T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYASAL VE KIZILÖTESİ ÖN İŞLEMLER UYGULANMIŞ YEŞİL ELMA DİLİMLERİNİN KURUTMA VE REHİDRASYON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ VE TERMODİNAMİK ANALİZİ

Ufuk KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Gıda Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hazal TEKİN ÇAKMAK

İkinci Danışman

Doç. Dr. Yağmur ERİM KÖSE

Şubat, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYASAL VE KIZILÖTESİ ÖN İŞLEMLER UYGULANMIŞ YEŞİL ELMA DİLİMLERİNİN KURUTMA VE REHİDRASYON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ VE TERMODİNAMİK ANALİZİ

Ufuk KILIÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 13.02.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Gıda Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hazal TEKİN ÇAKMAK Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Doç. Dr. Yağmur ERİM KÖSE Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İkinci Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hazal TEKİN ÇAKMAK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Salih KARASU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Alican AKÇİÇEK, Üye
Kocaeli Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hazal Tekin Çakmak'ın sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Kimyasal ve Kızılötesi Ön İşlemler Uygulanmış Yeşil Elma Dilimlerinin Kurutma ve Rehidrasyon Davranışının Modellenmesi ve Termodinamik Analizi" 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.

Bu tez çalışmasının kavramsallaştırılması, planlanması, yürütülmesi, değerlendirilmesi ve metnin yazım süreci dâhil olmak üzere hiçbir aşamasında Üretken Yapay Zekâ teknolojilerinden yararlanılmamış, çalışma tamamen kendi özgün çabamla gerçekleştirilmiştir.

Beyanımın aksinin tespiti hâlinde doğabilecek her türlü idari ve hukuki sorumluluğu kabul ederim. Beyanımın aksinin tespiti hâlinde doğabilecek her türlü idari ve hukuki sorumluluğu kabul ederim.

Ufuk KILIÇ

İmza

TEŞEKKÜR

En başta çalışmamı destekleyen ve bana güvenen Sayın Prof. Dr. Osman Sağdıç hocama minnetlerimi sunuyorum. Aynı zamanda çalışmam boyunca desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hazal Tekin Çakmak'a ve Doç. Dr. Yağmur Erim Köse'ye teşekkürlerimi borç bilirim. Laboratuvar çalışmasında veri toplamama yardımcı olan Prof. Dr. İbrahim Doymaz'a da teşekkür ederim.

Ufuk KILIÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Gıda Kurutmada Temel Prensipler 3

1.2 Meyve ve Sebzelerde Kurutma ve Elma Örneği 4

2 MATERYAL METOT 26

2.1 Materyal 26

2.2 Deneysel Tasarım 27

2.3 Ön İşlemler 28

2.3.1 Kimyasal Ön İşlemler 28

2.3.2 Kızılötesi Ön İşlem 29

2.4 Kurutma Denemeleri (Kabin Kurutucu Koşulları) 29

2.5 Analitik Yöntemler 30

2.5.1 Nem İçeriği ve Nem Oranının Hesaplanması 30

2.5.2 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi 31

2.5.3 Efektif Difüzyon Katsayısı ve Arrhenius Tabanlı Aktivasyon Enerjisi 31

2.5.4 Rehidrasyon Modelleri 32
2.5.5 Termodimaik Parametreler 32
2.6 Renk Değerleri İçin Temel Bileşen Analizi 33
2.7 İstatistik Analiz 33
3 BULGULAR VE TARTIŞMA **34**
3.1 Kuruma Karakteristiklerine Ait Bulgular 34
3.1.1 Farklı Ön İşlem ve Sıcaklığın Elma Dilimlerinin Nem İçeriğine Etkisi 34
3.1.2 Farklı Ön İşlem ve Sıcaklığın Elma Dilimlerinin Rehidrasyon Kapasitesine Etkisi 38
3.2 Matematiksel Modelleme Sonuçları 39
3.2.1 Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi 39
3.2.2 Efektif Nem Difüzyonu ve Arrhenius Tabanlı Aktivasyon Enerjisi 50
3.2.3 Rehidrasyon Kapasitesinin Matematiksel Modellenmesi 55
3.2.4 Termodinamik Parametreler 62
3.2.5 Renk Analiz Sonuçları ve Renk Değerlerine Ait Temel Bileşen Analizi 65
4 SONUÇ **70**
KAYNAKÇA **74**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **83**

