basamaktan oluşan özel bir yöntemdir. Kurutma, ön kurutma, kurutma ve yapılan işlem sonrası analizleri içerir. Ön kurutma işlemi, ürün hazırlama, ön işlem ve nem içeriğinin belirlenmesini içerir. Kurutma sonrası analiz, ürün rengi, dokusu, büzülme, gözeneklilik, tat, su aktivitesi, rehidrasyon, raf ömrü, besin değerleri gibi verileri içerir. Yapılan bir kurutma çalışmasının verimli olduğunun anlaşılması için tüm bunların detaylı ve iyi şekilde tamamlanması gerekir (Gürel vd., 2016). Kuruluk, biyoaktif bileşenlerin biyoerişilebilirliklerini etkileyen faktörlerden biridir. Isı, ışık ve oksijene duyarlı fotokimyasallar kurutma sırasında bozulur, ancak ısı işlem, işlenmiş meyve ve sebzelerde biyoaktif bileşenler üzerinde farklı etkilere sahip olabilir. "Biyoerişilebilirlik" terimi, bir besinin besin matrisinden ayrılabilen ve bağırsakta emilebilen potansiyel oranını veya yüzdesini ifade eder. Genellikle gıda bileşenlerinin gastrointestinal davranışını incelemek için kullanılır. Sindirimin etkilerini incelemek için insan klinik deneyleri mevcuttur, ancak in vitro gastrointestinal sindirim modelleri daha hızlı, daha ucuz, daha pratik ve etik kısıtlamalardan muaf olma avantajlarına sahiptir (Karabacak vd.,2022). Aşağıdaki Şekil 2.1'de kurutulmuş muz ve çilek örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kurutulmuş meyve örnekleri

Kurutma işlemi sırasında ısı ve kütle transferi aynı anda gözlenir. İşlem sırasında ısı kuru gazdan katıya aktarılır. Ürünün performans ve mukavemet özelliklerini olumsuz yönde etkilediği için bu süreçte son kuruluğun çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle koşulların optimize edilmesi ve kontrollü bir şekilde çalıştırılması önemlidir. Kurutucu seçmek de en az kurutma işlemi kadar önemli bir adımdır. Kurutma teknolojisi daha yanıtıcı, karmaşık ve çeşitli hale geldikçe, kurutucu kullanma bilgisine veya deneyimine sahip olan ekipler için bile kurutucu seçmek giderek zorlaşmıştır. Bunun yanı sıra piyasada hangi tip kurutucuların bulunduğu, seçim sürecinde önemli noktaların neler olduğunun ve ek olarak satıcı firmaya gitmeden önce (rekabetçi bir kota oluşturabilmek için) sisteme alternatif olabilecek donanımların farkında olunması bir kurutma sistemini tasarlayabilmek için fazlasıyla uygun olacaktır. Bu konu için özen gösterilmesi gereken nokta olarak farklı kurutucu tiplerinin veya sistemlerinin yapılan uygulamalar için teknik veya ekonomik olarak aynı derecede uygun olabilir. Kullanılan kurutucunun çalışma prensiplerinde yapılan olası değişiklikler oluşan ürünün kalitesini etkileyebilir (Güngör, 2013).

2.2 Meyveler ve Sebzeler

Taze meyve ve sebzeler, yüksek nem içeriği nedeniyle çabuk bozulan gıdalardan biridir, bu nedenle taze meyve ve sebzelerin muhafaza edilmesi zordur. Kurutma, meyve ve sebzelerde mikroorganizmaların gelişmesini ve çoğalmasını önlemek, neme bağlı reaksiyonları etkisizleştirmek ve raf ömürlerini uzatmak için kullanılan en yaygın muhafaza yöntemidir. Her mevsim yetişen ürünlerin bulunmaması, dışarıdaki meyve ve sebzelerin pahalı olması ve geleneksel türk kültüründeki kuru ürünlerin özel kullanımları gibi birçok neden meyve ve sebzelere kurutmaya olan ilgiyi artırmaktadır. Ayrıca kurutma işlemi, aplikelerin

ağırlık ve hacminde azalma ve paketlenme, işleme, nakliye ve depolama maliyetlerinin en aza indirilmesi gibi avantajlar sunar (Bulut, 2021).

Kurutulan meyvelerin içeriğindeki besin öğeleri, lif ve diğer yapı taşlarında bulunan karmaşık karbonhidratlar sayesinde alternatif sağlıklı atıştırmalıklar olarak düşünülmektedirler. Geleneksel kurutma yöntemleri kullanılarak biyoaktif bileşenlerde meydana gelen kayıplara rağmen kurutulmuş meyveler antioksidan aktivite ve fenolik bileşenler bakımında değerli kaynaklar olarak düşünülmektedirler. Ayrıca, kurutulmuş meyve ve sebzeler taze meyve ve sebzelere göre yoğun besin içerikleri, yüksek lif içerikleri, fenolik bileşen ve antioksidanlarca zengin olmaları ile dikkat çekmektedirler. Bahsedilen fenolik içerik ve antioksidan kapasite değerleri ile kurutulmuş meyve ve sebzelerin günlük diyetle daha fazla yer tutması sağlıklı beslenme açısından önemlidir (Filiz ve Seydim, 2014).

2.3 Kurutma Yöntemleri

Endüstriyel bir işlem olan kurutma sistemleri gıda sanayisinde ve farklı benzer sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle belli parametrelerden dolayı meyve ve sebzelerin daha uzun süre saklanabilmesi ve her mevsim kullanılabilmesi veya daha kolay taşınabilmesi gibi sebeplerden dolayı kurutma yapılması çok kez tercih edilir. Bu kurutma işlemleri sonunda birçok artının yanı sıra en önemli olan artısı ise daha yoğun besin değerlerine sahip ürünler elde edilmektedir. Geleneksel yöntemlerle kurutma yapılması belli minerallerin, vitaminlerin ve maddelerin zarar görmesine neden olurken, farklı bileşenlerin farklı sistemler kullanılarak yüksek korunumları sağlanabilmektedir (Li vd., 2022). Bu kurutma yöntemlerine birçok örnek verilebilir. Örneğin, solar kurutucular, hava üfleli kurutucular, vakum kurutucular, mikrodalgalı kurutucular (Wojdylo vd., 2019), dondurarak kurutma yapan sistemler ve bazılarının birlikte kullanımlarını tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır (Erbay ve Küçüköner, 2008). Aynı zamanda tüm bu kurutma yöntemleri endüstriyel anlamda da yüksek kalite sağlamaktadır. Gıdanın güvenli bir şekilde muhafaza edilebilmesi çok önemlidir. Eğer ürüne uygun muhafaza metodu ve koruma seçilmezse ürün kalite parametrelerinde ve aynı zamanda besin değerlerinde problemlere neden olabilirler. Bunlardan sebep ürünün özelliklerine,

yapısına uygun olacak kurutma metodunun seçilmesi fazlaca önem arz etmektedir. (Kamiloğlu ve Capanoğlu, 2015).

Kurutma işlemleri genel olarak doğal kurutma ve yapay kurutma olarak ikiye ayrılır. Güneşin ısısından faydalanarak ürünün içerisindeki su miktarının azaltılmasını sağlayan en temel işleme doğal kurutma yöntemi olarak adlandırılır. Doğal kurutma geleneksel bir yöntemdir ve birçok dezavantajı vardır. Bunlara örnek olarak, ürün açıkta olduğundan sağlık bilgisi açısından yetersizdir, kurutmak için fazla alana ihtiyaç duyulur, mayalanma oranı düşük olduğundan dolayı yüksek kaliteli ürünler için uygun değildir, kurutma süresi çok uzundur, su miktarı genellikle tamamen düşürülemez, her ürün için uygun değildir ve son olarak her bölgede kurutma veya her mevsimde kurutma olmaz. Aşağıdaki Şekil 2.2’de güneşte kurutulan ürünler gösterilmiştir.



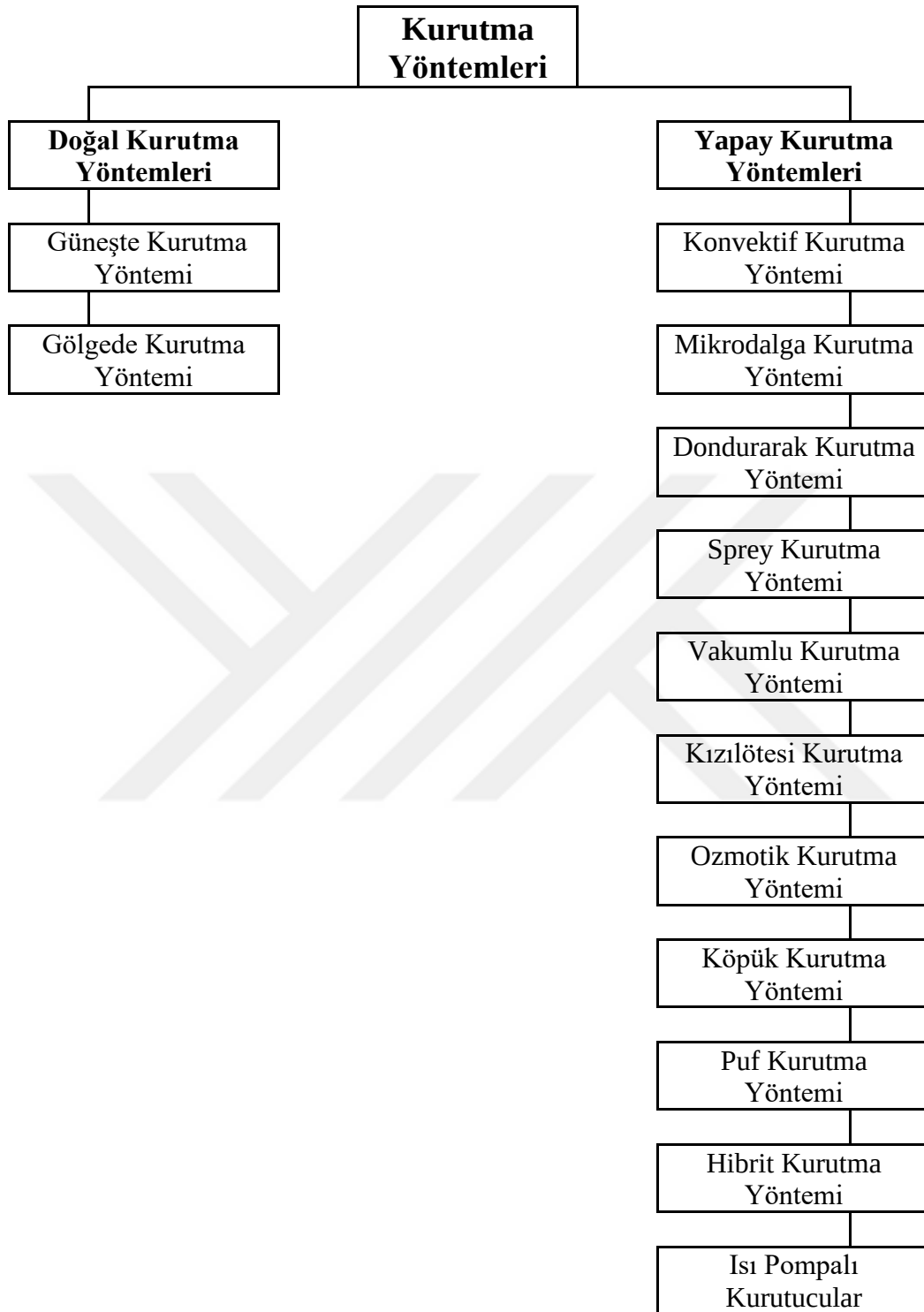
Şekil 2.2 Güneşle kurutma yöntemi örnekleri

En bilinen doğal kurutma yöntemleri havayla (gölgede) ve güneş kurutma metodu olarak ikiye incelenir. Havayla kurutma, güneşte kurutmanın en yaygın yöntemidir, ancak başta kirlilik olmak üzere birçok sorunla ilişkilidir. Güneş ısını her yerde kullanarak kurutmanın her zaman mümkün olmaması, ürünün haşere gibi dış etkilere maruz kalması ve kurutma sırasında hafif mayalanma riskinin olması fırınlı kurutma sistemlerinin uzun süreli güneşte kurutmaya tercih edilmesinin nedenlerinden bazılarıdır. Zaman alıcı bir yöntem olması daha hızlı, daha sağlıklı ve daha homojen farklı endüstriyel ölçekli kurutma yöntemlerinin

geliştirilmesini sağlamıştır. Son zamanlarda geliştirilen güneş enerjisi kurutucuları mevcut eksiklikleri gidermiş ve enerji verimliliğini iyileştirmiştir. Bu sistemlerde elektrik enerjisi yerine direkt güneş enerjisi kullanılmaktadır. Ürünün doğrudan güneş enerjisine maruz kalması yerine, ürünün etrafında dolaşan hava güneş enerjisi ile ısıtılır veya ısıtma için kullanılan su buharlaştırılır. Doğrudan güneş kurutucuları ucuzdur ve üretimi kolaydır. Ancak bu sistemlerde sıcaklık kontrolü neredeyse imkansızdır. Dolaylı güneşte (indirect solar) kurutma pahalı ve kullanımı zor bir sistemdir, ancak sıcaklık kontrolü mümkündür (Erbay ve Küçüköner, 2008). Böyle bir sistem, ürünün gelecekte renk değiştirmemesi için UV ışınlarını filtreleyebilir. Ayrıca dolaylı güneş enerjisi sistemleri erken hasat, hasat planlaması, uzun süre bozulmadan depolama, hasattan sonraki aylarda daha yüksek fiyatlar ve daha kaliteli ürün gibi avantajlar sunmaktadır. Hava püskürtmeli kurutma sisteminin tasarımı basittir, yerel kaynaklarla üretilebilir, düşük bakım ve çalıştırma maliyetleri vardır ve mevsimsel olarak kurutulabilir (Erbay ve Küçüköner, 2008). Bunlar, bu tip kurutma sisteminin avantajlarıdır. Ayrıca güneşte kurutmaya kıyasla daha hızlı, daha düzgün ve daha sağlıklı bir kurutmayı garanti eder. Çok sayıda çalışma, kurutma işleminde havanın hızının, numunenin sıcaklığı ve numunenin kalınlığının, hava kurutucuların kurutma parametrelerini ve kurutma hızlarını etkileyen parametreler olduğunu ispatlamıştır (Garcia vd., 2013). Kabin tipinde olan kurutma ekipmaları parçalanmış ürünleri ve taneli ürünleri kurutmak için kullanılır (Erbay ve Küçüköner, 2008). Bu tip kurutucular, ürüne bağlı olarak sabit hava hızına sahiptir ve bu da ürünün kuruma süresini kısaltır.

Yapay kurutma ise kurutma işleminin izole şekilde sürdürüldüğü ve kolaylıkla kontrol edilebildiği kurutma işlemidir. Bu işleme aynı zamanda dehidrasyon da denilir. Gıda maddelerinin içindeki nemin, belirli koşullarda ve kontrollü olarak gıda maddesinden uzaklaştırılmasına dehidrasyon denir. Bu şekilde kurutma işlemi kabaca ikiye ayrılabilir: 'konvektif kurutma' ve 'temas kurutma'. Bu gruplamalardan biri, kurutulmakta olan malzemeden suyu uzaklaştırmak için gereken ısıyı transfer edilme yöntemine dayanmaktadır. Bu nedenle, bu konuda temel olarak üç farklı kurutma işlemi vardır: 'konvektif kurutma', 'temas kurutma' ve 'ışıklı kurutma'.

Tablo 2.1 Tarımsal ürünlerin kurutma yöntemleri



Yüksek ısılı pompalı kurutucular da yapay kurutmalar arasında bulunur ve bu kurutma yöntemi kurutma alanında büyük enerji tasarrufu sağlar. (Jia vd., 1990).

Yukarıda kısaca kurutma yöntemlerinin ikiye ayrıldığı ve bunların neler olduğuna değinilmiştir. Ayrıca bazı örnekler verilerek kurutma yöntemleri açıklanmaya çalışılmıştır. Yukarıdaki Tablo 2.1’de yöntemler detaylı şekilde gösterilmiştir.

Tarımsal ürünlerin kurutma yöntemleri aşağıda kısa kısa bahsedilmiştir:

Güneşte kurutma yöntemi, ürünlerin açık havada kurutulması işlemidir. Bu yöntemin en büyük avantajı enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaması ve maliyetinin az olmasıdır. Bu yöntemin dezavantajlarına gelecek olursak, kurutulmaya bırakılan ürünler hava koşullarından etkilenir, kurutma süresi uzundur, çeşitli kirleticilere maruz kalırlar ve kurutmak için geniş alanlara ihtiyaç vardır. (Srinivasa Reddy, 2020).

Gölgede kurutma yöntemi, bu yöntem genellikle aromatik tıbbi bitkilerin ve baharatların kurutulmasında tercih edilir. En önemli avantajı kurutma işlemi sonlanıncaya kadar ek enerji ihtiyacının minimum olmasıdır. Dezavantajları ise kurutma süresi uzundur, bununla birlikte besinlerin içinde besin değerlerinin kaybolmasıdır. Mikrobiyolojik bozulmalar sık görülebilmektedir ve ürünlerde bakteriler çoğalabilir. Günümüzde bu iki yönteme rağbet azalmıştır ve daha yenilikçi yöntemlere yönelinmiştir.

Konvektif kurutma yöntemi, güneşte kurutmaya alternatif olarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Kullanımda kolaylık ve yatırım maliyetinin yüksek olmaması kaynaklı uzun yıllardır kullanılmaktadır. Konvektif kurutma yönteminin temel prensibi kurutucunun içerisine alınan havanın belli bir seviyeye kadar ısıtılıp bir fan tarafından kurutucunun içinde dolaştırılması temelini ifade eder. Bu işlemde belli bir düzeye kadar ısıtılan hava kurutma işlemi yapılacak ürünlerin dışından başlayıp yavaş bir şekilde içine doğru yayılarak dış kısımdan iç kısma doğru bir kuruma bir kuruma işlemi gözlemlenir (Çetin, 2019). Konvektif kurutma yönteminde kendi içerisinde belli dezavantajları vardır. Bunlar; kuruma süresinin uzamasına paralel olarak enerji tüketiminde artış, ürünlerde rehidrasyon kapasitesinin azalması, materyallerin fiziksel ve biyokimyasal özelliklerinde ciddi kayıpların meydana gelmesine sebep olmasıdır.

Mikrodalga kurutma yöntemi, genel temel yapıları fırın boşluğu, magnetron, havalandırma sistemi ve dalga yayıcı bir güç kaynağından meydana gelmektedir (Çetin, 2021). Kurutucu içerisinde olan magnetron kurutma işlemi uygulanacak

ürünlerin içerisindeki su moleküllerine belli frekanslarda titreşim göndermektedir. Titreşim hareketlerinden oluşan hareket enerjisini farklı bir enerji türü olan ısı enerjisine çevirerek ürünlerde merkezinden başlayarak dışına doğru ısınmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı ürünler kendi iç enerjisi ile içten dışa doğru kurumaktadır. Kurutma süresi çok kısa sürede sonlandığı için enerji sarfiyatının azalması ve kurutma materyalinde kalite parametrelerin optimum seviyede korunması aynı zamanda kurutma yapılacak alanı önceden ısıtma yapılmaması en büyük avantajdır. En büyük dezavantajı kurulum maliyeti çok yüksektir.