SİMGE LİSTESİ

g	Ağırlık ölçü birimi
Ea	Aktivasyon Enerjisi
kB	Boltzmann sabiti (1.381×10^{-23} J K^{-1})
Tg	Cam geçiş sıcaklığı
Me	Denge anındaki nem içeriği
Deff	Efektif difüzyon katsayısı
ΔH	Entalpi değişimi
ΔS	Entropi değişimi
R	Gaz sabiti (8.314 J mol^{-1} K^{-1})
ΔG	Gibb's serbest enerji
W	Güç birimi
k	Hız sabiti
R^2	Belirleme katsayısı
IR	Kızılötesi
χ^2	Ki-Kare
t	Kuruma süresi (saniye)
T	Kurutma sıcaklığı (°C)
a, b, k, n, α, β	Modelleme Katsayıları
°C	Sıcaklık ölçü birimi
T	Mutlak sıcaklığı (K)
M	Nem içeriği (g su / g kuru madde)
MR	Nem oranı (birimsiz)

m	Numunenin ağırlığı (g)
KM	Kuru madde miktarı (g)
L	Numunenin yarı kalınlığı (m)
D_0	Ön-üstel katsayı (m²/s)
h□	Planck sabiti (6.626×10^{-34} J s)

KISALTMA LİSTESİ

AA	Askorbik Asit
K	Kontrol
PCA	Temel Bileşen Analizi
POD	Peroksidaz
PPO	Polifenol Oksidaz
RMSE	Ortalama kare hata karekökü
SA	Sitrik Asit

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait nem içeriği **35**

Şekil 3.2 Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait rehidrasyon oranları **38**

Şekil 3.3 Tahmini ve deneysel nem oranlarının uyumu (Midilli-Küçük modeli) **49**

Şekil 3.4 Kontrol örneğine ait difüzyon katsayısı- sıcaklık ilişkisi **52**

Şekil 3.5 Sitrik asit örneğine ait difüzyon katsayısı sıcaklık ilişkisi **52**

Şekil 3.6 Askorbik asit örneğine ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi **53**

Şekil 3.7 Potasyum karbonat (K_2CO_3) örneğine ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi **53**

Şekil 3.8 Kızıl ötesi (IR) örneğine ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi **54**

Şekil 3.9 Farklı ön işlemlere ait aktivasyon enerjisi değerleri **54**

Şekil 3.10 Elma dilimlerin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait renk parametrelerinin (L*, a*, b* ve ΔE) temel bileşen analizi (PCA) skor grafiği **67**

Şekil 3.11 Elma dilimlerin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait renk parametrelerinin (L*, a*, b* ve ΔE) temel bileşen analizi (PCA) biplot grafiği **68**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Çalışmada kullanılan ince tabaka kurutma modelleri **31**

Tablo 2.2 Çalışmada kullanılan rehidrasyon kapasitesi modelleri **32**

Tablo 3.1 Kontrol (K) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri **40**

Tablo 3.2 Askorbik Asit (AA) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri ... **42**

Tablo 3.3 Sitrik Asit (SA) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri **44**

Tablo 3.4 Potasyum karbonat (K_2CO_3) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri **46**

Tablo 3.5 Kızılötesi (IR) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri **48**

Tablo 3.6 Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve ön işlemlere ait Deff değerleri **51**

Tablo 3.7 Kontrol (K) örneklerine ait rehidrasyon modelleri **57**

Tablo 3.8 Sitrik aist (SA) örneklerine ait rehidrasyon modelleri **58**

Tablo 3.9 Askorbik asit (AA) örneklerine ait rehidrasyon modelleri **59**

Tablo 3.10 Potasyum karbonat (K2CO3) örneklerine ait rehidrasyon modelleri .. **60**

Tablo 3.11 Kızıl ötesi (IR) örneklerine ait rehidrasyon modelleri **61**

Tablo 3.12 Elma dilimlerine ait kurutma termodinamik parametreleri **64**

Tablo 3.13 Elma dilimlerine ait renk parametreleri **66**

ÖZET

Kimyasal ve Kızılötesi Ön İşlemler Uygulanmış Yeşil Elma Dilimlerinin Kurutma ve Rehidrasyon Davranışının Modellenmesi ve Termodinamik Analizi

Ufuk KILIÇ

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hazal TEKİN ÇAKMAK

İkinci Danışman: Doç. Dr. Yağmur ERİM KÖSE

Bilinen en eski muhafaza yöntemlerinden biri olan kurutma, günümüzde hem geleneksel hem de endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılan temel proseslerdendir. Bu çalışmada, endüstride klasik kurutma metodu olarak kabul edilen sıcak hava konvektif kurutma prosesi farklı önişlemler ile desteklenerek, kurutma süresinin ve enerji gereksiniminin azaltılması ile proses verimliliğinin arttırılması hedeflenmiştir.