Dondurarak kurutma yöntemi, kullanılan bu kurutma yönteminde üründe bulunan yüksek miktardaki nem düşük basınç ile süblimasyon yöntemiyle uzaklaştırılır. Bu işlem üç adımda gerçekleşir; dondurma aşaması, birincil kurutma aşaması ve ikincil kurutma aşaması şeklindedir. Kurutma yapılacak ürün öncelikle dondurulur daha sonrasında buz oluşumları görülür. Görülen buzlar süblimleştirilerek su buharı şeklini almaktadır. Su buharı ise basit bir vakum pompası ile çekilerek sistemden dışarı atılır (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2003). Bu yöntemin avantajlarından daha çok bir dezavantajı bulunmaktadır, bu dezavantaj enerji maliyetinin fazla olmasıdır. Burada enerji sarfiyatı çok yüksektir.

Püskürterek kurutma yöntemi, sıvı olan, yarı sıvı alan veya ince pulp halinde olan maddelerin kurutulması işleminde kullanılır. Yöntem basit olarak kurutma hücresi, sıcak hava üretim düzeni, ürünü kurutma hücresine püskürten bir atomizer, siklon seperetör ve ürün toplama kabından oluşur. Püskürterek kurutma metodunda akışkan olan ürünlerin, içerisinde sıcak hava bulunan kurutucu hücresine püskürtülmesiyle sıcak havanın etkisiyle kurutulacak olan numunelerin fazla olan suyunun buharlaştırılmasına dayanmaktadır. İşlem sonucunda ortaya çıkan ürünler toz şeklindedir. Çok geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır bu yöntemin ve basit bir örnek verecek olursak süt tozu üretiminde sıkça kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te sprey kurutucuya örnek bir sistem verilmiştir.



Şekil 2.3 Püskürtmeli kurutucu [1]

Vakumlu kurutma yöntemi, yöntemde ısıya karşı dayanıklılığı olmayan ürünleri kurutmak için kullanılır. Ürünlerde bulunan fazla suyun alınması vakum ortamında meydana gelmekte olup, vakum pompası ile vakum hücresinde bulunan hava çekilerek basınçlı vakum ortamı meydana getirilir. Meydana gelen ürünler ısı iletim tekniklerinden bir yöntem ile ısıtılarak bünyesinde fazla bulunan suyun uzaklaştırılması sağlanır. Buharlaştırılan su, vakum hücresi yoluyla ortamdan uzaklaştırılır (Alibaş, 2011).

Kızılötesi kurutma yöntemi, kurutulacak olan ürünün üzerine yansıyan kızılötesi ışınlarının ısı enerjisine dönüştürülmesiyle fazla miktardaki suyun uzaklaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Bu ışınlar kurutulacak olan ürünlerin içine nüfuz etmezler. En uygun kurutulacak ürün ince tabakalı ürünlerdir. Bu sistemin birçok avantajı bulunduğu için sistem günümüzde artarak rehavet görmektedir. Bu yöntemde en büyük dezavantajı ise maliyetinin yükek olmasıdır (Nozad vd., 2016).

Ozmotik kurutma yöntemi, bütün haldeki ya da dilimlenmiş olan meyve ve sebzelerin hipertonic şekilde olan çözelti içerisinde belli bir süre bekletilmesi ile ürün içerisinde bulunan fazla suyun ortamdan uzaklaştırılması şeklindedir. Bu yöntem kullanılarak ürünlerdeki nem miktarı %26-51 nem seviyesine indirilebildiğinden, araştırmalarda bu kurutma yöntemi genellikle kurutma öncesinde yapılan ön işlem olarak kullanıma uyarlanmıştır (Uğuz ve Gezici, 2021).

Köpük kurutma yöntemi, bu yöntem püre, sıvı ve katı şeklindeki ürünlerin kurutulmasında tercih edilmektedir (Çınar ve Erafşar, 2018).

Puf kurutma yöntemi, bu yöntemde ilk adımda doymuş buhar ya da yüksek basınç altında yüksek sıcaklıkların tesiri altında kurutulacak olan ürünün dokusu yumuşatılması sağlanır. Sonraki aşamada vakum ile fazla su ürün içerisinden hızlıca uzaklaştırılır. Bundan dolayı yüksek sıcaklık altında ani basınç düşmesi prensibine dayanan bir metoddur. Bu yöntemin avantajları maliyeti azdır, ürünlerin tat, koku, renk, besin ve görüntüsünü iyi düzeyde koruması avantajlarıdır. Son dönemde bu yöntem yaygınlaşmaya başlamıştır (Köprüalan vd., 2019).

Elektrohidrodinamik kurutma yöntemi, günümüzde modern bir yöntem olan kurutma yöntemi olarak karşımıza gelmektedir. Yöntem ısıya karşı dayanımı olmayan maddelerin kurutulması işleminde kullanılmaktadır. Elektrohidrodinamik kurutma yönteminde yüksek AC ya da DC gerilimi altında yatay ince bir telden ya da keskin bir elektro iletken iğneden kaynaklanan elektrik boşalması meydana gelmektedir. Daha sonra deşarj elektrodunu terk eden iyonlar metalik ve elektriksel olarak topraklanmış elektrot üzerinde yer alan kurutma materyallerinin yüzeyine çarpılmaktadır. Yarı iyonize gaz molekülleri ile artık yüklü olmayan moleküller, toplama elektrodu ile deşarj elektrodu arasında çok hızlı bir gaz akışı oluşturarak ürünlerden fazla nemin uzaklaşmasını sağlamaktadır. Günümüzde yaygın bir teknoloji değildir (Yang ve Ding, 2016).

Hibrit kurutma yöntemi, diğer mevcutta olan kurutma yöntemlerinin tek başına kullanılmasının sonucunda meydana gelen olumsuz durumların ortadan kaldırılması adına geliştirilmiştir. Yakın süreç içerisinde bu yöntemin kullanımı artmaya başlamıştır (Xu vd., 2018)

Diğer bir yöntem olan ısı pompalı kurutucularda kurutma yöntemi aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.4 Isı Pompalı Kurutucular

Doğada kendiliğinden kuruma süreci uzun zamandır insanlığın ilgisini çekmektedir. Kurutma yöntemleri, gıdaları uzun süre muhafaza etmek için uzun bir süre boyunca geliştirilmiştir. Başlangıçta kurutma işlemi, sözde açık hava sergisi olan doğal kurutma şeklinde yapılıyordu, ancak daha sonra mekanize

edilerek kurutma işlemi daha hızlı ve sağlıklı hale getirildi. Optimum kurutma yönteminin seçilmesi enerji tüketimi ve ekonomi açısından çok önemlidir. Gıdaları kurutmanın amaçları çoktur, ancak en önemlisi ürünün uzun süreli depolama sırasında bozulmasını önlemektir (Gürel vd., 2010). Şekil 2.4'te ısı pompalı kurutucu örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Isı pompalı kurutucu örneği (Çapar ve Gökbulut, 2013)

Son yıllarda ısı pompalı kurutucuların kurutma işleminde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığı iyi bilinmektedir. Isı pompaları burada hala rahatlık için kullanılmaktadır ve gelişmiş dünyanın kurutma da dahil olmak üzere birçok sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı pompalarının endüstriyel sektörde özellikle ürün kurutmada önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığı bilinmektedir. Isı pompalı kurutucular, çalışma şekline, ısı pompası kademe sayısına, kurutma kademesi sayısına, ürün sıcaklığına, ilave ısı girdisine ve ısı pompalı kurutucunun çalışma şekline göre farklı şekilde sınıflandırılır.

Konvansiyonel kurutucularda, kurutucudan çıkan nemli hava atmosfere salınır, bu nedenle nemli havanın içerdiği gizli buharlaşma ısı ve duyulur ısı kullanılamaz. Bu enerji, bir ısı pompalı kurutucu kullanılarak geri kazanılabilir. Kurutucu çıkışındaki nemli hava evaporatörden geçer ve burada hissedilir ve gizli ısı açığa çıkar. Bu sırada havadaki nem evaporatörün soğuk serpantin yüzeylerinde yoğunlaşarak daha düşük seviyelere ulaşır. Evaporatörden çıkarılan ısı, kurutucuya girmeden önce havayı ısıtmak için devridaim sıvısı tarafından kondensere taşınır

(Hawladar vd., 2003). Termodinamiğin ikinci yasası, ısı pompalarının temel çalışma prensibini açıklar. Bir ısı pompası, soğuk bir ısı kaynağından toplanan ısıyı sıcak bir ısı kaynağına aktarmak için yardımcı bir enerji kaynağına (bir kompresör tarafından tüketilen güç gibi) ihtiyaç duyar. Bu durumda, ısı pompası çalışması zorunlu ısı transferi olarak yorumlanabilir.

Isı pompalı kurutucuların birçok avantajı vardır. Isı pompalı kurutucuların en büyük avantajı, artan enerji verimliliğidir (Chua vd., 2002). İyileştirilmiş ısı geri kazanımı yoluyla daha yüksek enerji verimliliği, çekilen su birimi başına daha az enerji tüketimi ile sonuçlanır. Bunlar, sıcaklık, nem ve hava akışı değerlerinin tam ve bağımsız kontrolünü sağlar. Sürekli kontrollü kurutma koşulları, ısıya duyarlı malzemeler için avantajlıdır, ancak önemli ölçüde daha yüksek kaliteli ürünler verir. Kuru ortamın kontrol edilmesi, yüksek değerli ürünler için etkilidir, ancak düşük değerli ürünler için güç tüketimini azaltır. Kurutma işlemi sonunda aynı kalitede ürün elde etmiş olursunuz. Isı pompasının belirlenmesi yapılırken binanın tasarımı, mimarisinin özellikleri aynı zamanda yerleşim bölgesinin koşulları dikkate alınarak kararlar alınır. Isı pompası tipi, ısıtma ve soğutma yükü, çıkış sıcaklığı ve ısı dağıtım sisteminin davranışı belirlenerek seçilir. Dört farklı ısı pompası tipi vardır. Bunlar; havadan havaya, havadan suya, sudan havaya ve sudan suya ısı pompalarıdır. Bir ısı pompası tipi seçerken dikkate alınması gereken bazı temel prensipler vardır. Bu temel ilkelerden bazıları şöyle sıralanabilir; performans katsayısı (COP) ve ısı pompasının enerji verimlilik oranı (EVO) belli orandan aşağıya düşmemelidir. Isı değiştiricilerde maksimum yük kayıpları maksimum ton soğutma kapasitesi için belli değeri geçmemelidir.

Isı pompalı ısıtıcılar için kimyasal seçimi de önemli rol oynar. Son on yılda, CFC'ler (kloroflorokarbonlar) ve HCFC'ler (hidrokloroflorokarbonlar), mükemmel termodinamik ve kimyasal özelliklerinden dolayı soğutma, ısı pompalı kurutma ve iklimlendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Park ve Jang, 2009). Molina ve Rowland (1974)'te CFC'lerin kullanımının stratosferik ozon tabakasının incelmeye yol açacağını belirtmişler ve o zamandan beri bu durumu araştırmak için çeşitli çalışmalar yürütmüşlerdir. Sonuç olarak, 1987 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Programı ozon tabakasını incelten maddelerin üretimini ve tüketimini düzenlemiş ve birçok ülke ozon tabakasının incelmelerinin küresel bir çevre sorunu olduğunu kabul ederek Montreal Protokolü'nü imzalamıştır. Bu

uluslararası anlaşma, gelişmekte olan ülkelerde CFC'lerin kullanımına ek bir on yıl daha izin verdi, ancak gelişmiş ülkelerde Ocak 1996'da tamamen aşamalı olarak kaldırıldı. CFC'deki boşluğu doldurmak için soğutma, iklimlendirme ve gıda endüstrileri, alternatif saf soğutucu akışkanlar bulmak için kapsamlı araştırma ve geliştirmeler yapmıştır.

2.4.1 Isı pompalı kurutucuların kurutma işlemlerinde kullanılması

Isı pompası teknolojisinden yararlanamayan ve bu uygulamaları çalıştırmak için büyük miktarlarda enerji tüketen bazı ısıtma ve soğutma sistemleri vardır. Ortam havasından, yeraltı suyundan, toprağın kendisinden ve ticari uygulamalardan geri kazanılan serbest veya atık ısıyı istenmeyen ısı olarak kabul etme ve reddetme yeteneğidir. Konut ve ticari alanlarda ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılır, ofis, ev, sıcak su ve her türlü konut tesisatında konfor sağlar. Kurutma uygulamaları için en yaygın ısı kaynakları olarak hava, toprak ve kimyasal kaynaklı ısı pompalarını örnek verebiliriz. Bunların arasında ise hava kaynaklı ısı pompaları, kurutma uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan çeşididir.

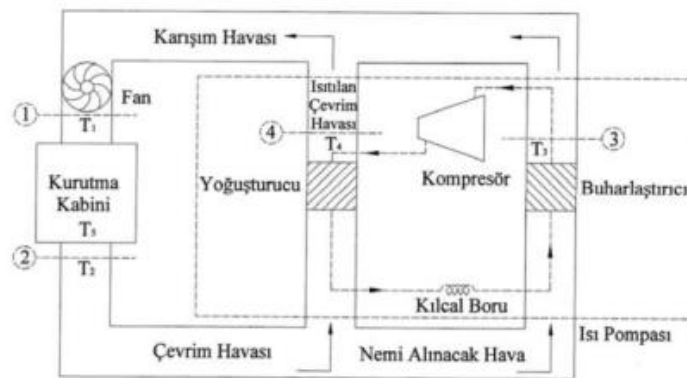
Isı pompası performansı değerlendirilirken verimlilik yerine ısı pompası verimlilik faktörü (COP) kullanılarak belirlenir. İstenen ısıtma etkisinin, ısı pompasının verimlilik faktörünü elde etmek için gereken işe oranı olarak ifade edilir. Bir ısı pompasının teorik maksimum verimi, Carnot verimliliği ile verilir. COP Carnot değerine ulaşmak fiziksel olarak imkânsızdır. Ancak bu değer, soğutma sisteminin ideal bir sistemden ne kadar uzak olduğunun bir ölçüsü olarak hizmet eder. Uygulamada, ısı pompalarının gerçek verimliliği tipik olarak Carnot verimliliğinin %40 ile %50'sidir (Kuş, 2011).

Kurutucudan çıkan ürünün kalitesi kullanılan sistem tipine de bağlıdır. Kurutulacak ürünün beklenen fiziksel özellikleri, ürünün ne sıcaklıkta kurutulması gerektiğini ve ısı transferinin nasıl olması gerektiğini belirler. Ayrıca, üründe aşırı kuruma istenmediğinden, kurutulan ürünün nihai nem içeriği ürün kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Sistem geliştirme, fosil enerji üretimi ve kurutma uygulama sistemi sayesinde ısı pompası sistemlerinin COP'sinin iyileştirilmesi çok önemlidir, ancak spesifik nem alma kapasitesinin ve kurutma koşullarının bilinmesi yeterli değildir. Güç kaynaklarının geliştirilmesinde sistemden tasarruf,

Isı pompalı kurutucularda kurutma işlemi sırasında düşük enerji tüketimine sahip olmasına rağmen, kalite özellikleri diğer kurutma çalışmalarına göre daha düşük sonuçlara neden olmuş ve farklı kurutucularda yapılan çalışmalardan aynı ürün üzerinde yapılan duyu analizlerde panelistler tarafından özellikle tercih edilmemiştir (Baysal vd., 2015).

Kurutma sistemlerinin verimliliğini belirlemek için belirli nem alma oranları ve belirli enerji tüketim kriterleri kullanılmaktadır. Bu kriterler sırasıyla özgül nemin alınma hızı, nem alma hızı, özgül enerjinin tüketiminin enerji maliyetlerinin incelenmesi, yıllık işletme maliyeti ve enerji tüketimi şeklinde sıralanabilir (Butz vd., 2003). Bu kriterlere en uygun olan kurutucu, kullanıcı için en performanslı kurutucu olup en fazla verim alabileceği kurutucudur.

Isı pompalı kurutucularının ekipmanları sırasıyla şunlardır; buharlaştırıcı, kompresör, dahili kondenser, harici kondenser, dahili kondenser fan, harici kondenser fan ve geneleşme valfi. Yukarıda bahsedilen ekipmanlarla kurulu bir ısı pompalı kurutucu aşağıdaki verilen şekilde gösterilmiştir.



Buharlaştırıcının yüksek ısı pompalı kurutucularda kullanılmasının önemi büyüktür. Geleneksel kurutucular, kurutucudan gelen nemli havayı atmosfere bırakırlar ve bu nemli havada bulunan gizli ısıdan yararlanılamaz. Bu ısı, yüksek

pompalı kurutucular kullanarak geri sisteme kazandırılabilir. Kurutucu çıkışındaki nemli hava ve gizli ısısın geri sisteme verileceği bir buharlaştırıcıdan geçirilerek havanın içindeki nem, buharlaştırıcının soğuk serpantin yüzeylerinde yoğunlaşır ve daha düşük sıcaklıklara ulaşır. Bu sayede buharlaştırıcı kullanarak olası enerji kayıplarını daha minimize etmiş oluruz.

Isı pompalı kurutucunun içerisinde kullanılan kompresörler, soğutucu akışkan filtreleri ve ısı değiştiriciler gibi elemanları kurutucuyu optimum çalışma şartlarında tutabilmek için kullanılırlar. Kompresörlere düzenli bakım yapılarak sistemin verimliliği artırılabilir ve bu sayede ürünler maksimum verimlilikte olurlar.

Güneş damıtıcılı kondenserler üç tipe ayrılabilir; yerleşik kondenserler, harici kondenserler ve dahili kondenserler. Kondensörlü farklı solar damıtıcıların basit bir karşılaştırması şu şeklide yapılır; Konum, günlük verim, iyileştirme (yalnızca geleneksel güneş enerjili damıtıcılardan daha yüksek üretkenlik artışı), verimlilik ve deneydeki gözlemlere göre karşılaştırılır. Dahili kondenser, her biri 1.2 m uzunluğunda (sekiz geçişli) 10 mm çapında bakır borulardan yapılmıştır. Yoğuşma suyu kalitesi analiz edildi, su kalitesi standartları ile yağmur suyu ve maden suyuna karşı karşılaştırılabilir olduğu bulundu. Duvar yüzeyinde artan soğutma, yoğuşma işleminin artmasına neden olur. Harici ve dahili kondenserler birlikte bir bütün oluşturular.

2.4.4 Isı pompalı kurutucu sistem örnekleri ve avantajları

Isı pompalı kurutmanın birçok avantajı vardır. Son zamanlarda ısı pompalı kurutma tekniği gıda endüstrisi için yeni çalışmalarda görev aldı ve insanlara tanıtıldı. Bu gelişmeden sonra insanlar çeşitli meyve ve sebzelerini bu şekilde kurutulmuş alıp muhafaza etmeyi daha akıllıca buldular. Isı pompaları, aktivasyon için kullanılan enerji türüne bağlı olarak iş veya ısı kaynaklı olarak sınıflandırılabilir. En yaygın ısı pompaları, iş odaklı tipteki sıkıştırımlı ısı pompalarıdır.

Farklı enerji kaynakları ısı pompalı kurutucular için kullanılabilir. Bundan dolayı, ısı pompalı kurutucular kendi içinde hava kaynaklı, toprak kaynaklı ve kimyasal ısı pompası kurutucu sistemleri olarak ayrıldı. Hava kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemlerinde ısı kaynağı hava iken, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma

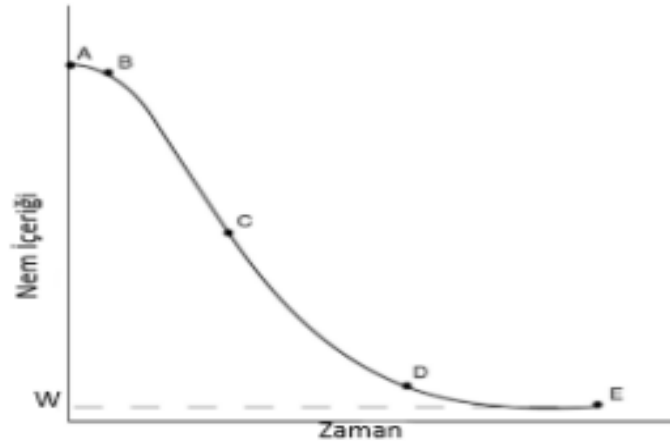
sistemlerinde enerji kaynağı, bir ısı eşanjörü kullanılarak zeminden çekilen ısıdır. Bu nedenle hava ve su antifriz solüsyonu, hava kaynaklı ve toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucular için aynı anda ısı sirkülasyonu ortamıdır. Kimyasal ısı pompalı kurutma tekniklerinde enerji kaynağı, endotermik bir reaksiyon yoluyla salınan depolanmış kimyasal enerjidir (Çolak ve Hepbaşlı, 2009). Hava kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemleri ve toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemleri iş odaklı iken, kimyasal ısı pompalı kurutma sistemlerinde tahrik enerjisi ısıdır.

Geleneksel ve ısı pompalı kurutma işlemlerinde enerji verimliliğini tahmin etmek için kullanılan temel parametreler ele alındığında, kurutucuları/kurutma sistemlerini değerlendirmek için enerji verimliliği, termal verimlilik, özgül enerji tüketimi, hacimsel buharlaşma oranı, yüzey ısı kayıpları ve birim ısı tüketimi gibi farklı performans endeksleri kullanılır.

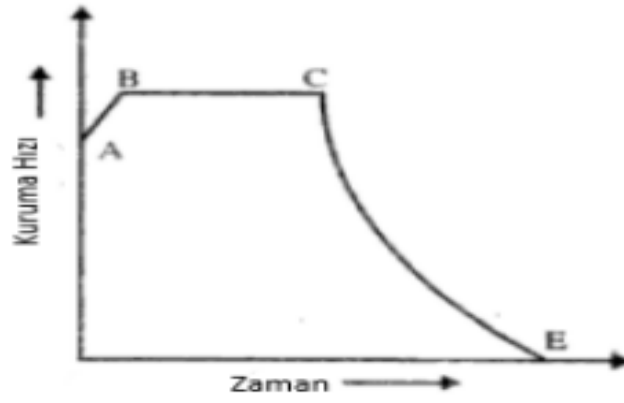
Optimal ısı pompalı kurutma sistemleri farklı tasarım birleşmeleri ve ürün olarak birçok farklı tipe ayrılır. Bunlar; hibrit sistemler, kademeli sistemler, çok kademeli çevrimler ve soğutucu akışkan türleri olarak dörde ayrılır. Çok kademeli kompresör çevrimi, aynı ısı pompası çevriminde iki veya daha fazla sıkıştırma kademesine sahiptir. Kademeli ısı pompalı kurutma sistemleri, yüksek ve düşük basınçlı prosesler için farklı soğutucu akışkanlar kullanır. Isı pompalı kurutucular, kurutma odasına enerji girişi olarak güneş, ultrason, kızılötesi veya geleneksel enerji kaynakları gibi hibrit kaynakları içerir. Ayrıca ısı pompası, verimliliği artırmak için vakum ve püskürtmeli kurutucuları birleştirir. Bu ısı pompalı kurutma sistemlerinin her ikisi de hibrit ısı pompalı kurutma sistemleri olarak kabul edilir. Soğutucu akışkan tipi, ısı pompalı kurutma sisteminin verimini etkiler.

2.5 Kuruma Hızı Eğrileri

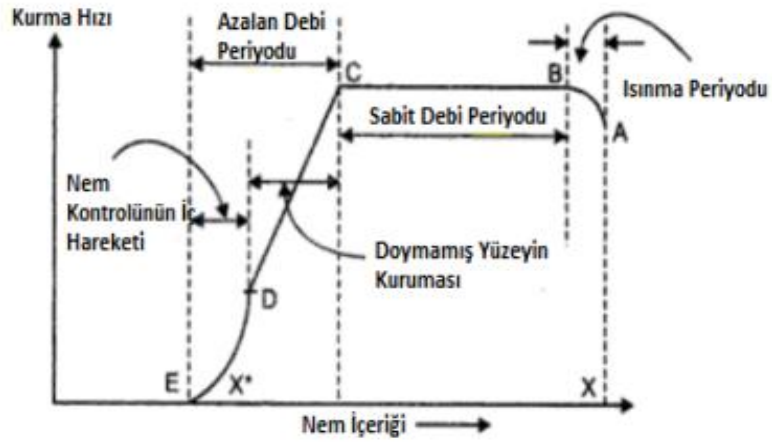
Kurutulacak olan gıda ürünlerinin zaman, nem içeriği ve kuruma hızı arasında belli bir ilişki vardır. Buna ek olarak kuruma zamanı ile kuruma hızı arasında da bir bağlantı bulunmaktadır. Bu bağlantılar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’te kuruma hızının diğer parametrelerle arasındaki ilişkiler verilmiştir.



Şekil 2.6 Nem içeriği ve zaman arasındaki ilişki [2]



Şekil 2.7 Kuruma hızı ve zaman arasındaki ilişki [2]



Şekil 2.8 Nem içeriği-kuruma hızı arasındaki ilişki [2]

A-B aralığı: Bu alanda, ısınma periyodu boyunca kurutucu havanın sıcaklığıyla kurutulacak maddenin sıcaklığının aynı seviyeye geldiği aralıktır.

B-C aralığı: B noktasından C noktasına x apsisine paralel ve düz bir şekilde uzanan çizgi, kuruma hızının sabit olduğunu gösterir. Katı maddenin yüzeyinden su buharlaşır ve buharlaşan su sabittir. Yüzey suyu doymuştur ve B noktası ve C noktası arasında kuruma hızı sabittir. Sıcaklık, yüzey alanı ve yüzeyle ortam havası arasındaki nem içeriği bu bölgeyi etkileyen etkenlerdir. Bundan sebep kütle transferi ve ısı transferi etkilenir.

C noktası: Buradan sonra suyun içten dışarı yer değiştirmesi, buharlaşmadan daha yavaştır. Bundan sebep katı maddenin üzerinde bazı alanlarda kuruma gelmeye başlar, yüzeyde sıcaklık artmaya başlar. Doymuş bölgeler olduğu için kurumanın hızı düşer. Bundan sonra sabit debi periyodu biter ve azalan debi aşamasına başlanır.

C-E aralığı: C noktası ve E noktası arası azalan debi periyodu olarak bilinir. C-D aralığı, ilk azalan debi periyodu ve D-E aralığı, ikinci azalan debi periyodundan oluşur.

C-D aralığı: Bu alan doymamış yüzeyde oluşan kurumayı temsil eder.

D noktası: Buradan sonra katı maddenin yüzeyi tamamen kurumuş olur aynı zamanda nemin iç momenti yüzey üstüne gelmeye başlar. E noktasına kadar devam eder; devam ettiği yer dengenin sağlanmasına kadardır.

D-E aralığı: Bu nokta kuruma hızının sonlandığı alandır. Burası ikinci azalan hız periyodudur ve burada bölge katının içindeki nemin hareketi sonucu kontrol edilir. Alan içerisinde kütle transferi ve ısı transferi çok daha karmaşık haldedir aynı zamanda uzun hale gelmiştir. Böylece kurutma sonlanır.

2.6 Kurutmayı Etkileyen Faktörler

Kurutmayı etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan en önemli olanları ve parametre olarak gösterilenler hava hızı, havanın sıcaklığı, havanın nemi, basınç ve gıda maddesinin alanıdır. Bu faktörler kurutulan ürünün son ürün halindeki kalitesinde etkiler. Bu faktörler bu bölümde incelenecektir.

2.6.1 Havanın sıcaklığı

Kurutma oranında en kritik faktörlerden biridir. Havanın sıcaklığı artarsa buharlaşma oranı artar. Yüksek sıcaklıkta suyun buharlaşma kapasitesi daha yüksektir. Bu etkinin diğer bir etkisinde kurutma zamanına önemli şekilde etki etmesidir. Sıcaklığı artıkça kurutma zamanında kısalma gerçekleşir.

2.6.2 Havanın hızı

Kurutma prosesinde hava hızındaki artış, buharlaşma oranının artmasına sebep olur. Buradaki artış ancak hava hızının belli noktaya gelmesine kadar gözlenir. Hızı artırmak kurutma süresinin azalmasına sebep olur.

2.6.3 Havanın nemi

Bu faktör kuruma süresinin belirlenmesinde önemli bir faktördür ama hava sıcaklığı kadar etkin bir faktör değildir. Hava içerisinde nem yüksek ise; kurutma süresinin uzamasına ve kurutma oranının düşmesine sebep olur.

2.6.4 Yüzey alanı

Kurutulması yapılacak olan ürünün yüzeyinin alanı kurutma verimliliği ile kurutma zamanı açısından önemlidir. Yüzey alanı artarsa kurutma zamanı düşer.

3.1 Domatesle İlgili Genel Bilgiler

Domatesin ana vatanı Meksika ve Perudur, aynı zamanda domates Solanaceae ailesinin bir üyesidir. Ülkemiz de 1900'lü yılların başından beridir yetiştirilmektedir. Bu ürünün tüm yaş sebze üretiminin %13'lük kısmına sahiptir. Dünyada toplam 88.6 milyon tonluk üretim yapılmaktadır. 2022 yılı itibari ile Çin 32.5 milyon üretimle ilk sırada, yaklaşık 9.9 milyon tonluk üretimiyle Hindistan ikinci sıradadır. Türkiye ise yaklaşık olarak 6.2 milyon tonluk üretimi ile bu iki ülkeyi takip etmektedir [3]. Domates taze tüketimi dışında ketçap, salça, domates suyu, domates püresi, soyulmuş, dilimlenmiş ve yakın zamanlarda kurutulmuş şeklinde kullanılmaktadır. Domates yapı olarak %94-95 arasında su oranına sahiptir ve geriye kalan kısım ise farklı maddelerden oluşur (Sönmez ve Ellialtıoğlu, 2014).

Domates içerisinde kuru bileşen olarak en fazla glikoz ve fruktozdur. Sitrik asit ise en fazla bulunan organik asittir, buna ek olarak domates içerisinde belli miktarda malik asit bulunmaktadır.

Domates ürünleri içerisinde mineral madde bakımından zengin bir üründür. Aşağıdaki Tablo 3.1'de domatesin çeşitine göre mineral madde miktarları verilmiştir. Tablo 3.2'de domatesin çeşitlerine göre vitamin içerikleri verilmiştir.

Tablo 3.1 Yenilebilir 100 g domates ve domates ürünlerinin mineral madde bakımından verileri (Gölükçü vd., 2015)

Mineral (mg)	Kiraz	Sofralık	D. Suyu	D. Kuru	Konserve	Salça	Ketçap
K	228	205	238	3418	208	261	282
P	28	26	-	315	-	-	25
Ca	12	11	10	142	21	27	16
Mg	12	13	10	178	11	13	12
Na	4	5	-	2125	-	-	908
Fe	0.31	0.35	0.08	6.42	0.54	1.50	0.36
Zn	0.18	0.18	0.11	1.93	0.02	0.02	0.15

Bu ürün yani domates belirli vitaminler bakımından önemli besin kaynağı olarak bilinir.

Tablo 3.2 Yenilebilir 100 g domates ve domates ürünlerinin farklı vitamin değerleri (Gölükçü vd., 2015)

Vitamin (mg)	Kiraz	Sofralık	D. Suyu	D. Kuru	Konserve	Salça	Ketçap
C	23.9	18.9	69.8	38.9	9.1	21.8	4.2
A	62	52	22	43	12	75	25
Niasin	0.623	0.61	0.65	9.04	1.23	3.07	1.42
Riboflavin	0.029	0.024	0.09	0.42	0.04	0.14	0.16
Tiamin	0.024	0.031	0.12	0.54	0.06	0.05	0.02
Folat	13	12,9	19	67	12	11	8
K1 (µg)	3.6	3.1	2.4	42	5.1	11.3	3.1

3.1.1 Kiraz domates hakkında bilgiler ve kurutulması

Dünyanın dört bir yanında 9000'den fazla domates çeşidi yetişmektedir. Bu domates türlerinden birisi kiraz domates türleridir. Kiraz domatesler yuvarlak, tek lokmada yiyebileceğimiz ve sulu formda olan bir domates çeşididir. Kiraz domatesleri ekim işleminden hasat işlemine kadar 7 ile 10 hafta arası bir zamanda büyürler. Çimlenmesi için tohumlarının en az 21 °C toprak sıcaklığına ihtiyaçları vardır. Bu koşullar sağlandığında kiraz domatesler kolaylıkla yetiştirilebilir (Gümüşsay vd., 2015). Aşağıda Şekil 3.1'de kiraz domates örneği verilmiştir.



Şekil 3.1 Kiraz domates örneği

Kiraz domateslerin ana vatanı Güney ve Orta Amerika'dır. Bu domatesler, Akdeniz iklim kuşağında rahatça yetiştirme imkânı bulurlar ve bu yüzden Akdeniz ülkelerinin mutfağında da önemli bir konuma sahiptir. Ülkemizde ise Akdeniz bölgesinde serada kiraz domates yetiştiriciliği sıklıkla yapılır ve ülke genelinde de yaygın bir tüketime sahiptir. Aynı zamanda kiraz domateslere kiraz domatesler de dendiği bilinmektedir. Serada üretildikleri için ülkemizin her yerinde yetişen domates türüdür fakat özellikle Ege, Akdeniz ve Marmara bölgelerinde çok fazla üretilmektedir. Dünya çapında domates üretiminde ilk sırada Çin bulunmaktadır. Ülkemiz dünya genelinde domates üretiminde üçüncü sırada bulunmaktadır.

Kiraz domatesler, dallardan sarkan minik kırmızı meyvelerle büyük salkım salkımları gibi görünür. Minyatür meyveler sadece 10–30 gram ağırlığındadır. Bu domates türü 1973 yılında İsraili yetiştiriciler tarafından yaratılmışlardır ve başlangıçta çeşitli Akdeniz yemeklerinin yenilebilir dekoratif dekorasyonu için tasarlanmıştır. Kiraz domatesleri melez domates sınıfına aittirler, şu anda dünyada

yüzlerce türü bulunmaktadır. 1.5 ile 3 kg arasında hasar ettikleri yüksek verimli çeşitleri vardır. Sıradan domateslere göre bu minyatür domatesler iki kat daha fazla besin ve diğer eser elementler (bakır, manganez, flor, iyot, çinko, demir) içerir (Zong vd., 2010). Ayrıca, kiraz domatesler karbonhidrat miktarları bakımından ve ağırlık-kalori içeriği bakımından çok düşük oldukları için diyet ürünleri olarak sınıflandırılır. Ek olarak, kiraz domatesinin meyveleri beta-karoten içerir ve bu doğal bir gençlik ve uzun ömür iksiridir (Yılmaz, 2001).

Kurutulmuş domatesler, salatalarda, çorbalarda, yemek ve soslarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılacak olan kurutma için kullanılan kurutma yöntemi, ürün kalitesi için de çok önemlidir. Örneklerinin nem miktarları %91 iken yüksek tepsili kurutma sayesinde bu oran %5'lere kadar düşebilir. Verilere baktığımızda, 60-100 derece sıcaklık aralıklarında bir domates yaklaşık olarak 480-1200 dakika arasında değişen sürelerde kurur (Guo vd., 2014). Şekil 3.2'de kurutulmuş kiraz domates örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Kurutulmuş kiraz domates örneği

Sebze ve meyveler (özellikle domatesler) genellikle güneşte kurutma işlemi kullanılarak kurutulur. Ancak zamanla gelişen yaşam koşullarına ve modern yaşama uyum sağlaması açısından modern kurutma yöntemleri büyük önem taşımaktadır. Kurutulmuş sebzeler, hazır çorbalar, soslar, hazır yemekler, bebek mamaları, çeşitli etler, balıklar ve süt ürünleri gibi çok çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Önceki araştırmalarda, kurutma proseslerini tasarlamak, geniş alanlı kurutma sağlamak ve kurutmayı iyileştirmek için bazı denklemler kullanılabilir. (Doymaz ve Pala, 2002).

Su içeriği yüksek olan gıdalarda ise kurutma işlemi sırasında suyu uzaklaştırmak oldukça kolaydır. Bu dönemdeki yüksek ortam sıcaklığı aynı oranda yüksek kuruma hızıyla sonuçlansa da, su içeriği azaldıkça gıdadan su uzaklaştırmak zordur. Kurutmanın son aşamasında, su içeriği azaltıldığında, sıcaklık artırılırken kurutma işleminde kullanılan havanın bağıl nemi düşürülmelidir. Meyve ve sebzelerin başlangıçtaki yüksek nem içeriği nedeniyle, kurutma sırasında tutarlı bir kurutma hızı beklenmelidir. Ancak birçok çalışma, meyve ve sebzeleri kuruttuğunuzda kurutma süresinin yalnızca azaldığını bulmuştur. Bunun nedeninin, numunenin kuruma yüzeyinin büzülmesi ve numunenin kuruma sırasında numunenin büzülmesinden dolayı kuruyan numunenin boyutunun değişmesi nedeniyle birim zamanda numuneden daha az nem buharlaşması olmasından kaynaklanmaktadır (Pabis, 1999).

İçerdiği yoğun su ve mineraller bakımından kiraz domatesleri kurutmak için en iyi yöntemlerden biri de yüksek ısı pompalı kurutuculardır. Bu kurutucular sayesinde bu küçük domatesler yüzey alanları daha küçük olduğundan ve çok su içerdiklerinden dolayı daha kolay bir şekilde kurutma işlemlerini tamamlayabilirler. Ayrıca, yüksek ısı pompalı kurutucu tiplerinin özelliği olan yüksek enerji verimliliği sayesinde de diğer kurutucu tiplerinden çok daha az enerji kullanarak daha fazla kurutma işlemi tekrarlanabilir. Bu sayede erişilmesi daha kolay ve daha az maliyetli olmuş olur.