Bu amaçla farklı kimyasal çözeltilere daldırılarak (%2 potasyum karbonate + % 0,5 zeytinyağı çözeltisi, %1 citric acid çözeltisi ve %1 ascorbic acid çözeltisi) ve kızıl ötesi ön işlem (74 W-30 dakika) uygulanarak 0.5 cm kalınlığındaki elma dilimleri (Granny Smith) 45,55,65 ve 75 °C de sabit hava hızında, kabin tipi kurutucuda kurumaya bırakılmıştır.

Kuruma prosesi boyunca elma dilimlerinin nem oranının zamana bağlı değişimi farklı ince tabaka modelleri kullanarak ele alınmış ve Midilli-Küçük modelinin elma dilimlerinin kuruma davranışını diğerlerinden daha iyi açıkladığı tespit

edilmiştir. Farklı ön işlem uygulamalarının kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kinetiğine etkisini incelemek amacıyla kurutulan modeller arasında ise en iyi uyum gösteren modelin sırasıyla Weibull ve Peleg modelleri olduğu belirlenmiştir. Arrhenius denklemi kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisine ait en düşük değer kızıl ötesi ön işlemiyle kurutulmuş örneklerde (12.912 kJ/mol), en yüksek değer ise kontrol örneklerinde (22.227 kJ/mol) görülmüştür. Örneklerin termodinamik parametreleri her ön işlem için farklılık göstermekle beraber, kurutma entalpisi (ΔH) ve entropisi (ΔS) sıcaklığın artmasıyla azalırken, Gibbs serbest enerjisi (ΔG) sıcaklığın artmasıyla artmıştır.

Kurutma prosesi sonunda taze elma dilimlerinin sahip olduğu renk özelliklerini (L*, a*, b* ve ΔE) en iyi koruyan örneklerin kızıl ötesi ile ön işlem uygulanan örnekler olduğu tespit edilmiştir. Farklı ön işlemlerin renk kalitesi üzerindeki etkileri, çok değişkenli istatistiksel bir yöntem olan temel bileşen analizi (PCA) ile kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma kinetiği, rehidrasyon kinetiği, matematiksel modelleme, termodinamik, temel bileşen analizi

ABSTRACT

Modeling of Drying and Rehydration Behavior and Thermodynamic Analysis of Green Apple Slices Pretreated with Chemical and Infrared Methods

Ufuk KILIÇ

Department of Food Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Zeynep Hazal TEKİN ÇAKMAK
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yağmur ERİM KÖSE

Drying is one of the oldest food preservation methods and continues to be widely used today at both traditional and industrial scales. In this study, the conventional hot air convective drying process, which is commonly employed in the food industry, was supported with different pretreatment methods in order to reduce drying time and energy consumption and to improve overall process efficiency.

For this purpose, Granny Smith apple slices with a thickness of 0.5 cm were subjected to chemical pretreatments by immersion in solutions of 2% potassium carbonate + 0.5% olive oil, 1% citric acid, and 1% ascorbic acid, as well as infrared pretreatment (74W-30 minute). The pretreated samples were then dried in a cabinet-type dryer at constant air velocity at drying temperatures of 45, 55, 65, and 75 °C.

During the drying process, the time-dependent changes in moisture ratio were evaluated using different thin-layer drying models, and the Midilli–Küçük model was found to provide the best representation of the drying behavior of apple slices.

To investigate the effects of pretreatments on the rehydration behavior of dried samples, various kinetic models were applied, among which the Weibull and Peleg models showed the best agreement depending on the pretreatment conditions.

The lowest activation energy value obtained using the Arrhenius equation was observed in samples dried with infrared pretreatment (12.912 kJ/mol), while the highest value was found in the control samples (22.227 kJ/mol). Although thermodynamic parameters varied according to the applied pretreatments, drying enthalpy (ΔH) and entropy (ΔS) decreased with increasing temperature, while Gibbs free energy (ΔG) increased as temperature increased.

At the end of the drying process, infrared-pretreated samples exhibited the best preservation of the original color characteristics of fresh apple slices (L*, a*, b*, and ΔE). The effects of different pretreatments on color quality were further evaluated using principal component analysis (PCA), allowing a comprehensive assessment of the relationships among color parameters.

Keywords: Drying kinetics, rehydration kinetics, mathematical modeling, thermodynamics, principal component analysis (PCA).