3.2 Domates Kurutmayla İlgili Yapılan Literatür Çalışmaları

Kıpçak ile Doymaz (2020) yaptıkları çalışmada hem mikrodalga hem de kızılötesi yöntemler kullanarak kiraz domateslerin kurutma özelliklerini incelemiştir. Mikrodalga kurutma işlemi kısa bir ısıtma periyodundan sonra sabit ve azalan hız periyotlarında meydana gelmiştir. Buna karşılık kızılötesi kurutma işleminde ise ısıtma ve azalan hız periyotlar gözlemlenmiştir. Kuruma süreleri hem mikrodalga hem de kızılötesi güç seviyelerinin artmasıyla azalmıştır. İncelenen yedi farklı ince tabakalı kurutma modeli arasında Weibull, Aghbashlo vd. modeller, sırasıyla mikrodalga ve kızılötesi çalışmalar için deneysel verilere en iyi şekilde uyarlanmıştır. Mikrodalgalı çalışmalarda 90, 180, 270 ve 360 W sistemlerde çalışmalar yapılmış ve kurutma süreleri sırasıyla 68, 34, 12 ve 7 dakika olarak tespit edilmiş. Kızılötesi ile yapılan çalışmalarda 74, 88 ve 104 W sistemlerde

çalışılmış ve kurutma süreleri sırasıyla 510, 390 ve 330 dakika olarak görülmüş. Difüzyon katsayıları mikrodalgalı ve kızılötesi kurutma için sırasıyla 5.46×10^{-8} ile $4.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında, 7.33×10^{-9} ile $8.24 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığındadır. Aktivasyon enerjileri mikrodalga ve kızılötesi sistem için sırasıyla 9.46 kW/kg, 0.31 kW/kg'dır. Kiraz domateslerin farklı mikrodalga güç seviyelerinde enerji tüketimleri hesaplanmış ve mikrodalga kurutma çalışmaları için 90, 180, 270 ve 360 W'ta sırasıyla 0.1035, 0.1020, 0.0540 ve 0.0420 kWh bulunmuştur. Buna karşılık kızılötesi kurutucuda 104, 88 ve 74 W güç seviyelerinde kurutulan örneklerin enerji tüketimleri sırasıyla 0.5720, 0.5720 ve 0.6290 kWh olarak hesaplanmıştır.

Nabnean ve arkadaşları (2016) yaptığı çalışmada ozmotik olarak kurutulan kiraz domateslerin kurutulmasını, yeni tasarlanmış hibrit solar kurutucuda gerçekleştirmiştir. Kurutma havası sıcaklığı, kurutma sırasında 30°C ile 65°C arasında değiştirilmiştir. Kurutma işleminde 100 kg domates kurutulmuş ve kurutma süresi 4 gün sürmüştür. Ayrıca, ozmotik olarak kurutulmuş kiraz domatesler böceklerden, tozdan ve yağmurdan tamamen korunmuştur ve ozmotik olarak kurutulmuş kiraz domateslerin iyi kalitede olduğu gözlemlenmiştir. Kurutucunun maliyetinin kazanılması süresi 1.36 yıl olarak fikir yürütülmüştür. Bu kurutucu potansiyel olarak Tayland ve diğer tropikal ülkelerde yüksek kaliteli kurutulmuş ürünler üretmek için diğer meyveleri kurutmak için kullanılabileceğini söylemiştir.

Bennamoun vd. (2015) yaptığı çalışmada görüntüleme teknikleri ve analiz kullanılarak, tek bir kiraz domatesin konvektif kurutulması sırasında hacimdeki değişimi yeterince takip etmek mümkün olmuştur. Büzülmenin formülasyonu, incelenen maddenin nem içeriğinin azalmasıyla birlikte boyutsuz hacmin doğrusal olarak azaldığını göstermiştir. Hava sıcaklığının kuruma eğrileri üzerindeki etkisi açıkça belirlendi, çünkü sıcaklığın artması kuruma süresinde bir azalmaya ve çalışılan her iki durum için nem difüzyon katsayısında bir artışa neden olmuştur. Bunlar soyulmuş ve soyulmamış domatesler olarak ikiye ayrılmıştır. Soyulmamış domates için kuruma süresi, soyulmuş domatese göre çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yaptığı çalışmalarda soyulmuş ve soyulmamış kiraz domateslerin farklı sıcaklıklarda difüzyon kat sayılarını incelemiştir. Soyulmamış domateslerde sırasıyla şu katsayıları elde etmiştir; 50°C için $8.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 60°C

için 9.16×10^{-12} m²/s ve 70°C için 5.16×10^{-11} m²/s olarak elde etmiştir. Soyulmuş domateslerde ise 50°C için 1.17×10^{-10} m²/s, 60°C için 1.53×10^{-10} m²/s ve 70°C için 2.53×10^{-10} m²/s olarak elde etmiştir.

Yüce (2019), sıcak havalı bir kabin kurutucu ile kurutmanın domates dilimleri için; sistemde ön işlemin ve hava sıcaklığının kurutma işleminin süresine olan etkisi, kurutma süresinin değiştirilmesi ile kurutma hızının, kurutma sisteminin modellenmesi, yapılan çalışmada difüzyon katsayılarının aynı zamanda aktivasyon çıkışının elde edemediği, ürünlerin renk analizlerinin ve rehidrasyonun elde edilmesinden elde edilen sonuçlar elde edilmiştir. Kızılötesi kurutucu sisteminde yapılan domates dilimlerinin kurutulması için; Kaynak kurutmanın sağladığı kurutma süresinin yaptığı etki, aktivasyon enerjisinin ve difüzyon katsayılarının ulaştığı, renk analizlerinin ve rehidrasyonun tahmin edilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Diğer bir kurutucu olan havalı tip kabin kurutucu sisteminde yapılan çalışmalar 75, 65, 55 ve 45°C’de olacak şekilde sabit olan hava hızı periyodunda (2 ± 0.1 m/s) ve çözelti ön işleme tutularak kurutulmuştur. 65°C’de yapılan çalışmada domateslerin ebatlarının kurutma süresine olan etkileri gözlemlenmiş ve domatesler burada tam, 1/2 ve 1/4 ebatlarında kurutulmuş aynı zamanda kuruma süreleri sırasıyla 800 dakika ve üzeri, 210 dakika ve 585 dakikadır. Matematiksel modellemede Midilli & Kucuk ve Logaritmik model bu işlemler için uygun görülmüştür. Havalı kabin kurutucuda difüzyon katsayıları 7.034×10^{-10} ile 3.271×10^{-9} m²/s aralığında bulunmuş. Bu kurutma tipinde aktivasyon enerjileri NaHSO₃, K₂CO₃ ve kontrol numunleri için sırasıyla 38.17 , 33.3 ve 36.41 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu çalışm içerisinde kızılötesi sistemle ilgili yapılan çalışma 62, 74, 88 ve 104 W gücüyle yapılmış olup kurutma süreleri sırasıyla 225 dakika, 210 dakika, 180 dakika ve 150 dakika olarak gerçekleşmiş. Difüzyon katsayıları 2.93×10^{-9} ile 5.1×10^{-9} m²/s aralığında bulunmuş. Bu kurutma tipinde aktivasyon enerjisi 1.328 kW/kg olarak bulunduğu ifade edilmiştir.

Sarıgök vd. (2019), açık alanda kurutulması yapılan kiraz domates numuneleri ortalama olarak 233.9 saatte belirlenen nem oranına ulaştığı görülürken sera ortamında yapılan çalışmalarda 196.9 saatte belirlenen nem oranına ulaştığı görülmüştür. Üç farklı olan sıcaklık 50-60-70°C değerlerinde kurutulan numuneler, labaratuvar tipinde olan kurutucunun diğer kurutma yöntemleri ile kurutma süreleri ve renk değerlerinin parametreleri yönünden daha uygun olduğu

görülmüştür. Renk değerleri açısından 50°C 'de yapılan kurutmanın kalitesinin daha iyi olduğunu gözlemlemiştir. Labaratuar tipinde olan kurutucu ile yapılan çalışmalara yönelik modelleme analizlerinde Wang-Sing modelinin dışında tüm modellemelerin kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan modelleme analizlerinde en doğru sonucu Midilli & Kucukk ve Yağcıoğlu, difüzyon modellerinin vermiş olduğu görülmüştür.

Alfeo vd. (2021) yaptıkları çalışmalarda, kiraz domateslerin güneşte kurutma ve konvektif fırında kurutmasını karşılaştırmışlardır. Kurutma işlemi sırasında domateslerin kimyasal parametrelerindeki ve temel kurutma parametrelerindeki değişimler kaydetmişlerdir. Kurutma eğrileri birkaç matematiksel modele uyarlanmış ve kurutma sırasındaki hava sıcaklığının etkileri, daha önce bildirilen modellerle karşılaştırılarak çoklu regresyon analizleriyle değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda, brix değerlerinin kuruma süresi boyunca artması numuneleri duysal açıdan daha lezzetli hale getirmiş ancak askorbik asit içeriğinde önemli bir azalmaya neden olmuştur. En önemlisi likopen olan karotenoidlerin içeriği, kurutulmuşta daha fazla ekstrakte edilebilirliğe sahip olduğunu gözlemlemiştir. Numunelerin duysal değerlendirmesi, iyi bir seviyeleme ortaya çıkarmıştır. İçinde özellikle polifenol ve askorbik asit içeriği, tüketiciler tarafından tipik olarak kabul edilen, güneşte kurutulmuş ürünlerle karşılaştırılabildiği gözlemlenmiştir. Duyusal profile gelince, test edilen tüm tedaviler kabul edilebilir durumda olup, bir dolap kurutucusunda sağlanabilecek hijyenik koşullar ve en iyisi güneşte kurutulmuş ürünlere kıyasla besin değerleri kurutucuların kullanımını teşvik ettiği görülmüştür.

Coşkun vd. (2016), domates dilimleri farklı olan üç kurutma havası sıcaklık değerlerinde (45, 40 ve 35°C) aynı zamanda 1 m/s kurutma hava hızında kapalı devre HPD kullanılarak kurutulmuştur. Domates dilimlerinin kuruma özelliklerini açıklamak için on adet ince tabakalı kurutma modeli uygulanmıştır. Her sıcaklıktaki domates dilimlerinin kuruması azalan hız periyodunda meydana gelmiş; sabit debi kuruma periyodu gözlenlenmiştir. Kurutma hızı, kurutma sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Kurutma sıcaklığının artmasıyla kuruma süresi azalmıştır. Domates dilimlerinin kuruması her sıcaklıkta azalan hız periyodunda meydana gelmiş; sabit oranlı kuruma periyodu gözlenmemiştir. Difüzyon katsayısı 8.28×10^{-11} ile 1.41×10^{-10} m²/s arasında

değişmiş, aktivasyon enerjisi 43.12 kJ/mol olarak bulunmuştur. Ayrıca kurutma işlemi sonunda HPD sisteminin en yüksek ortalama özgül nem çıkarma oranı ve performans katsayısı, en yüksek kurutma havası sıcaklığında (45 °C) sırasıyla 0.324 kg/kWh ve 2.71 olarak elde edilmiştir.

Atalay (2019) yaptığı çalışmada, iki farklı kurutma teknolojisinin eksergo ekonomik analizi yapmıştır. Ekserji verimliliği, maliyet performansları ve eksergoekonomik faktör değerleri dikkate alınarak her iki sistemin bileşenleri ayrı ayrı ele almıştır. Böylece hem solar kurutucu hem de ısı pompalı kurutucu bileşenlerinin maliyetlere katkısı detaylı bir şekilde incelenmiş ve sistemlerin iyileştirilmesine yönelik öneriler sunmuştur. Bu çalışmanın temel amacı, iki farklı kurutma sisteminin enerji tüketim performanslarını ve maliyetlerini karşılaştırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan analizlerde her iki sistemin bileşenleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Sistemlerin performansını belirlemek için yapılan deneylerde 4 mm kalınlığındaki domates dilimleri kurutulmuştur. Her iki sistem de eksergoekonomik analiz açısından incelendiğinde, güneş enerjili kurutucuda en düşük eksergoekonomik faktör değerinin 0.514, ısı pompalı kurutucuda ise en düşük değerin 0.045 olduğu görülmüştür. Güneş kurutucusunda ekserji yıkımının toplam maliyeti 0.4595 \$/h olarak belirlenirken, ısı pompalı kurutucuda bu maliyet 5.32 \$/saat olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre güneş enerjili kurutucunun ısı pompalı kurutucuya göre ekserji yok etme maliyeti ve eksergoekonomik faktör açısından daha verimli bir teknoloji olduğu görülmüştür.

Sacilik ve ark. (2006), ince tabaka halinde kesilmiş organik domatesi güneşli tünel kurutucu ve güneş altında kurutmuşlardır. Elle hasadı yapılan iyi renkte, sağlam ve olgun domateslerin örnekleri denemeye kadar dondurucuda depolanmıştır. 2 saat boyunca 24°C’de bekletilen düzgün dağılmış örnekler, önce yıkayıp daha sonra da iki parçaya bölerek 10 dakika süreyle %10’luk tuz çözeltisine daldırılmıştır. Örnekler, 70°C’de 24 saat boyunca vakumlu olan fırın içerisinde tutularak ilk nem içeriklerini belirlenmeye çalışılmış ve ortalama nem içeriği yaşa göre %93.35 olarak tespit edilmiştir. Güneş altında yaptıkları kurutma işlemin de nem içeriği 5 gün içerisinde %93.34’ten %11.49’a azalırken, güneşli olan tünel kurutucu içerisinde 4 gün içinde benzer nem değeri görülmüştür. Hava şartlarına bağlı kalınarak, güneşli tünel kurutucuların güneş altında yapılan kurutma işlemine oranla %26.9 oranında kurutma süresini daha kısalttığı ve burada elde

edilen örneklerin daha parlak ve daha kırmızı renkte oldukları gözlemlenmiştir. 10 farklı matematiksel modelden yararlanılarak kurutma eğrileri oluşturulmuştur ve en uygun modellemenin difüzyon modeli olduğunu belirlenmiştir.

Khazaei vd. (2008), dilim kalınlığının ve hava sıcaklığının domatesin kalitesi ve kurutma kinetikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kabin tipi sıcak havalı kurutucularda gerçekleştirilen denemelerde 3, 5, 7, 9 ve 11 mm dilim kalınlığındaki domatesler ve 60, 80, 100 ve 120°C kurutma sıcaklıkları kullanılmıştır. Domateslerin ilk nem içeriği olan %94.39'dan %14.49 nem içeriğine ulaşana kadar kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma zamanları 2.59-18.69 saat aralığında içerisinde değişmiştir. Domates dilimlerini ince olmasının ve sıcaklığın artırılmasının kurutma süresini kısalttığı görülmüştür.

Kutlu ile İşçi (2016) yaptıkları bir çalışmada, kiraz domatesler yarım parçaya bölüp kurutmuştur. Kurutma işlemi, tepsili kurutucu sisteminde 80, 70 ve 60°C'de kurutma havasının hızı değiştirilmeden 2 m/s olacak şekilde çalışma yapılmıştır. Bir mikrodalga tipi kurutucuda, önce olaral tepsili bir kurutucuyla 80°C ile sabit 2 m/s kurutma hava hızında nem oranı %64.99'a gelene kadar ön kurutma işlemine tutmuşlardır. Başlangıçta nem miktarı %90.99 olan domatesler, tepsili kurutucu yöntemi ile nem miktarı %6'a kadar indirilmiştir. Kurumanın sabit hız ile olduğu gözlemlenmiş aynı zamanda sıcaklık artışı ie kurutma hızının olumlu olarak etkilemiştir. Numuneler 80, 70 ve 60°C'de ve 600, 660 ve 1050 dakika olacak şekilde kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma sıcaklığını 60°C sıcaklıktan 80°C sıcaklığa çıkartıldığında kuruma süresi yaklaşık %36.9 olarak azalırken; 70°C sıcaklıktan 80°C sıcaklığa çıkartıldığında süre yaklaşık %9 oranında azaldığı görülmüştür. Bu nedenle domatesleri kurutma sıcaklığını 70°C sıcaklıktan dahada fazla arttırılmasının süreyi aşırı derecede etkilemediği için tasarruf olmayacağını söylenmiştir. Mikrodalgalı kurutucu sistemi ile kurutma işlemi sırasında başlangıçta yaklaşık olarak nem miktarı %63 iken kurutma sırasından sonra nem oranı %12.9 olduğu ölçümlenmiştir. Mikrodalgalı sistemde kurutulan domatesler, tepsili sistem ile kurutulan numunelere göre yaklaşık olarak 10 kat oranında daha hızlı kuruduğu gözlemlenmiştir. Mikrodalgada kurutulan domateslerin renklerin kalitesinin tepsili kurutucuda kurutulan domateslere göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. 60°C'de olduğu görülmüştür.

Maqsood vd. (2015), olgun ve taze domatesler ilk olarak uzunlamasına 2 eşit parçaya; daha sonra da her yarımı 1 cm kalığında olacak şekilde kesilmiştir. Domatesler üzerinde 2 farklı yöntem uygulanmıştır. Güneşte kurutma yönteminde dilimler paslanmaz alan çelik alana yerleştirilmiş aynı zamanda direk olarak güneş ışınlarının olduğu yere konulmuştur. Güneş kurutucusunun içinde tel örgülere domates dilimleri yerleştirilmiş ve güneş kurutucusu açık hava altına koyulmuştur. Güneş kurutucusunun dış ve iç sıcaklığı 24 saat boyunca kesintisi olarak takip edilmiştir. Başta tartılan domates dilimleri ağırlıkları sabit hale gelene kadarda tartılmıştır. Güneşte kurutulan domates dilimlerinin daha hızlı oranda nemini kaybettiğini gözlemlenmiştir. C vitamini ve likopen açısından iki yöntem arasında da kayda değer fark tespit edilmemiştir. Güneş kurutucuda kurutulan domateslerin güneşte kurutulan domateslere göre daha koyu olduğu gözlemlenmiştir.

4.1 Materyal

Deneylerde kullanılan kiraz domatesler günlük olarak Yalova’da bir süpermarket mağazasından temin edilmiştir. Örnekler kurutma deneyleri yapılınca kadar +4°C’de buzdolabında tutulmuştur.

Deneyler için tahmin edilen kiraz domateslerin benzer olmaları için şekillerine, ebatlarına, yumuşaklıklarına, renklerine ve olgunluklarına dikkat edilmiştir. Deneylerden önce kiraz domatesler düzgün şekilde yıkanmış ve ebatları kumpas yardımıyla ölçülüp not edilmiştir. Kiraz domatesler ortam sıcaklığında muhafaza edilmiş ve tutulmuştur.

Deneylerden önce uygun ebatlardaki kiraz domatesler seçilip, yarım (1/2) ve çeyrek (1/4) ebatlarında dilimlenmiştir. Dilimlenen kiraz domatesler tepsiye homojen şekilde ısı pompalı kurutucuda kurutulmak için dizilmiştir. Şekilde 4.1’de tepsi üzerine dizilmiş domates dilimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Deneyler sırasında tepsiye dizilmiş domates dilimleri

4.2 Kullanılan Ekipmanlar

Deneylerde kullanılmak için tasarlanan kurutma sistemi, fan, kanal sistemi, ısı pompası ve içerisinde 45 cm uzunluğunda ve 42 cm genişliğine sahip delikli kurutma tepsilerinin bulunduğu 0.6 × 0.6 m² kurutma odasına sahiptir. Sistemden

ısı kaybı olmaması için kabine ısı yalıtımı uygulanmıştır. Aşağıda Şekil 4.2’de ve Şekil 4.3’te deneylerin yapıldığı kurutma sistemi gösterilmiştir.



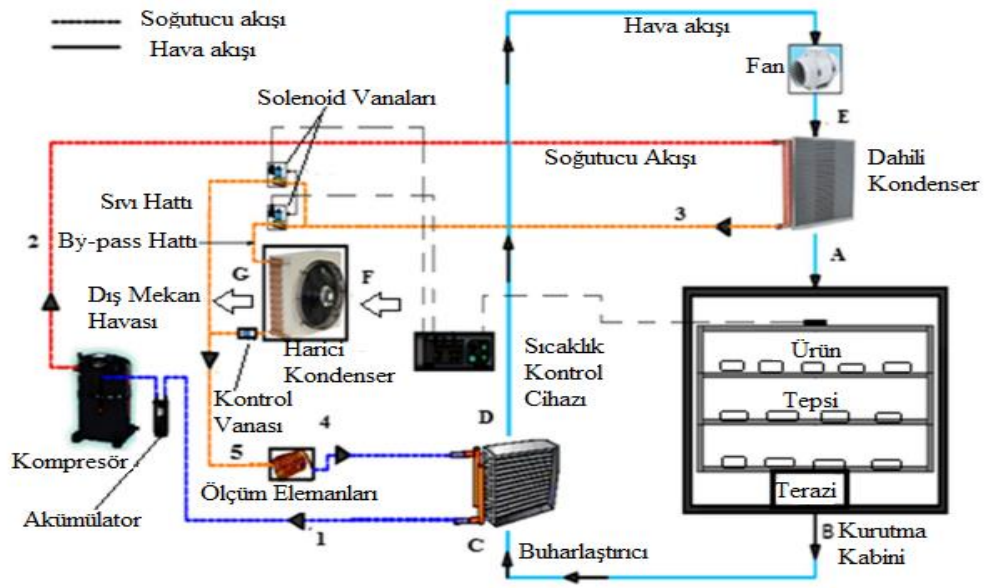
Şekil 4.2 Deneylerin yapıldığı kurutma sistemi



Şekil 4.3 Kurutma sisteminin başka açıdan resmi

Isı pompalı kurutma sisteminde, birbirine seri bağlı olarak bir adet dış ve bir adet iç yoğunlaştırıcı kullanıldı, aynı zamanda sistemde R410A soğutucu akışkan dolaşımı sağlandı. Sistem içerisine yerleştirilen bir fan ile kapalı devre kanal içerisindeki kurutma havası sirküle edilecek bir sistem tasarlanmıştır. Aynı zamanda bu kurutma sistemi dışarıdan bir hava akışı almayacak şekilde tasarlandı. Sisteme koyulan dahili kondenserden giren kurutma havası (E), soğutucu akışkanın ısıyla ısıtılarak kurutma kabinine (A) girer. Isı sağlayan soğutucu

akışkan yoğuşturulur (3), kılcal bir borudan geçisi sağlanarak buharlaştırıcıya (4) gönderilir. Kuru hava şekilde olan kurutma havası tepsideki ürünlere gönderilir, gönderilen havanın kurutulacak olan ürünlere temas etmesi sonucunda ürünlerin yapısındaki nemi alarak, kurutma kabininden daha yüksek bir bağıl nemle ayrılır (B). Burada ısı ve kütle transferi prensibi etkindir. Bağıl nem yüksek olarak sistemden ayrılan hava ısı pompası buharlaştırıcısından (C-D) geçirilir. Bu hava tekrar sistemde kurutma için kullanılır. Evaporatör tüplerinin içinde, dolaşan soğutucu akışkan, kurutucu havadaki ısıyı emdikten sonra buharlaşır (1) ve kompresör tarafından emilir ve kondensere (2) basınç uygular. Dataloger sayesinde bir dakikalık aralıklar ile sıcaklık ve bağıl nem ölçümü yapılmaktadır. Anlatılan sistemin çizimi aşağıdaki şekildedir. Aşağıdaki Şekil 4.4'te deneylerin yapıldığı sistemin şematik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Denemelerin yapıldığı sistemin şematik çizimi

Sistem ürünlerin kütlesini ölçmek için kurutma odasının içerisinde load cell hücreler bulunmaktadır. Ürünün başlangıç nemini ölçmek için Shimadzu nem tayin cihazı kullanılmıştır. Sistemin içerisinde kurutma işlemi için dolaşan havanın bağıl nem ve sıcaklık değerleri veri toplama cihazıyla kayıt altına alınmıştır. Sistemde kullanılan soğutucu akışkan sıcaklıkları borularının yüzeyinde bulunan termokupl elemanları yardımıyla ölçülür. Aynı zamanda sistemde emme ve basma basınç değerlerini ölçmek için elektronik manifold

kullanılmıştır ve elektronik manifold ile 0-50 bar arasında ölçüm yapan ekipman kullanılmıştır. Sistemin kullandığı güç miktarları ve kompresörün tükettiği enerji değerleri bir elektrik sayacı kullanılarak ölçülmüş, alınan tüm veriler bir program yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Sistemde kullanılan elektrik sayacının yapabildiği ölçüm aralığı 150-300 V arasındadır. Şekil 4.5'te kurutma sisteminde kullanılan elektrik sayacı verilmiştir.



Şekil 4.5 Kurutma sisteminde kullanılan elektrik sayacı

Sistemde yapılan ölçümler yardımıyla sistemin verimliliği değerlendirilmiştir. Elektronik bir termostat kullanılarak kurutma odasının sıcaklığı algılama ampulünün kurutma kabininin içerisine koyularak ölçülmüştür. Kurutma odası sıcaklığı istenilen değerlere ulaştırıldığında kullanılan termostat belirli vanaları açarken diğerlerini kapatır ve bunun sayesinde dahili kondenser ile harici kondenserin de devreye girmesi sağlanmıştır. Harici kondenserin daha az aktif olduğu durumlara daha yüksek sıcaklıkta olan kurutma odaları örnek gösterilebilir.

Sistemde kullanılan ekipmanların teknik özellikleri çalışma prensipleri açısından çok önemlidir. Kullanılan kompresör döner tipli olup, silindir hacmi 8.6 cm^3 ve nominal gücü 750 W'tır. Ayrıca kullanılan buharlaştırıcı da alüminyum kanatlı boru tipinde olan ısı eşanjörüdür ve toplam ısı transfer alanı 278 m^2 'dir.



Şekil 4.6 Kurutma sisteminde kullanılan kompresör ve buharlaştırıcı

Yukarıdaki Şekil 4.6’da kurutma sisteminde kullanılan kompresör ve buharlaştırıcı gösterilmiştir. Sistemde kullanılan harici ve dahili kondenserler aynı kullanılan buharlaştırıcı gibi alüminyum kanatlı boru tipinde olan ısı eşanjörüdür. Aynı zamanda, dahili kondenserin toplam ısı transfer alanı 3.60 m^2 ve harici kondenserin toplam ısı transfer alanı 1.56 m^2 ’dir.

Dahili ve harici kondenser fanları eksenel tiptedir. Dahili fanın nominal gücü 50 W iken, harici fanın nominal gücü 33 W’tır. Kullanılan kapiler tüpler 1 m uzunluğunda ve $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ çapındadır. Kullanılan soğutucu tipi Freon-410A’dır. Aşağıdaki Şekil 4.7’de sistemde kullanılan soğutucu bağlantıları verilmiştir.



Şekil 4.7 Sistemde kullanılan soğutucu bağlantıları

4.3 Yöntem

Yöntem kısmı kurutma işlemine hazırlık ve ana işlem olan ısı pompalı kurutucuda kurutma olarak ikiye ayrılır.

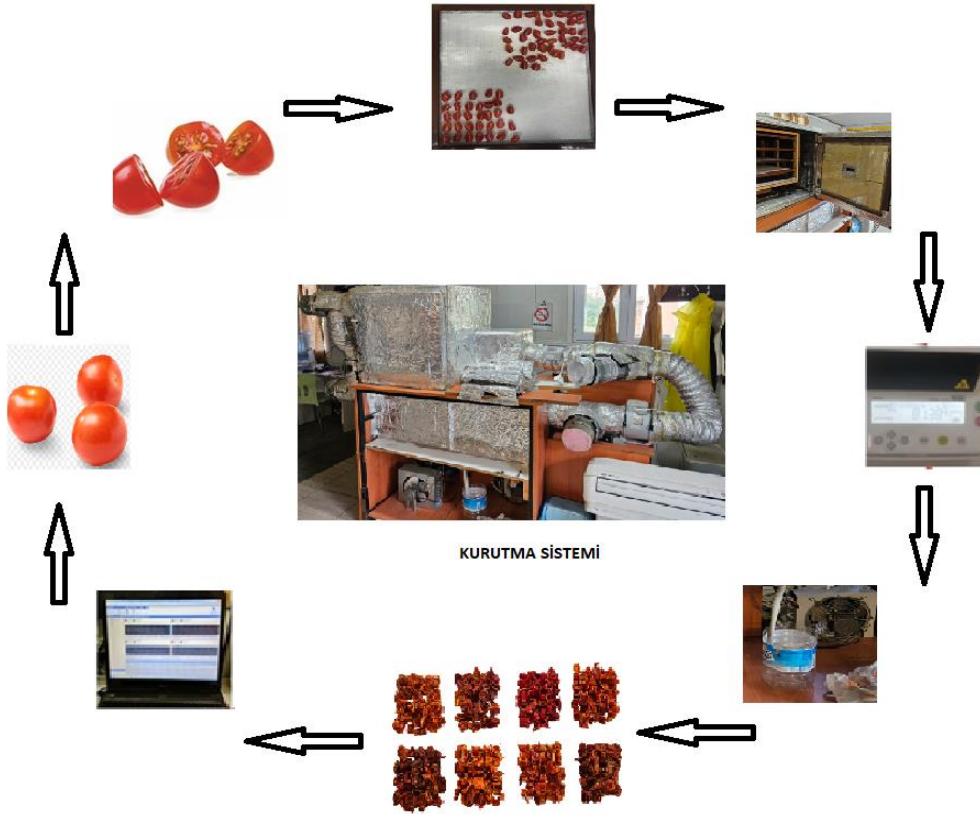
4.3.1 Kurutma işlemine hazırlık

Kurutulacak domates numuneleri özenle yıkanarak 1/4 boyutunda dilimlenmiştir. Kurutma uygulamasında dilim kalınlığının etkisinin gözlemlenmesi için bazı

numuneler 1/2 boyutlarında kesilmiştir. Ürünün başlangıç nemini ölçmek için Shimadzu nem tayin cihazı kullanılmıştır.

4.3.2 Isı pompalı kurutucuyla kiraz domates dilimlerinin kurutulması

Kurutmaya başlamadan önce sistemi stabilize etmek için kurutucu yaklaşık olarak 30 dakika kadar çalıştırılmıştır. Kurutmaya hazırlanan domates dilimleri (1/2 ve 1/4 boyutlarında) Şekil 4.2’de gösterilen kurutucuda 35, 40 ve 45°C’lerdeki hava sıcaklıklarında kurutuldu. Aşağıdaki Şekil 4.8’de kurutma sistemi akışı verilmiştir. Domatesler kurutulmak için tepsiye dizilip Şekil 4.9’da görülen ısı pompalı kurutucunun kabin kısmına koyuldu.



Şekil 4.8 Kurutma işlemi sürecinin akışı

Kurutma denemelerinde hava akış hızı Testo 405-V1 ve Testo 410-2 kullanılarak ölçülmüştür. Domatesler kurutma tepsisine düzgün olacak bir şekilde koyulmuş ve kurutmaya öyle başlanmıştır. Kurutma işlemi esnasında kütle azalışını ölçmek için yük hücresi kullanılmış ve veriler veri kaydedici (data logger) yardımıyla üç dakikalık aralıklarla bilgisayara kaydedilmiştir. Şekil 4.4’te belirtilen A, B, C, D, E noktalarından ölçülen bağıl nem (% H) ve sıcaklık (T) verileri ile psikometrik

diyagramdan entalpi (h) değerleri belirlendi. Numunelerdeki nem içeriği yaklaşık %5'e düşüncüye kadar kurutma işlemine devam edilmiştir.



Şekil 4.9 Isı pompalı kurutucunun kabin kısmı

Kurutma işlemi sırasında sıcaklık verileri ve sistemin tükettiği enerji verileri aşağıdaki Şekil 4.10'daki ekipmanlarla kayıt altına alınmış ve aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Isı pompalı kurutucunun enerji ölçüm ve hız kontrol ekipmanları

Sistemde kayıt altına alınan veriler haberleşme yoluyla bilgisayara gelerek kayıt altına alınmıştır. Sistem için temel varsayımlardan aşağıda bahsedilmiştir.

IPK için temel varsayımlar:

- Sistem kararlı hale gelmesi için 30 dakika boş çalıştırıldı.
- Hava ve R410A soğutucu akışkan için ölü hal koşulları $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$ olarak seçilmiştir. Denemeler sırasında çevre ortam sıcaklığı $T_0 = 24 \pm 1^\circ\text{C}$ ve çevre bağıl nemi $H_0 = \%45 \pm 10$ olarak ölçülmüştür.
- Buharın özgül ısısı ($C_{pa} = 1.005 \text{ kJ/kgK}$)

- Havanın özelliklerini belirlemek için psikometrik diyagram ve soğutucu akışkanın (R410A) termodinamik özelliklerini belirlemek için ise “CoolPack” ve “Engineering Equation Solver” yazılım paketi kullanıldı.

Aşağıdaki Şekil 4.11’de kurutulmuş numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Deneyler sonucunda kurutulmuş kiraz domates örnekleri

Yukarıda Şekil 4.11’de deneyler sonucunda kurutulmuş kiraz domates örneklerinin hangi sıcaklıkta, hangi boyutta ve hangi kurutma hızında kurutulduğu aşağıda Tablo 4.1’de verilmiştir. Veriler resimde soldan sağa doğru olacak şekilde listelenmiştir.

Tablo 4.1 Kurutulmuş numelerin kurutma parametreleri

Sıra	Sıcaklık (°C)	Boyut	Kurutma hızı (m/s)
1	40	1/4	1
2	45	1/2	1
3	45	1/4	1
4	40	1/4	0.75
5	45	1/2	0.75
6	35	1/4	1
7	40	1/4	0.5
8	45	1/2	0.5

4.4 Nem Tayini

Kuru madde miktarını belirlemek için domates örnekleri etüvde 24 saat tutulmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda nem miktarı, %90.5 (yaş baz) olarak hesaplanmıştır.

4.5 Matematiksel Modelleme

Yapılan kurutma çalışmalarında kullanılmış olan numunelerin nem oranı kuru baza göre aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

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

Burada M ürünün neminin içeriğini, m_w değeri ise ürünün içindeki su miktarını aynı zamanda m_d değeri ise ürünün kuru madde miktarını ifade etmektedir.

Sistemin kurutma hızını 4.2 eşitliği ile yapılmıştır.

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

Burada, DR ile sistemin kurutma ile ilgili hızını (kg su/(kg kuru madde × dakika)), M_{t1} ve M_{t2} sırası ile t_1 ve t_2 ise o andaki nemin içeriğini ve t süreyi ise zaman birimi olarak dakika biriminden göstermektedir.

Ürünün neminin oranı (MR) ise (4.3) eşitliğinin kullanılması ile yapılmıştır.

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

M ifadesi rastgele bir anda bulunab su miktarını, M_0 ise kurutma işlemine başlamadan önce kurutulacak olan ürünün bulundurduğu su miktarını aynı zamanda M_e kurutma işlemindeki koşullarda havanın bulunduğu denge su miktarını temsil etmektedir. Denge içindeki su miktarı diğerleri ile kıyaslandığında ihmal edilecek seviyede olduğu için ihmal edilmiştir.

Deneyssel olarak bulunan bilgilerden yola çıkarak nem miktarı ile kurutma için geçen süre arasında bir bağlantı sağlanması amacıyla Tablo 4.2’de verilen matematiksel modeller denenmiş ve istatistiksel verilerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2 Matematiksel modelleme için uygulanan denklemler

Denklem ismi	Denklemler	Kaynakları
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Roberts vd. (2008)
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Ghodake vd. (2006)
Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + c$	Öztekin ve Sacilik (2020)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Sobukola ve Dairo (2007)
Midilli & Küçük	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli ve Küçük (2003)
Parabolik	$MR = a + bt + ct^2$	Sharma ve Prasad (2004)
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang ve Singh (1978)
Weibull	$MR = \exp \left[- \left(\frac{t}{b} \right)^a \right]$	Uribe vd. (2011)
Aghbashlo vd.	$MR = \exp \left(- \frac{k_1 t}{1 + k_2 t} \right)$	Aghbashlo vd. (2009)
Vega-Gálvez I	$MR = \exp (n + kt)$	Lemus-Mondaca vd. (2009)
Vega & Lemus	$MR = \exp (a + bt)^2$	Vega-Gálvez vd. (2009)
Lojistik	$MR = \frac{a}{[1 + b \exp(kt)]}$	Zwietering vd. (1990)

a, b, c, k, k₁, k₂ ve n: modellerin sabitleri ve katsayıları

4.6 Regresyon Analizi

Regresyon analizleri sırasında Statistica programına başvurulmuştur. Regresyon katsayısı (R^2) ürünlerin kuruma eğrilerini gösteren denklemi belirlemek üzere en önemli parametre ve ana parametre olarak kullanılmıştır. Ek olarak khin kare (χ^2) ile tahminin standart hatasının ($RMSE$) verileri ile başvuru eşitliğinin uyumluluğu belirlenmiştir (Tunde-Akintunde ve Ajala, 2010).

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

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

MR_{pre} ve MR_{exp} deneysel olarak ve tahmin edilen nem miktarlarını, N ise deney sayısı ve ek olarak n kullanılan denklemden katsayı sayısı şeklinde tanımlanmaktadır.

Tahminin standart hatası, deneysel ve ampirik veriler arasındaki sapmayı ifade eder. Burada ifade edilen değerin sıfıra daha yakın olması istenmektedir. Ek olarak uyumun iyilik derecesini ifade eden khi-kare değerinin azalması ile uyumun arttığını göstermektedir (Akpınar ve Biçer, 2003).

4.7 Difüzyon Katsayısının ve Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Farklı türdeki gıdalar için ince tabakalı şekilde olacak kurutma işleminde detaylı bir araştırma fırsatı bulmuş olan teorik model, Fick'in ikinci yasasının çözümlenmesidir (Madhiyanon vd., 2009):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (4.6)$$

Aşağıda verilen 4.7 denkleminde difüzyon katsayısının sabit olarak alınıp kartezyen koordinatları yöntemiyle çözümlenip bunu sağlayan sınır şartlarıyla sadeleştirme uygulanırsa;

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4.7)$$

Burada ifade edilen D_{eff} efektif difüzyon katsayısını (m^2/s) şeklinde, L ise dilim 1/2 kalınlığını (m) ve ek olarak t ise kurutma süresi (s) şeklinde gösterilmektedir. Büyük kurutma sürelerinde 4.8 denklemindeki ilk terimi sonuç bulmak için uygulanır (Madamba, 2003):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(- \pi^2 \frac{D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4.8)$$

Bunlara ek olarak kurutma süresine göre $\ln(MR)$ grafiğinin eğimi,

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (4.9)$$

Efektif difüzyon katsayısı değerlerinin sıcaklığa karşı değişimi Arrhenius tipi olan üstel bir fonksiyon ile açıklanmaktadır (Sanjuán vd., 2003):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(- \frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (4.10)$$

Burada D_{eff} efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), D_0 sonsuz sıcaklıkta difüziviteye eşdeğer bir sabit (m^2/s), E_a aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R üniversal gaz sabiti ($8.314 \text{ kJ}/(\text{mol} \times \text{K})$) ve T kurutma sıcaklığıdır ($^{\circ}\text{C}$). Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi incelendiğinde bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden yararlanarak aktivasyon enerjisinin değeri hesaplanır (Mengeş ve Ertekin, 2007).