1
GİRİŞ

Gıda ürünlerinin üretimden tüketime kadar geçen süreçte kalite ve güvenliğinin korunması, gıda mühendisliğinin temel hedefleri arasında yer almaktadır. Özellikle meyve ve sebzeler gibi yüksek nem içeriğine sahip ürünler, hasat sonrası dönemde mikrobiyolojik, enzimatik ve kimyasal bozulmalara karşı oldukça hassas bir yapı sergilemektedir. Bu durum, söz konusu ürünlerin raf ömrünü sınırlamakta ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Meyve ve sebzelerin daha uzun süre muhafaza edilebilmesi, yıl boyunca tüketiciye sunulabilmesi ve katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilmesi için çeşitli muhafaza ve işleme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında kurutma, tarihsel olarak en eski ve en yaygın kullanılan gıda muhafaza tekniklerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Kurutma işlemi, gıda materyallerinin bünyesinde bulunan suyun kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması yoluyla ürünün daha uzun süre dayanabilir hâle getirilmesini amaçlayan temel bir gıda işleme prosesidir. Kurutma sayesinde su aktivitesi düşürülerek mikroorganizmaların gelişimi ve enzimatik reaksiyonlar büyük ölçüde sınırlandırılmakta, böylece ürünlerin bozulma hızı yavaşlatılmaktadır. Bununla birlikte kurutma, yalnızca bir muhafaza yöntemi değil; aynı zamanda ürün hacminin azaltılması, depolama ve taşıma maliyetlerinin düşürülmesi ve yeni ürün formlarının geliştirilmesi açısından da önemli avantajlar sunmaktadır.

Gıda kurutma prosesleri, ısı ve kütle transferinin eş zamanlı olarak gerçekleştiği karmaşık bir yapıya sahiptir. Kurutma sırasında ürün yüzeyine iletilen ısı, bünyedeki suyun buharlaşmasını sağlarken; oluşan buhar ve iç bölgelerdeki nem, kütle transferi mekanizmaları ile ürün içerisinden dış ortama taşınmaktadır. Bu süreçte ürünün fiziksel yapısı, kimyasal bileşimi, kurutma sıcaklığı, hava hızı, bağıl nem ve ürün geometrisi gibi çok sayıda parametre kurutma davranışını doğrudan

etkilemektedir. Bu nedenle kurutma işlemi, basit bir su uzaklaştırma sürecinden ziyade çok sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesini gerektiren bir proses olarak ele alınmaktadır.

Meyve ve sebzelerin kurutulmasında karşılaşılan en önemli zorluklardan biri, kurutma süresi ile ürün kalitesi arasındaki dengenin sağlanmasıdır. Yüksek sıcaklıklar ve uzun kurutma süreleri, kurutma hızını artırarak proses verimliliği açısından avantaj sağlayabilmekte; ancak aynı zamanda renk kaybı, büzülme, doku bozulması ve besin değerinde azalma gibi kalite kayıplarına yol açabilmektedir. Buna karşılık, düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen kurutma işlemleri kaliteyi koruyabilmekle birlikte, uzun işlem süreleri ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle endüstriyel açıdan dezavantaj oluşturabilmektedir. Bu durum, kurutma proseslerinin hem kinetik hem de kalite odaklı olarak optimize edilmesini gerekli kılmaktadır.

Elma, dünya genelinde yaygın olarak tüketilen ve işlenen bir meyve olup, kurutma uygulamaları açısından da önemli bir model ürün olarak değerlendirilmektedir. Yüksek su içeriği, çözünür şekerlerce zengin yapısı ve fenolik bileşikler içermesi, elmanın kurutma sırasında hem teknolojik hem de kalite açısından çeşitli zorluklar sergilemesine neden olmaktadır. Elma kurutma işlemleri sırasında büzülme, kararma ve rehidrasyon kapasitesinde azalma gibi kalite problemleri sıklıkla gözlenmekte; bu problemler kurutma koşulları ve uygulanan ön işlemlerle yakından ilişkilendirilmektedir.

Son yıllarda gıda kurutma çalışmalarında, geleneksel sıcak hava kurutmanın yanı sıra farklı kurutma teknikleri ve ön işlem uygulamaları üzerine yoğunlaşılmıştır. Kimyasal ön işlemler, ürün yüzey özelliklerini ve hücresel yapıyı değiştirerek kurutma hızını artırabilmekte ve kalite kayıplarını sınırlayabilmektedir. Benzer şekilde kızıl ötesi gibi alternatif veya destekleyici ısıtma yöntemleri, daha kısa kurutma süreleri ve daha yüksek enerji verimliliği potansiyeli sunmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin ve ön işlemlerin kurutma kinetiği, enerji gereksinimi ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Kurutma proseslerinin bilimsel olarak değerlendirilmesinde, ince tabaka kurutma modellemesi yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu modeller, kurutma sırasında nem içeriğindeki zamana bağlı değişimi matematiksel olarak