4.8 Renk Analizi

Renk analizlerinin yapılması için ölçüm cihazı olarak Chroma Meter-CR-400 ekipmanı kullanılmıştır. Yapılan renk ölçüm ekipmanının görüntüsü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Kiraz domatesin renk ölçümlerin 5 kez tekrarlanmıştır. Çalışmalar boyunca “L” değeri parlaklığı ifade etmekte ve 0 ile 100 arasında değerler alabilmektedir. “L”, 0 değerini siyah renkte hiçbir yansımanın olmadığı durumda alırken 100 değerini tam yansımanın olduğu beyaz renkte almaktadır. Pozitif “a” değerleri kırmızılığı, negatif “a” değerleri yeşili, pozitif “b” değerleri sarılığı ve negatif “b” değerleri ise maviliği temsil etmektedir. Sıfır kesim noktasında ($a = 0$ ve $b = 0$) renksizlik yani grilik olmaktadır (Polatçı vd, 2009.). Şekil 4.12’de renk analizleri için kullanılan laboratuvar cihazı verilmiştir.



Şekil 4.12 Konica Minolta CR-400 cihazı

Renk toplam değişimleli belirtilen 4.11 denklemiyle aynı zamanda Chroma parametresi ise 4.12 denklemine göre hesaplanmıştır.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta \alpha^2 + \Delta b^2} \quad (4.11)$$

$$C = \sqrt{\alpha^2 + b^2} \quad (4.12)$$

4.9 HPD Sisteminin Enerji Analizi

HPD sisteminin performansı; kurutma havasının yoğuşturucuya giriş durumuna ve havanın hızı gibi faktörlere bağlıdır. Hava tarafında, soğutucu akışkanın yoğuşturucuya verdiği ısı:

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_a C_{pam} (T_A - T_E) \quad (4.13)$$

Denklemden $\dot{m}_a$, havanın kütleli debisi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\dot{m}_a = A \cdot \rho \cdot v \quad (4.14)$$

C_{pam} nemli havanın özgül ısısını ifade eder ve hesabı:

$$C_{pam} = C_{pa} + \omega_a \cdot C_{pv} \quad (4.15)$$

Yoğuşturucunun kondenzasyon bölgesinden kurutma havasına aktarılan toplam ısıların kompresöre ve fana giren enerjiye oranı, tüm sistemin verimi olarak belirtilir ve hesabı (Tosun, 2009; Jia vd., 1990):

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp} + W_f} \quad (4.16)$$

DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ

5.1 Sıcaklığın Kuruma Süresine Etkisi

Dilimlenmiş domates örneklerinin (1/4) kurutma karakteristikleri 35, 40 ve 45°C'deki 1 ± 0.15 m/s olan hava hızında gözlemlenmiştir. Örneklerin nem içeriği %90.5 (yaş bazda) oranlarında tespit edilmiştir. Kurutulan ürünlerdeki nem oranı %5'e inince kurutma işlemi sonlandırılmıştır. Kurutulan örneklerinin kurutma süreleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Domates dilimlerinin nem içerikleri ile kurutma süreleri ile değişimi Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Bu şekillerden örneklerdeki nem miktarları kuruma süresi ile azaldığı görülmektedir.

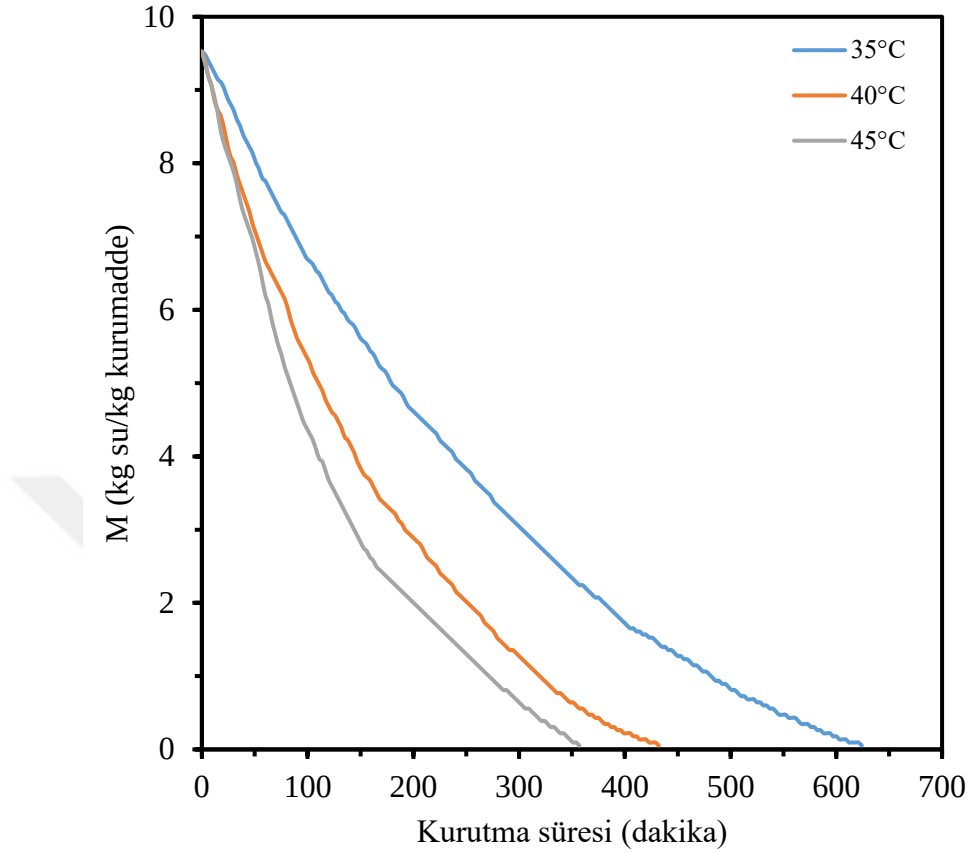
Tablo 5.1 Domates numunelerinin (1/4) kuruma süreleri

Sıcaklık (°C)	Kurutma süresi (dakika)
35	650
40	430
45	355

Tablo 5.1' de görüldüğü üzere 35, 40, 45 °C sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemleri incelendiğinde kurutma sıcaklığı arttıkça kurutma süresi azalmıştır. Sıcaklık ile kuruma süresi arasında ters orantı vardır. Sıcaklık 35°C'den 40°C dereceye çıkartıldığında kuruma süresi %34 azalmıştır. Aynı zamanda 40°C'den 45°C'e çıkartıldığında kurutma süresi %17 kısalmıştır. Benzer çalışmalar literatürde de yer almaktadır:

Kutlu ve İşçi (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, ikiye bölünmüş olarak 80, 70 ve 60°C'de ve bunlara ek olarak sabit 2 m/s olan hava hızında bir teprili kurutucuda kurutulan domateslerin kuruma süreleri sırasıyla 1050, 660 ve 600 dakikadadır. Coşkun vd. (2016) tarafından 35, 40 ve 45°C derece sıcaklıkta ısı pompalı kurutucuda yapılan kurutma işleminde kurutma sıcaklığının artmasıyla birlikte kuruma süresinin azaldığı bildirilmiştir. Nabnean vd. (2016) yaptıkları çalışmada ise kiraz domatesleri ozmotik olarak tasarlanmış hibrit solar

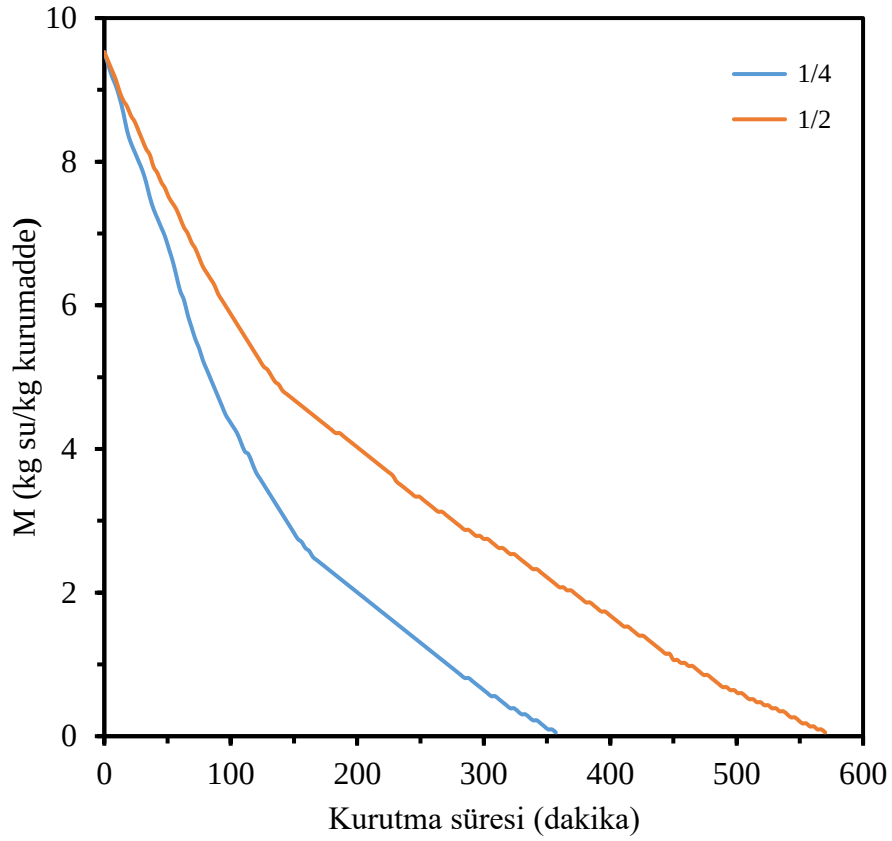
kurutucuyla 30°C ile 65°C derece sıcaklık arasında kurutmıştır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda sıcaklık artıkça kurutma süresinin düştüğü görülmüştür.



Şekil 5.1 Farklı sıcaklıklardaki ve $v=1$ m/s hava hızında kurutulan domates dilimlerine (1/4) ait nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimi

5.2 Dilim Kalınlığının Etkisi

Dilim kalınlığının kurutma süresine etkisini incelemek amacıyla domates örnekleri 1/4 ve 1/2 ebatlarında dilimlenmiş ve bir ön işlem yapılmadan 45°C'deki hava sıcaklığında kurutulmuştur. Kurutma süreleri sırasıyla 357 ve 570 dakika olduğu saptanmıştır. Farklı kalınlıktaki örneklerin 45°C'de nem miktarının kurutma zamanıyla değişmesi aşağıdaki Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bu kurutma eğrilerinden anlaşılacağı üzere dilim kalınlığı arttıkça kurutma hızı azalmakta dolayısıyla kurutma süresinin arttığı tespit edilmiştir.

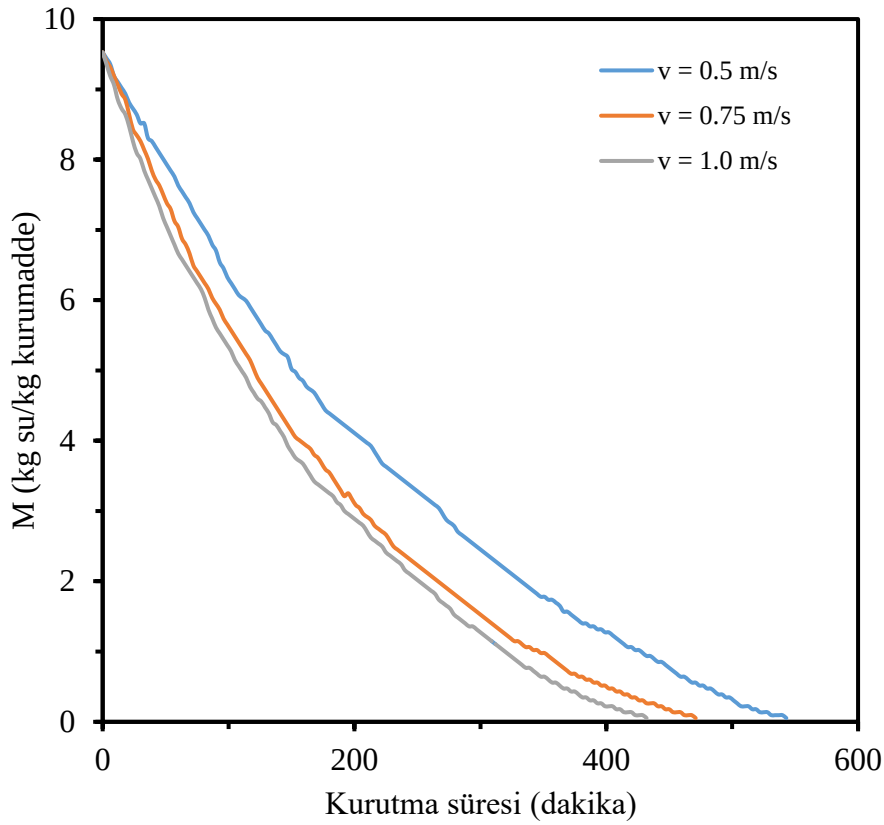


Şekil 5.2 Farklı kalınlıktaki domates dilimlerinin 45°C sıcaklıkta kurutulan örneklerinin nem miktarının kurutma süresiyle değişimi

Yüce (2019) tarafından yapılan bir çalışmada havalı kabin kurutucuda ön işlem yapılmış kiraz domatesler 65°C’de tam boyutta, 1/2 boyutunda ve 1/4 boyutunda kesilip sabit 2 ± 0.1 m/s kurutma hızında kurutulmuştur. Tam boyuttaki kiraz domates örnekler 800 dakika olmasına rağmen kurumamış, 1/2 boyutunda olan kesilmiş örnekler 585 dakikada, 1/4 ebatında olan örnekler ise 210 dakikada kurutulduğu tespit etmiştir. Khazaei vd. (2008), dilim kalınlığının kabin tipi kurutucuda kurutma süresine etkisi incelenmiştir. Denemelerde 3, 5, 7, 9 ve 11 mm dilim kalınlığındaki domatesler ve 60, 80, 100 ve 120°C kurutma sıcaklıklarında %94.3 nem miktarının %14 nem miktarına kurutulmuştur. Kurutma zamanları 2.6-18.7 saat arasında değişiklik göstermiştir. Dilimin kalınlığı artıkça kurutma süresinin arttığını bildirmişlerdir. Bu yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında kurutulacak olan ürünün boyutu küçüldükçe kurutma süresinin azaldığı görülmüştür ve yapılan çalışmalar sonucunda bu tesbite ulaşılmıştır.

5.3 Hava Hızı Değişimi

40°C’de 1/4 boyutunda olan domates dilimleri 1, 0.75 ve 0,5 m/s hava hızlarında kurutulmuş ve bulunan verilerden yararlanılarak nem miktarının kuruma zamanıyla değişim eğrileri aşağıdaki Şekil 5.3’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere hava hızı artıkça kurutma süresi kısalmıştır. Buradan da görüleceği üzere hava hızı ile kurutma süresi arasında ters bir orantı vardır.



Şekil 5.3 Farklı hava hızlarında ve 40°C’de kurutulan domates dilimlerine (1/4) ait nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimi

5.4 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

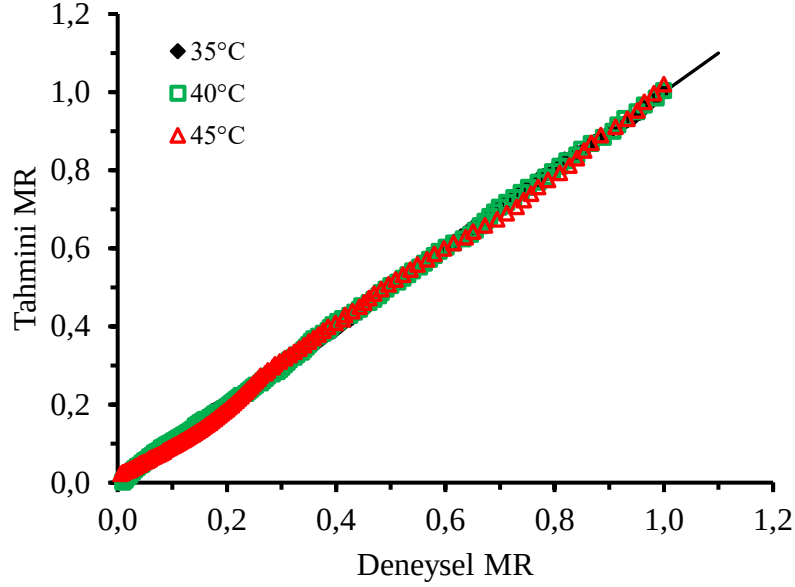
Yapılan deneylerden sonucunda elde edilen verilerinden yola çıkarak lineer olmayan regresyon analiz metoduyla nem oranı kurutma süresi ile değişimin eğrilerinin matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Tablo 4.2’de modellerin uygulanmasıyla bulunan khi kare (χ^2) ve RMSE değerleri Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Modelin uygun olup olmadığı tespit edilirken düşük χ^2 ve RMSE,

yüksek R^2 değerlerine bakılır (Sarsavadia vd., 1999). Regresyon katsayısı ürünlerin kurutma eğrilerini açıklayan en mükemmel kurutmayı seçmek için en önemli kriter olarak alınmıştır. Tahmini standart hatası ($RMSE$), model ile bulunan tahmini değerlerle deneysel değerler arasındaki sapmayı göstermektedir. Ek olarak khi-kare (χ^2) değerinin azalmasıyla uyumun arttığı bulunmuştur (Mengeş ve Ertekin, 2007).

Tablo 5.2 Farklı sıcaklıklarda kurutulan kiraz domates dilimleri için hesaplanan istatistiksel veriler

T (°C)	Model	R^2	χ^2	RMSE
35	Lewis	0.981029	0.001545	0.499547
	Henderson & Pabis	0.986149	0.001134	0.412814
	Logaritmik	0.99837	0.000295	0.210421
	Page	0.994661	0.000437	0.250681
	Midilli & Kucuk	0.999809	0.000015	0.045995
	Parabolik	0.998977	0.000084	0.105121
	Wang & Singh	0.998410	0.000130	0.139138
	Weibull	0.994661	0.000437	0.250683
	Aghbashlo vd.	0.998780	0.000099	0.125141
	Vega-Galvez I	0.986149	0.001134	0.412816
	Vega & Lemus	0.998843	0.000094	0.107047
	Lojistik	0.996406	0.000296	0.210421
40	Lewis	0.988522	0.000893	0.300931
	Henderson & Pabis	0.990272	0.000762	0.280102
	Logaritmik	0.999574	0.000033	0.059535
	Page	0.994631	0.000421	0.205761
	Midilli & Kucuk	0.999711	0.000022	0.047179
	Parabolik	0.996985	0.000238	0.155681
	Wang & Singh	0.993714	0.000492	0.237086
	Weibull	0.994631	0.000421	0.205761
	Aghbashlo vd.	0.997748	0.001760	0.138320
	Vega-Galvez I	0.988626	0.000591	0.314793
	Vega & Lemus	0.996181	0.000299	0.171471
	Lojistik	0.996126	0.000305	0.175107
45	Lewis	0.993369	0.000512	0.179770
	Henderson & Pabis	0.995777	0.000328	0.142248
	Logaritmik	0.998234	0.000138	0.113967
	Page	0.997450	0.000198	0.123279
	Midilli & Kucuk	0.998352	0.000130	0.109730
	Parabolik	0.991387	0.000676	0.254557
	Wang & Singh	0.989251	0.000837	0.269682
	Weibull	0.997450	0.000198	0.123279
	Aghbashlo vd.	0.997469	0.000197	0.136117
	Vega-Galvez I	0.995777	0.000328	0.142247
	Vega & Lemus	0.986633	0.001041	0.320473
	Lojistik	0.997334	0.000209	0.129127

Yukarıdaki Tablo 5.2’de görüldüğü gibi modellerin R^2 , χ^2 ve $RMSE$ sayısal değerleri sırasıyla 0.981029-0.999809, 0.000015-0.001545 ve 0.045995-0.499547 aralığında bulunmuştur. Midilli & Küçük modelinin R^2 değerleri diğer modellerin değerlerine göre daha yüksek, χ^2 ve $RMSE$ değerleri daha düşük olacak şekilde bulunmuş olup domates dilimlerinin kuruma davranışları daha iyi gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 5.4’de deneysel ve Midilli & Küçük modelinden hesaplanan nem oranlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.4 Domates dilimlerine ait deneysel ve Midilli & Küçük modelinden elde edilen tahmini nem oranı değerleri

Çoşkun vd. (2016) tarafından yapılan bir ısı pompalı kurutucuda kurutulan domates dilimlerinin 35°C’de kurutulmasının matematiksel modellemesinin on farklı modelde incelenmesi sonucunda en uygun modelin Midilli & Küçük modeli olduğunu beyan ettiler. Bu çalışma ile elde edilen sonuç ile örtüşmektedir.

5.5 Difüzyon Katsayılarının Hesaplanması

Denklem (4.9)’dan yararlanarak domates dilimleri (1/4) için her bir kurutma havası sıcaklığı için efektif difüzyon katsayısı hesaplanmış ve Tablo 5.3’te aynı zamanda Şekil 5.5’te verilmiştir.

Tablo 5.3 Farklı sıcaklıklarda kurutulan domates dilimlerinin (1/4) efektif difüzyon katsayısı değerleri

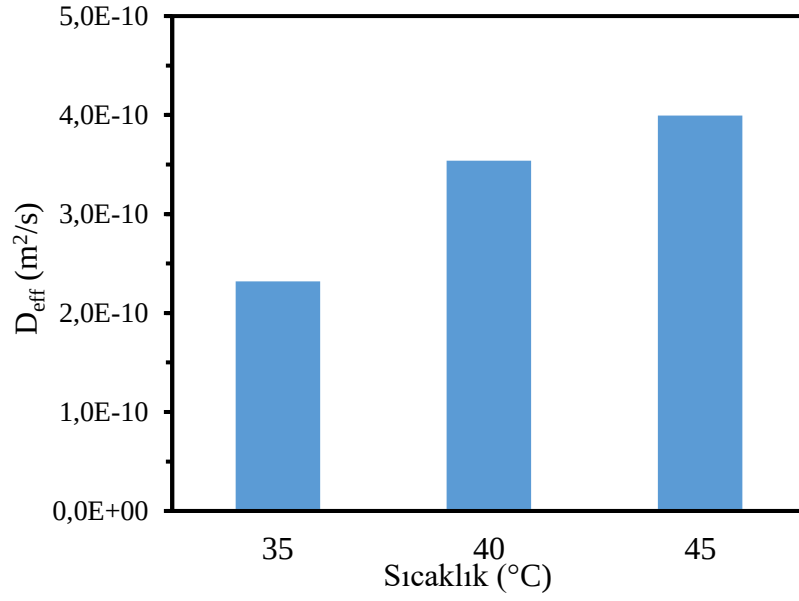
Sıcaklık (°C)	D _{eff} (m ² /s)
35	2.32×10 ⁻¹⁰
40	3.53×10 ⁻¹⁰
45	3.99×10 ⁻¹⁰

Kurutma havası sıcaklığının artmasıyla kurutulan domateslerin efektif difüzyon katsayısı değerleri artmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklık değerlerinde ürün içerisindeki nemin daha kolay buharlaşması ve kurutma hızının artmasıyla açıklanabilir (Mengeş vd., 2007). Elde edilen efektif difüzyon katsayıları, literatürde gıda ürünlerin kurutulması için belirtilen difüzyon katsayı değerleri olan 10⁻¹² ile 10⁻⁸ m²/s aralığındadır (Zogzas vd., 1996). Ayrıca domates dilimleri için bulunan efektif difüzyon katsayıları literatürdeki değerlere yakın olarak bulunmuştur. Literatürdeki bulunan diğer domatesler için farklı efektif difüzyon katsayıları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.4 Literatürden farklı domates türleri için efektif difüzyon katsayı değerleri

Ürün	D _{eff} (m ² /s)	Kaynak
K. domates	(4.41– 4.75) ×10 ⁻¹⁰	İsmail ve Akyol (2016)
K. domates	(2.25 – 6.21) ×10 ⁻⁹	Kipcak ve Doymaz (2018)
Domates	1.76×10 ⁻⁴ – 3.09×10 ⁻²	Taheri Garavand vd. (2011)
Domates	(2.26 – 9.14) ×10 ⁻⁹	Giovanelli vd. (2002)
Domates	1.3×10 ⁻¹⁰ – 2.75×10 ⁻⁹	Khazaei vd. (2008)

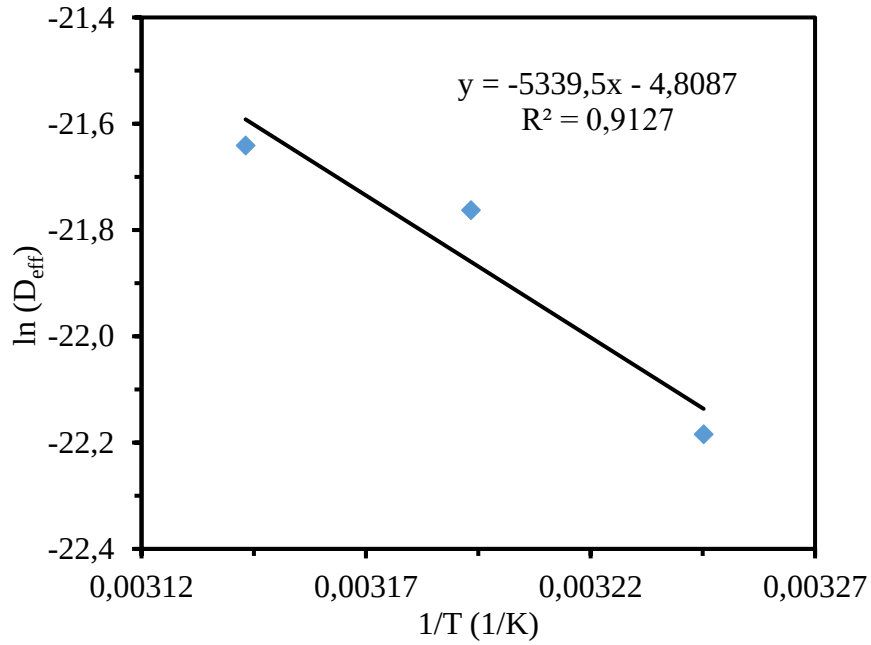
Bennamoun vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, soyulmuş tek bir kiraz domatesin 70°C derecede konvektif kurutulması sonucunda difüzyon katsayısı 2.53×10⁻¹⁰ m²/s olarak hesaplamışlardır ve bu çalışmada bulunan efektif difüzyon katsayısı değerlerine yakınlık göstermektedir.



Şekil 5.5 Domates dilimlerinin (1/4) efektif difüzyon katsayıları

5.6 Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Bulunan aktivasyon enerjisinin sonuçları, sıcaklık ($1/T$) ve $\ln(D_{eff})$ arasında yapılan ve Şekil 5.6'daki grafikteki doğrunun eğiminden yararlanarak bulunmuştur.



Şekil 5.6 Sıcaklığın efektif difüzyon katsayısına etkisi

Verilen 5.1'deki denklemde domates örnekler üzerinde kurutma sıcaklığın etkisi gösterilmiştir:

$$D_{eff} = 8.158 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{5339.5}{T}\right) \quad (R^2 = 0.9127) \quad (5.1)$$

Yukarıdaki gösterilen (5.1) denkleminden yararlanarak domates dilimlerin aktivasyon enerji değeri hesaplanmış ve 44.39 kJ/mol şeklinde hesaplanmıştır. Bulunan E_a sayısal değerleri yapılan çalışmalar incelendiğinde 12.7-110 kJ/mol arasında olduğu görülmüştür (Zogzas vd., 1996). Aşağıdaki Tablo 5.5'te farklı domates türleri için literatürdeki aktivasyon enerjileri verilmiştir.

Tablo 5.5 Farklı domates türleri için literatürdeki aktivasyon enerjileri

Ürün	E_a (kJ/mol)	Kaynak
K. domates	26.52 – 32.78	Kipcak ve Doymaz (2018)
K. domates	31.99 – 36.21	Cheng vd. (2015)
Domates	33.32- 43.22	Taheri Garavand vd. (2011)

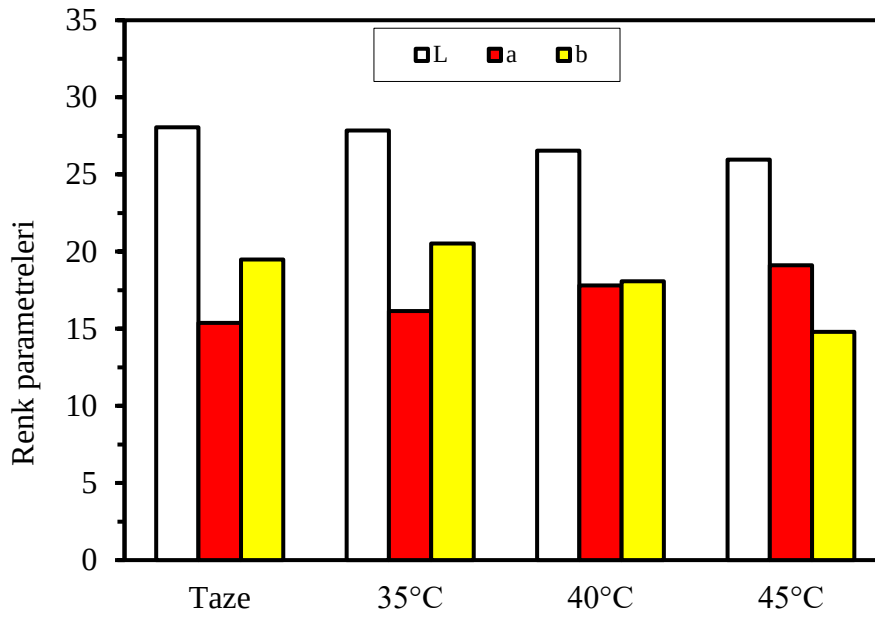
Coşkun vd. (2016) çalışmalarında ısı pompalı kurutma sisteminde aktivasyon enerjisini 43.12 kJ/mol bulduklarını bildirmişlerdir ve bu çalışmadan elde edilen değer yakın olduğu görülmüştür.

5.7 Kurutulmuş Ürünlerin Renk Analizi

Bu çalışmanın amacı yüksek su içeriğine sahip kiraz domates dilimlerinin kurutulması sonucu nem değerini belirli bir değerin altına düşürerek ürünü mikrobiyolojik, kimyasal ve enzimatik bozulmalara karşı dayanıklı hale getirmektir. Kurutma sırasında birçok fiziksel, kimyasal, mekanik, biyokimyasal ve mikrobiyal olay aynı anda meydana gelir. Bu değişiklikler nihai ürünün kalite özelliklerini etkiler. Taze domates dilimlerinin L, a ve b değerleri sırası ile 28.05, 15.38 ve 17.67 olarak ölçülmüştür. Isı pompalı kurutma yöntemi ile hava sıcaklığı 35, 40 ve 45°C ayarlanarak kurutma işlemi yapılan domates dilimlerinin ölçülen a, b ve L değerleri Tablo 5.6'da ve grafiksel olarak Şekil 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.6 Domates dilimleri için renk değerlerinin sonuçları

Sıcaklık (°C)	L	a	b	C	ΔE
Taze	28.05	15.38	19.48	24.81	--
35	27.86	16.14	20.52	26.10	1.30
40	26.55	17.81	18.07	25.37	3.18
45	25.96	19.11	14.79	24.16	6.34



Şekil 5.7 Taze ve farklı sıcaklıklarda kurutulan örneklerin renk parametreleri

Şekil 5.7'deki veriler incelendiğinde, kurutmada kullanılan havanın sıcaklığı artmasıyla L ve b değerlerinde azalma olduğu yani domates dilimlerindeki L değerinin ifade ettiği parlaklığın ve b değerinin ifade ettiği sarılığın gittikçe azaldığı, buna karşılık a değerinde artış olduğu yani a değerinin ifade ettiği kırmızılığın gittikçe arttığı görülmektedir.

ΔE değeri, kurutma işleminden sonra toplam renk değişimini tanımlamak için yararlı bir araçtır. Kurutma havası sıcaklığının 35°C'den 45°C'ye çıkarılmasıyla ΔE , 1.30'dan 6.34'e yükselmiştir. Buna karşılık kroma değerleri 26.10'dan 24.16'ya düşmüştür.

Sarıgök vd. (2019) birlikte yaptığı çalışma sonucunda kiraz domateslerin kurutulduktan sonra renk analizleri yapıldığında 50°C'de yapılan kurutmada kurutulan ürünün renkleri daha iyi olduğunu gözlemledi. Bizim yaptığımız

çalışma ile karşılaştırıldığında yakın sıcaklık değerlerinde renk kalitelerinin benzer olduğu görülmüştür.

Kutlu ve İşçi (2016) tarafından yapılan başka bir çalışma ile yaptığımız çalışma karşılaştırıldığında sıcaklık artıkcı kırmızılık değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

5.8 Sistemin Enerji Performansının İrdelenmesi

Denklem (4.16)'dan yararlanarak domates dilimleri (1/4 ve 1/2) için 35°C, 40°C ve 45°C kurutma havası sıcaklıklarında ek olarak farklı kurutma hava hızlarında COP_{sis} değerleri hesaplanmıştır. Aşağıdaki Tablo 5.7, 5.8 ve 5.9'da bu değerler verilmiştir.

Tablo 5.7 1/4 dilim kalınlığı ve 1 m/s hava hızında farklı kurutma sıcaklıklarında COP_{sis} değerleri

Kurutma sıcaklığı (°C)	1/4 Dilim kalınlığı - 1 m/s Hava hızı				
	Kurutma süresi (dakika)	Toplam kompresör enerji tüketimi (kWh)	Toplam sistem enerji tüketimi (kWh)	COP _{sis}	24°C'den istenen sıcaklığa ulaşma süreleri (s)
35	624	6.583	7.602	2.235	321
40	432	4.917	5.522	2.642	522
45	357	4.212	4.783	2.715	758

Tablo 5.7'de ısı pompalı kurutucuda 1/4 dilim kalınlığında kesilmiş, 1 m/s hava hızında kurutulmuş kiraz domateslerin kurutma sıcaklığına bağılı olarak kurutma süreleri, toplam kompresör enerji tüketimi, toplam sistem enerji tüketimi, 24°C'den 40°C'ye ulaşma süresi (s) ve COP_{sis} değerleri incelenmiştir. Kurutma sıcaklığı arttığında kurutma süresinin, toplam kompresör enerji tüketiminin ve toplam sistem enerji tüketiminin azaldığı görülmüştür. Isı pompasının performans katsayısı (COP) değeri yapılan deneysel çalışmada en yüksek 45°C'de 2.715 olarak hesaplanmıştır. En düşük ise 35° C kurutma sıcaklığında bulunmuştur.

Tablo 5.8 1/4 dilim kalınlığı ve 40°C kurutma sıcaklığında
farklı hava hızlarında COP_{sis} değerleri

Kurutma hava hızı (m/s)	1/4 Dilim kalınlığı - 40°C Kurutma sıcaklığı				
	Kurutma süresi (dakika)	Toplam kompresör enerji tüketimi (kWh)	Toplam sistem enerji tüketimi (kWh)	COP _{sis}	24°C'den 40 °C'ye ulaşma süresi (s)
0.50	543	5.982	6.742	1.847	623
0.75	471	5.275	5.95	2.211	582
1.00	432	4.903	5.522	2.642	522

Tablo 5.8 'de 1/4 dilim kalınlığında kesilmiş olan kiraz domatesin 40°C'de farklı kurutma hava hızlarında kurutma süreleri, toplam kompresör enerji tüketimi, toplam sistem enerji tüketimi, 24°C'den 40°C'ye ulaşma süresi (sn) ve COP_{sis} değerleri incelenmiştir. Toplam enerji tüketimi kurutma hava hızına bağlı olarak değişmektedir. Aynı şekilde COP_{sis} değeri hava hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Tablo 5.9 1/2 dilim kalınlığı ve 45°C kurutma sıcaklığında
farklı hava hızlarında COP_{sis} değerleri

Kurutma hava hızı (m/s)	1/2 Dilim kalınlığı - 45°C Kurutma sıcaklığı				
	Kurutma süresi (dakika)	Toplam kompresör enerji tüketimi (kWh)	Toplam sistem enerji tüketimi (kWh)	COP _{sis}	24°C'den 45 °C'ye ulaşma süresi (s)
0.50	675	7.796	8.887	2.239	861
0.75	621	7.265	8.259	2.543	788
1.00	570	6.764	7.666	2.704	723

Tablo 5.8 ve Tablo 5.9 karşılaştırıldığında 1/4 dilim kalınlığında, 1 m/s kurutma hava hızında ve 45°C hava sıcaklığında yapılan kurutma işleminin, 1/2 dilim kalınlığında, 1 m/s kurutma hava hızı ve 45°C hava sıcaklığında kurutulan kiraz

domateslerin COP_{sis} değerinden daha iyi olduğu görülmüştür. 24 C'den 45 C'ye ulaşma süresi (sn) bakımından değerlendirildiğinde durum tam tersidir. Aynı zamanda buradaki değerlerden de görüleceği gibi dilim kalınlığı artıkça kurutma süresi artmaktadır.