tanımlayarak farklı kurutma koşullarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca etkin nem difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi ve diğer termodinamik parametreler, kurutma sürecinin enerji gereksinimi ve mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, kurutma kinetiği ve termodinamik parametrelerin ürün kalite özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi, proses optimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, farklı kimyasal ön işlemler ve kızıl ötesi ön işlem uygulanarak elma dilimlerinin kabin tipi kurutucuda farklı sıcaklık ve dilim kalınlıklarında kurutulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında kurutma kinetiği ince tabaka kurutma modelleri kullanılarak değerlendirilmiş; etkin nem difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi ve diğer termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Ayrıca kurutulmuş elma örneklerinin rehidrasyon kinetiği ve renk özellikleri belirlenmiş; elde edilen tüm veriler çok değişkenli istatistiksel yöntemler kullanılarak bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışma, elma kurutma proseslerinde ön işlem türü, kurutma koşulları ve ürün kalitesi arasındaki ilişkilerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamayı hedeflemekte; kurutma kinetiği, enerji gereksinimi ve kalite parametrelerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır.

1.1 Gıda Kurutmada Temel Prensipler

Kurutma, gıda maddelerinin bünyesinde bulunan suyun kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması yoluyla ürünün daha uzun süre muhafaza edilebilir hâle getirilmesini amaçlayan temel bir gıda işleme yöntemidir. Bu işlem, ürünün satışa sunulmadan önce görünüm, yapısal bütünlük ve dayanım özelliklerini en iyi şekilde koruyacağı uygun nem seviyesine düşürülmesini hedefler. Kurutma sayesinde su aktivitesi azaltılarak mikrobiyal gelişim ve enzimatik reaksiyonlar büyük ölçüde sınırlandırılmakta, böylece gıdaların raf ömrü uzatılmaktadır (Evranuz, 1998; Rahman, 1999).

Gıda kurutma sürecinde eş zamanlı olarak iki temel taşınım mekanizması gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki, ürün bünyesindeki sıvı fazın buhar fazına dönüşebilmesi için gerekli enerjinin ürüne iletilmesini ifade eden ısı transferidir. İkinci mekanizma ise, buharlaşan suyun ve ürün iç kısımlarında bulunan nemin

yüzeye doğru taşınarak çevre ortamına uzaklaştırılmasını kapsayan kütle transferidir. Isı transferi, suyun faz değişimi için gerekli enerjiyi sağlarken; kütle transferi, buharlaşan suyun ürün içerisinden dış ortama taşınmasını mümkün kılmaktadır. Bu iki mekanizmanın eş zamanlı olarak gerçekleşmesi, kurutma hızını ve kurutma kinetiğini doğrudan etkilemektedir (Mujumdar, 2006; Ashrae, 2003).

Gıdalarda bulunan su, yapı içerisinde farklı şekillerde tutulabilmektedir. Serbest nem, hücreler arası boşluklarda bulunan ve nispeten kolay uzaklaştırılabilen suyu ifade ederken; bağlı nem, katı materyalin mikroyapısında fiziksel olarak tutulan veya katı–sıvı faz içerisinde çözünmüş hâlde bulunan suyu tanımlamaktadır. Zayıf etkileşimlerle bağlanan bu nem türü, saf suya kıyasla daha düşük bir buhar basıncına sahiptir ve uzaklaştırılması daha fazla enerji gerektirmektedir (Lewicki, 1998a). Kurutma işlemi ilerledikçe öncelikle serbest nem uzaklaştırılmakta, daha sonra bağlı nemin giderilmesiyle birlikte kurutma hızında belirgin bir azalma gözlenmektedir (Barbosa-Cánovas ve Vega-Mercado, 1996).

Kurutma sürecinde su aktivitesinin azalması, gıdaların mikrobiyolojik ve kimyasal stabilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Su aktivitesindeki düşüş, mikroorganizmaların çoğalmasını ve enzimatik faaliyetleri sınırlandırarak ürünün bozulmasını geciktirmekte ve depolama süresini uzatmaktadır. Bu nedenle kurutma işlemi, yalnızca suyun uzaklaştırılması değil, aynı zamanda ürünün kalite ve güvenliğinin korunmasını sağlayan çok yönlü bir proses olarak değerlendirilmektedir (Rahman, 1999; Cemeroğlu vd., 2003).

1.2 Meyve ve Sebzelerde Kurutma ve Elma Örneği

Meyve ve sebzeler, yapıları gereği yüksek oranda su içeren gıda grupları arasında yer almakta olup, taze hâllerinde genellikle %80–95 düzeyinde nem içeriğine sahiptirler. Bu yüksek su içeriği, ürünlerin mikrobiyolojik ve enzimatik bozulmaya karşı hassas olmasına neden olmakta ve raf ömrünü önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Kurutma işlemi ile meyve ve sebzelerin bünyesindeki suyun büyük bir kısmı uzaklaştırılarak nem içeriği yaklaşık %10–20 seviyelerine düşürülmekte, böylece ürünlerin depolama stabilitesi ve dayanıklılığı artırılmaktadır (Evranuz, 1998; Rahman, 1999).

Elma, yüksek su içeriğinin yanı sıra şekerler, organik asitler ve lifli hücresel yapı bakımından zengin bir meyve olup, kurutma işlemlerine uygun bir ürün olarak değerlendirilmektedir. Elmanın içerdiği çözünmüş maddeler, özellikle şekerler ve organik asitler, suyun buhar basıncını düşürerek kurutma davranışını doğrudan etkilemektedir. Çözünmüş madde içeriği yüksek olan meyvelerde suyun uzaklaştırılması daha zor olmakta ve bu durum kurutma hızının azalmasına neden olmaktadır (Potter ve Hotchkiss, 1998; Cemeroğlu vd., 2003). Ayrıca elmanın hücre duvarı yapısı ve hücreler arası boşlukları, kurutma sırasında suyun difüzyon yoluyla taşınmasını belirleyen önemli faktörler arasında yer almaktadır.

Elmaların kurutulması sırasında ürün kalitesini etkileyen çeşitli fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmekte ve büzülme ilk ve etkin olarak hissedilen değişim olmaktadır. Kurutma sürecinde suyun uzaklaştırılması ve uygulanan ısıl işlemler, elmanın hacminde azalmaya ve hücresel yapısında deformasyona neden olmaktadır. Meydana gelen büzülme, ürünün dış görünümünü, tekstürel özelliklerini ve rehidrasyon kapasitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Krokida ve Maroulis, 1997; Lozano vd., 1983). Kurutma koşullarının uygun seçilmemesi durumunda, yüzeyde hızlı kuruma sonucu kabuk oluşumu meydana gelmekte ve bu durum iç kısımlardaki nemin dışarıya taşınmasını zorlaştırarak ürünün homojen olmayan bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır (Cemeroğlu vd., 2003).

Kurutma sırasında elmalarda görülen bir diğer önemli kalite problemi kararma reaksiyonlarıdır. Enzimatik esmerleşme, özellikle polifenol oksidaz enziminin etkisiyle fenolik bileşiklerin oksidasyonu sonucu ortaya çıkarken; enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları ise Maillard reaksiyonu ve karamelizasyon gibi mekanizmalarla gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar ürün renginde koyulaşmaya, besin değerinde azalmaya ve duyusal özelliklerde olumsuz değişimlere yol açmaktadır (Eskin, 1990; Okos vd., 2007). Kurutma sıcaklığı, süre ve ürünün nem içeriği, bu reaksiyonların hızını ve şiddetini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Cemeroğlu vd., 2003).

Elmanın kurutulması sırasında meydana gelen yapısal değişimler, ürünün rehidrasyon kapasitesini de doğrudan etkilemektedir. Kurutma esnasında hücresel yapının bozulması, gözeneklerin kapanması ve büzülmenin artması, ürünün yeniden su alma yeteneğini azaltmaktadır. Rehidrasyon kapasitesi, kurutulmuş ürünlerin kalite değerlendirmesinde önemli bir parametre olup, kurutma öncesi

yapısına ve su içeriğine ne ölçüde geri dönebildiğinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Lewicki, 1998b).

Bu nedenle, elma kurutma çalışmalarında yalnızca kurutma süresi ve nem içeriği değil, aynı zamanda büzülme, kararma ve rehidrasyon davranışı gibi kalite parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Elma, yüksek nem içeriği (%80–85), çözünür şekerlerce zengin yapısı ve belirgin hücresel organizasyonu nedeniyle kurutma işlemleri açısından özel bir ürün grubu olarak değerlendirilmektedir. Elma dokusu, pektin, selüloz ve hemiselülozdan oluşan hücre duvarı matrisi ile karakterize edilmekte olup, bu yapı kurutma sırasında meydana gelen nem difüzyonu, büzülme ve yapısal değişimler üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde, elmanın hücre duvarı bileşiminin ve hücreler arası boşluk yapısının, kurutma kinetiği ve rehidrasyon kapasitesi ile doğrudan ilişkili olduğu bildirilmektedir (Lewicki ve Pawlak, 2003).

Elma hücre duvarında önemli bir bileşen olan pektin, kurutma sırasında meydana gelen yapısal değişimlerde kritik bir rol oynamaktadır. Kurutma sıcaklığının artmasıyla birlikte pektik maddelerde çözünürlük artışı ve hücre duvarı yumuşaması meydana gelmekte; bu durum nemin hücre içinden yüzeye doğru taşınmasını kolaylaştırabilmektedir. Ancak aşırı pektin parçalanması ve hücre duvarı bütünlüğünün bozulması, kurutma sonrasında gözenek yapısının kapanmasına ve rehidrasyon kapasitesinin azalmasına yol açabilmektedir (Krokida ve Maroulis, 2001; Lewicki, 1998b).