Coşkun vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, 35, 40 ve 45 C domates dilimleri bir ısı pompalı kurutucuda kurutmuşlardır. Elde edilen verilerden yararlanarak sistemin COP_{sis} değerini incelemişler ve sırasıyla 2.323, 2.682 ve 2.706 olarak bildirmişlerdir ve bu çalışmadaki değerlere yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir.



Kiraz domateslerin ısı pompalı bir kurutucuda (HPD) kurutma işlemi ile bulunan sonuçları aşağıda incelenmiştir. Isı pompalı kurutucuda yapılan domates dilimlerinin kurutulması için; kurutma havasının sıcaklığa etkisi, dilim kalınlığının kurutma zamanına yaptığı etkiler, kurutmanın hızıyla kurutma zamanının değişmesi, kurutmanın hız eğrilerinin model yapılması, gerekli olan difüzyon katsayıları bulunması, aktivasyon enerjisi bulunması, aynı zamanda renk analizlerinin yapılması ve sistemin enerji performansının hesaplanıp, değerlendirilmesi incelenmiştir.

a) Hava sıcaklığının kurutma süresine etkisi incelendiğinde;

Kiraz domatesden elde edilen dilimlerin ısı pompalı kurutucu yardımıyla kurutulurken 45, 40 ve 35°C üç farklı olan sıcaklık değerleri kullanıldı. Kurutmanın sıcaklığı artırıldığında kurutma süresi kısalmıştır. Kurutma işleminin sıcaklığı 35°C'den 45°C'ye artmasıyla kurutma zamanında 1.83 kat bir azalma meydana gelmiştir.

b) Dilim kalınlığının kurutma süresine etkisi incelendiğinde;

Kiraz domatesler ısı pompalı kurutucuda, dilim kalınlığının kurutma süresine etkisini incelemek amacıyla 1/4 (çeyrek) ve 1/2 (yarım) olmak üzere dilimlenmiş, farklı sıcaklıklarda farklı kurutma hızlarında kurutulmuştur. 1/4 ve 1/2 şeklinde dilimlenmiş 45°C'deki hava ile kurutulmuş kiraz domateslerin kuruma süreleri sırasıyla 357 ve 570 dakikadır. Kiraz domateslerin dilim kalınlığı artıkça kuruma hızı azaldığı dolayısıyla kurutma süresinin arttığı tespit edilmiştir.

c) Kurutma hava hızının kurutma süresine etkisi incelendiğinde;

1/4 boyutunda kesilen kiraz domateslerin 40°C'de 0.5, 0.75 ve 1.0 m/s hava hızlarında kurutulduğunda elde edilen sonuçlardan yola çıkarak kurutma hava hızı artıkça kurutma süresi kısalmıştır. Buradan da görüleceği üzere hava hızı ile kurutma süresi arasında ters bir orantı vardır.

d) Kurutma kinetiği incelendiğinde;

Yapılan çalışmalarının sonucunda bulunan verilerden yararlanılarak lineer olmayan bir regresyon analiz metodu sayesinde nemin oranıyla kurutma zamanının değişimi eğrilerinin matematiksel modellenmesi için Lewis, Henderson & Pabis, Logaritmik, Page, Midilli & Kucuk, Parabolik, Wang & Singh, Weibull, Aghbashlo vd., Vega-Galvez I, Vega & Lemus ve Lojistik olmak üzere on iki farklı kurutma modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Midilli & Kucuk modelinin R^2 değerlerinin diğer modellere göre daha yüksek, buna karşılık χ^2 ve RMSE değerlerinin ise daha düşük olduğu tespit edilmiş olup kiraz domatesin kurutma davranışlarını diğer modellerden daha iyi açıkladığı tespit edilmiştir.

e) Efektif difüzyon katsayısı incelendiğinde;

Değişik sıcaklık değerlerinde kurutulan domates dilimlerinin efektif difüzyon katsayısı değerleri kurutma sıcaklığına bağlı olarak 2.32×10^{-10} - 3.99×10^{-10} m²/s değerleri aralığında değişmiştir. Kurutma sıcaklığı efektif difüzyon katsayısını etkileyen önemli bir parametre olduğu elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır.

f) Aktivasyon enerjisi incelendiğinde;

Yapılan çalışma sonrasında aktivasyon enerjisi 44.39 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer literatürde yapılan çalışmalarda bulunan değerler aralığında olduğu tespit edilmiştir.

g) Renk analizleri incelendiğinde;

Yapılan renk analizleri sonrasında kurutma hava sıcaklığı artmasıyla L, b ve C değerlerinde azalma, buna karşılık a ve ΔE değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir.

h) Sistemin enerji performansı incelendiğinde;

Sistemin (HPD) enerji performansı farklı sıcaklıklarda, farklı dilim boyutlarında ve farklı kurutma hızlarında incelenmiştir. İnceleme sonucunda en yüksek performans katsayısı, en düşük toplam kompresör enerji tüketimi ve en düşük kurutma süresi değerlerine en yüksek kurutma hava sıcaklığında (45°C) sırasıyla 2.715, 4.212 kWh ve 357 dakika olarak bulunmuştur. Aynı sıcaklıkta kurutma hava hızı arttığında performans katsayısının arttığı, kompresör enerji tüketimi ve

kurutma süresinin düşütüğü tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak dilim kalınlığı ve kurutma hızı aynı kaldığında da benzer durumlar görölmüştür.



KAYNAKÇA

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Khani, S., ve Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin layer drying of carrot. *International Agrophysics*, 23(4), 313-317.
- Akpınar, K.E., ve Biçer, Y. (2003). Siklon tipi konvektif bir kurutucuda patlıcan dilimlerinin kuruma kinetiğinin ampirik bağıntılarla açıklanması. *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 2, 28-36.
- Alfeo, V., Planeta, D., Velotto, S., Palmeri, R., ve Todaro, A. (2021). Cherry tomato drying: Sun versus convective oven. *Horticulturae* 7, 40.
- Alibaş, İ. (2011). Kırmızı şili biberinin vakumla kurutma karakteristikleri. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 7(4), 429-435.
- Atalay, H. (2019). Comparative assessment of solar and heat pump dryers with regards to exergy and exergoeconomic performance. *Energy*, 189, 116180.
- Baysal, T., Ozbalta, N., Gokbulut, S., Çapar, B., Tastan, O., ve Gurlek, G. (2015). Investigation of effects of various drying methods on the quality characteristics of apple slices and energy efficiency. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 35(1), 135-144.
- Bennamoun, L., Khama, R., ve Léonard, A. (2015). Convective drying of a single cherry tomato: Modeling and experimental study. *Food and Bioproducts Processing*, 94, 114-123.
- Bulut, M. (2021). Kurutma işleminin meyve ve sebzelerin biyoaktif bileşenleri üzerine etkisi. *Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü*, Iğdır, Türkiye.

- Butz, P., García, A. F., Lindauer, R., Dieterich, S., Bogner, A., ve Tauscher, B. (2003). Influence of ultra high-pressure processing on fruit and vegetable products. *Journal of Food Engineering*, 56(2-3), 233-236.
- Cheng, L. S., Fang, S., ve Ruan, M. L. (2015). Influence of blanching pretreatment on the drying characteristics of cherry tomato and mathematical modeling. *International Journal of Food Engineering*, 11(2), 265-274.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Ho, J. C., ve Hawlader, M. N. A. (2002). Heat pump drying recent developments and future trends. *Drying Technology*, 20(8), 1579-1610.
- Çapar, B., ve Gökbulut, S. (2013). Farklı kurutma metotlarıyla kurutulan elma dilimlerinin kalite özelliklerinin ve enerji verimliliğinin incelenmesi. *Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye*.
- Çetin, N., (2019). Kurutma koşullarının elma ve portakalda renk özelliklerine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17 ; 463-470.
- Çetin, N., (2021). Elma çeşitlerinin kurutulmasında farklı kurutma yöntemlerinin etkisinin belirlenmesi ve yapay zekâ algoritmalarıyla karşılaştırılması. *Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye*.
- Çınar, İ., ve Erafşar, F. K. (2018). Köpük kurutma tekniğinin meyve ve sebze işlemede kullanımı. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 89-100.

- Coşkun, S., Doymaz, İ., Tunçkal, C., ve Erdoğan, S. (2016). Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. *Heat and Mass transfer*, 53, 1863-1871.
- Çolak, N., ve Hepbasli, A. (2009). A review of heat pump drying: Part 1–Systems, models, and studies. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2180-2186.
- Doymaz, I., ve Pala, M. (2002). The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 413-417.
- Erbay, B., ve Küçüköner, E. (2008). Gıda endüstrisinde kullanılan farklı kurutma sistemleri. *Türkiye*, 10, 21-23.
- Filiz, B. E., ve Seydim, A. C. (2014). Bazı kurutulmuş meyvelerin antioksidan özellikleri. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 2(3), 128-131.
- García-Martínez, E., Igual, M., Martín-Esparza, M. E., ve Martínez-Navarrete, N. (2013). Assessment of the bioactive compounds, color, and mechanical properties of apricots as affected by drying treatment. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 3247-3255.
- Ghodake, H.M., Goswami, T.K., ve Chakraverty, A. (2006). Mathematical modeling of withering characteristics of tea leaves. *Drying Technology*, 24(2), 159-164.
- Giovanelli, G., Zaroni, B., Lavelli, V., ve Nani, R. (2002). Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of Food Engineering*, 52(2), 135-141.

- Gölküçü, M., Toker, R., ve Tokgöz, H. (2016). Domatesin beslenme özellikleri ve gıda sanayisinde değerlendirilmesi. *Türkiye Tohumcular Birliği Dergisi*, 17, 46-51.
- Guiné, R. P. (2011). Influence of drying method on some physical and chemical properties of pears. *International Journal of Fruit Science*, 11(3), 245-255.
- Guo, X.H., Xia, C.Y., Tau, Y.R., Chen, L., Ming, J. (2014). Mathematical modeling and the effect of various hot air drying on mushrooms (*Lentinus edodes*). *Journal of Integrative Agriculture*, 13 (1), 207-216.
- Gümüşay, Ö. A., Borazan, A. A., Ercal, N., ve Demirkol, O. (2015). Drying effects the antioxidant properties of tomatoes and ginger. *Food Chemistry*, 173, 156-162.
- Güngör, A. (2013) Sebze ve meyve kurutmada kullanılan kurutucular ve kurutma teknolojileri. *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 17, 20.
- Gürel, A. E., Ceylan, İ., ve Aktaş, M. (2016). Meyve ve sebzelerin kurutma parametrelerinin incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4(4), 267-273.
- Gürel, A.E., Yılmaz, S., Ceylan, İ. (2010) Güneş enerjili ve nem kontrollü kurutucunun deneysel analizi. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 5(2), 178-187.
- Hawladar, M. N. A., Chou, S. K., Jahangeer, K. A., Rahman, S. M. A., ve KW, E. L. (2003). Solar-assisted heat-pump dryer and water heater. *Applied Energy*, 74(1-2), 185-193.

- Ismail, O., ve Akyol, E. (2016). Open-air sun drying: the effect of pretreatment on drying kinetic of cherry tomato. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 34(2), 141-151.
- Jia, X., Jolly, P., ve Clements, S. (1990). Heat pump assisted continuous drying part 2: Simulation results. *International Journal of Energy Research*, 14(7), 771-782.
- Kamiloglu, S., ve Capanoglu, E. (2015). Polyphenol content in figs (*Ficus carica* L.): Effect of sun-drying. *International Journal of Food Properties*, 18(3), 521-535.
- Karabacak, A. Ö., ve Çopur, Ö. U. (2022). *Meyve ve sebzelerin kurutulması sonrası biyoaktif bileşenlerin biyoerişilebilirliğindeki beğişikliklerin araştırılması*. Ankara, Türkiye, 49.
- Khazaei, J., Chegini, G. R., ve Bakhshiani, M. (2008). A novel alternative method for modeling the effects of air temperature and slice thickness on quality and drying kinetics of tomato slices: superposition technique. *Drying Technology*, 26(6), 759-775.
- Kipcak, A. S. ve Doymaz, İ. (2018). Effect of pre-treatment and air temperature on drying time of cherry tomato. *Journal of Thermal Engineering*, 4(1), 1648-1655.
- Kipcak, A. S., ve Doymaz, İ. (2020). Microwave and infrared drying kinetics and energy consumption of cherry tomatoes. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 26(2), 203-212.
- Köprüalan, Ö., Bodruk, A., ve Ertekin, F. (2019). Meyve ve sebzelerin patlatmalı puf kurutma yöntemi ile kurutulması. *Akademik Gıda*, 17(1), 81-88.

- Kuş, A. (2011). Farklı kaynaklı ısı pompalarının ekonomik analizi. *Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.*
- Kutlu, N. ve İsci, A., (2016). Kurutma yöntemlerinin kiraz domatesin kurutma karakteristikleri üzerine etkisi ve matematiksel modellemesi, *Gıda*, 41 (4), 197–204.
- Lemus-Mondaca, R., Betoret, N., Vega-Galvez, A., ve Lara-Aravena, E. (2009). Dehydration characteristics of papaya (*Carica Pubescens*): determination of equilibrium moisture content and diffusion coefficient. *Journal of Food Process Engineering*, 32(5), 645-663.
- Li, L., Wang, B., Wang, Y., ve Liu, J. (2022). Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of hypoglycemic hawthorn. *Food Ferment. Ind.*, 1–10.
- Madamba, P. S. (2003). Thin layer drying models for osmotically pre-dried young coconut. *Drying Technology*, 21(9), 1759-1780.
- Madhiyanon, T., Phila, A., ve Soponronnarit, S. (2009). Models of fluidized bed drying for thin layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), 2849-2854.
- Maqsood, S., Omer, I., ve Eldin, A. K. (2015). Quality attributes, moisture sorption isotherm, phenolic content and antioxidative activities of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) as influenced by method of drying. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 7059-7069.
- Mengeş, H.O. ve Ertekin, C., (2007). Vişne kurutmada kurumanın çeşitli modeller ile açıklanması. *Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(42); 4-10.

- Midilli, A., ve Kucuk, H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44(7), 1111-1122.
- Mirza, M. (2006). *Isı pompalı kurutucunun ısı tasarımı (Doctoral dissertation)*, Yüksek lisans tezi Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir).
- Molina, M.J., ve Rowland, F.S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810-812.
- Nabnean, S., Janjai, S., Thepa, S., Sudaprasert, K., Songprakorp, R., ve Bala, B. K. (2016). Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. *Renewable Energy*, 94, 147-156.
- Nozad, M., Khojastehpour, M., Tabasizadeh, M., Azizi, M., Miraei Ashtiani, S. H., ve Salarikia, A. (2016). Characterization of hot air drying and infrared drying of spearmint (*Mentha spicata* L.) leaves. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10, 466-473.
- Öztekin, Y.B. ve Sacilik, K., (2020), ‘Drying characterization of ‘Ankara’ pear Slices. *Italian Journal of Food Science*, 32; 251-264.
- Pabis, S. (1999). The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2), 187-195.
- Polatci, H., ve Tarhan, S. (2009). Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*Ocimum basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. *Journal of*

Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG), 2009(1), 61
70.

Roberts, J. S., Kidd, D. R., ve Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.

Sacilik, K., Keskin, R., ve Elicin, A. K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of food Engineering*, 73(3), 231-238.

Sadıkoğlu, H. ve Özdemir, M., (2003). Dondurarak kurutma teknolojisi ve evreleri. *GIDA*, 28: (6), 643-649.

Sarıgök, Y. (2019). *Tokat ilinde domates kurutmada farklı kurutma koşullarının kuruma özellikleri ve kalite üzerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.

Samoticha, J., Wojdyło, A., ve Lech, K. (2016). The influence of different drying methods on chemical composition and antioxidant activity in chokeberries. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 484-489.

Sanjuán, N., Lozano, M., García-Pascual, P., ve Mulet, A. (2003). Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum* L var Jaranda). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(7), 697-701.

Sharma, G. P., ve Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 609-617.

Sobukola, O. P., ve Dairo, O. U. (2007). Modeling drying kinetics of fever leaves (*Ocimum viride*) in a convective hot air dryer. *Nigerian Food Journal*, 25 (1), 146-153.

- Sönmez, K., ve Ellialtıoğlu, Ş. Ş. (2014). Domates, karotenoidler ve bunları etkileyen faktörler üzerine bir inceleme. *Derim*, 31(2), 107-130.
- Srinivasa Reddy, I. V. (2020). Preservation of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) by sun drying and dehydration. *Indian Journal of Pure ve Applied Biosciences*, 7(5), 563-566.
- Taheri-Garavand, A., Rafiee, S., ve Keyhani, A. (2011). Effective moisture diffusivity and activation energy of tomato in thin layer dryer during hot air drying. *International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences ve Technologies*, 2(2), 239-248.
- Tosun, S. (2009). *Bazı tarımsal ürünler için ısı pompalı bir kurutucunun geliştirilmesi ve termodinamik analizi*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Tunde-Akintunde, T. Y., ve Ajala, A. (2010). Air drying characteristics of chili pepper. *International Journal of Food Engineering*, 6(1). Article 7.
- Uğuz, M. T. ve Gezici, A., 2021. *Ejder meyvesinin ozmotik dehidrasyonu ve kuruma özelliklerinin değerlendirilmesi*. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2): 149-157.

- Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Oyanadel, R., Torrico, J. S., ve Miranda, M. (2011). Characteristics of convective drying of pepino fruit (*Solanum muricatum* Ait.): Application of Weibull distribution. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 1349-1356.
- Vega-Gálvez, A., Andrés, A., Gonzalez, E., Notte-Cuello, E., Chacana, M., ve Lemus-Mondaca, R. (2009). Mathematical modelling on the drying process of yellow squat lobster (*Cervimunida jhoni*) fishery waste for animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 151(3-4), 268-279.
- Wang, C. Y., ve Singh, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 11(6), 668-672.
- Wojdyło, A., Figiel, A., ve Oszmalański, J. (2009). Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 01337–1343.
- Xu, W., Song, C., Li, Z., Song, F., Hu, S., Li, J., ve Raghavan, G. V. (2018). Temperature gradient control during microwave combined with hot air drying. *Biosystems Engineering*, 169, 175-187.
- Yang, M., ve Ding, C. (2016). Electrohydrodynamic (EHD) drying of the Chinese wolfberry fruits. *SpringerPlus*, 5, 1-20.
- Yilmaz, E. (2001). The chemistry of fresh tomato flavor. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 25(3), 149-155.

- Yüce, I. B. (2019). Kiraz domateslerin kurutma kinetiğinin ve bazı kalite kriterlerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.*
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., ve Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253.
- Zong, Y., Liu, J., Li, B., Qin, G., ve Tian, S. (2010). Effects of yeast antagonists in combination with hot water treatment on postharvest diseases of tomato fruit. *Biological Control*, 54(3), 316-321.
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., ve Van't Riet, K. J. A. E. M. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875-1881.

İnternet Kaynakları

- [1] http://www.kurutma.net/puskurtmeli_kurutucu.html, (20.04.2024)
- [2] <https://www.foodelphi.com/kurutma-teknolojisi>, (12.04.2024)
- [3] <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>, (05.05.2024)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Özeren, B., Doymaz, I., Tunçkal, C. (2024). Examination of drying characteristics of tomatoes and system performance in heat pump dryer. 4th International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies, May 24-25, 2024, Ankara, p. 133.