Elmanın kurutma davranışını etkileyen bir diğer önemli faktör, yüksek fruktoz ve glikoz içeriğidir. Çözünür şekerler, kurutma sırasında su aktivitesinin azalmasına rağmen amorf fazda kalabilmekte ve cam geçiş sıcaklığını (Tg) düşürerek ürünün termal stabilitesini etkilemektedir. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklıklarda kurutulan elma dilimlerinde yapışkanlık, büzülme ve renk bozulmalarının artmasına neden olabilmektedir. Literatürde, elmanın yüksek şeker içeriğinin hem kurutma kinetiği hem de nihai ürün kalitesi üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturabildiği rapor edilmiştir (Ratti, 2001; Vega-Gálvez vd., 2012).

Elma aynı zamanda fenolik bileşikler açısından zengin bir meyve olup, kurutma sırasında renk değişimleri büyük ölçüde bu bileşiklerin oksidasyonu ile ilişkilidir. Polifenol oksidaz (PPO) enziminin aktivitesi sonucu meydana gelen enzimatik

esmerleşme, elma kurutma çalışmalarında en sık karşılaşılan kalite problemlerinden biridir. Kurutma sırasında sıcaklık, oksijen varlığı ve ürün yüzey alanının artması, bu reaksiyonları hızlandırarak L* değerinde düşüşe ve a* ile b* değerlerinde değişimlere yol açabilmektedir (Maskan, 2001; Shrestha vd., 2020).

Elmanın yapısal ve kimyasal özellikleri, yalnızca kurutma kinetiğini değil, aynı zamanda rehidrasyon davranışını da belirgin biçimde etkilemektedir. Kurutma sırasında hücre duvarı bütünlüğünün korunabildiği ve gözenekli yapının sürdürülebildiği örneklerde, rehidrasyon sırasında suyun hücre içine daha kolay nüfuz edebildiği bildirilmektedir. Buna karşılık, yüksek sıcaklık veya uygunsuz kurutma koşulları altında gerçekleştirilen işlemler, hücresel çökme ve yüzey sertleşmesine neden olarak rehidrasyon kapasitesini sınırlayabilmektedir (Krokida vd., 2003; Lewicki, 1998b). Bu nedenlerle elma, kurutma proseslerinde kurutma kinetiği, termodinamik parametreler, rehidrasyon davranışı ve renk değişimlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir model ürün olarak literatürde sıklıkla tercih edilmektedir. Elmanın bu çok bileşenli yapısı, farklı sıcaklık, dilim kalınlığı ve ön işlem uygulamalarının etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi açısından uygun bir araştırma altyapısı sunmaktadır.

1.3 Kurutmada Ön İşlemler

1.3.1 Kimyasal Ön İşlemler

Elma dilimlerinin kurutulmasında kimyasal ön işlemler, yalnızca kuruma hızını değil; aynı zamanda enzimatik esmerleşme, renk korunumu, rehidrasyon kapasitesi ve doku bütünlüğü gibi kritik kalite parametrelerini de doğrudan etkiler. Meyve dokusunda suyun uzaklaştırılması, çoğunlukla düşen hız döneminde gerçekleştiğinden, ön işlemlerle ürün yüzeyi ve hücre duvarı geçirgenliğinin değiştirilmesi; kütle aktarım direncini azaltarak kurutma kinetiğini iyileştirebilir (Onwude vd., 2016). Bununla birlikte, elma gibi fenolik bileşiklerce zengin ürünlerde kalite kaybının en önemli nedenlerinden biri, polifenol oksidaz (PPO) ve peroksidaz (POD) aktiviteleri sonucu gelişen enzimatik kararmadır. Bu nedenle kimyasal ön işlemlerin temel hedefi; (i) PPO/POD aktivitesini baskılamak, (ii) pH'ı düşürerek reaksiyon hızını azaltmak, (iii) oksijen erişimini sınırlandırmak ve/veya

(iv) indirgen ortam oluşturarak o-kinonların pigmentlere dönüşümünü yavaşlatmak şeklinde özetlenebilir (Shrestha vd., 2020). Bu tez kapsamında elma dilimlerine uygulanan ön işlemler; %1 sitrik asit, %1 askorbik asit ve %2 potasyum karbonat + %0,5 zeytinyağı çözeltileridir. Bu çözeltiler, literatürde yaygın olarak kullanılan kimyasal stratejilerle uyumludur; ancak etki mekanizmaları farklıdır ve bu farklar sonuçların yorumlanmasında belirleyici olacaktır.

1.3.1.1 Organik asit çözeltileri

Sitrik asit (SA), elma yüzeyinde pH'yı düşürerek polifenol oksidaz (PPO) enzimi için daha az elverişli bir reaksiyon ortamı oluşturmakta ve aynı zamanda metal iyonlarını şelatlama özelliği sayesinde (özellikle PPO'nun bakır içeren aktif bölgesiyle ilişkili süreçlerde) enzimatik esmerleşme reaksiyonlarını sınırlandırabilmektedir (Sapers ve Miller, 1998; Yoruk ve Marshall, 2003). Elma dilimlerinde sitrik asit ön işleminin kurutma davranışı ve rehidrasyon özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarda, bu uygulamanın hem kurutma hızını hem de rehidrasyon davranışını etkileyebildiği; söz konusu etkilerin ise ürün dokusunda meydana gelen mikroyapısal değişimler ve yüzey koşullarındaki farklılaşmalarla ilişkili olduğu raporlanmıştır (Doymaz, 2010).

Askorbik asit (AA) ise literatürde daha çok indirgen ajan ve antioksidan özellikleriyle öne çıkmaktadır. PPO aktivitesi sonucu oluşan o-kinonların tekrar fenolik forma indirgenmesi yoluyla esmerleşme reaksiyonlarını geciktirebilmekte ve bu sayede renk stabilitesinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Moon vd., 2020). Elma dilimleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, askorbik asidin tek başına veya sitrik asit ile kullanımının renk korunumu açısından etkili olduğu; bazı koşullarda kısa süreli ısıl uygulamalarla kombine edildiğinde enzim aktivitelerinin daha belirgin biçimde baskılanabildiği gösterilmiştir (Chow vd., 2011; Yan vd., 2017; Shrestha vd., 2020).

Organik asit ön işlemlerinin etki mekanizmaları literatürde farklı eksenlerde ele alınmaktadır. Askorbik asit, oksidatif reaksiyonları doğrudan baskılayarak enzimatik esmerleşmenin geciktirilmesinde etkili olurken; sitrik asit, pH düşürme ve metal iyonlarını şelatlama mekanizmaları aracılığıyla polifenol oksidaz aktivitesini sınırlandırmaktadır. Bununla birlikte, bu ön işlemlerin kurutma hızında meydana getirdiği değişimlerin yalnızca kimyasal etkileşimlerle sınırlı olmadığı,

aynı zamanda ürün yüzeyi ve hücresel yapı üzerinde oluşturdukları ikincil etkilerle de ilişkili olduğu bildirilmektedir. Hücre duvarı yumuşaması, çözünür pektin miktarındaki artış ve yüzey ıslanabilirliğinde meydana gelen değişimler, suyun ürün içerisinden difüzyonunu etkileyerek kurutma kinetiğinde farklılıklara yol açabilmektedir (Onwude vd., 2016; Shrestha vd., 2020).

1.3.1.2 Alkali emülsiyon yaklaşımı

Potasyum karbonat ve yağ içeren emülsiyonlar, özellikle yüzeyinde belirgin mumsu tabaka bulunan meyvelerde (örneğin üzüm) kurutma öncesi ön işlem olarak yaygın şekilde kullanılmıştır. Bu tür uygulamaların temel amacı, meyve yüzeyinde mikro çatlaklar oluşturarak yüzey bariyerini zayıflatmak ve suyun ürün içerisinden difüzyonunu kolaylaştırmaktır. Literatürde, potasyum karbonat ve yağ içeren çözeltilerin kurutma süresini kısaltabildiği ve yüzeyden nem uzaklaştırılmasını hızlandırdığı bildirilmiştir (Doymaz, 2006).

Kurutma prosesinde yüzey bariyerinin zayıflatılması, dış kütle aktarım direncinin azalmasına yol açmakta ve bu durum ince tabaka kurutma modellerinin parametreleri üzerinde belirgin etkilere neden olmaktadır. Özellikle hız sabiti (k) gibi kinetik parametrelerde anlamlı artışlar gözlenebildiği, bunun da kurutma kinetiğinin hızlandığını gösterdiği rapor edilmiştir (Doymaz, 2006). Bu tür değişimler, yüzey koşullarının kurutma davranışı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

Elma özelinde potasyum karbonat + yağ uygulaması, üzüm gibi yoğun mumsu tabakaya sahip meyvelerdeki kadar yaygın bir kullanım alanına sahip olmamakla birlikte, prensip olarak yüzey ıslanabilirliğini ve geçirgenliği değiştirerek kurutma kinetiğini etkileyebilmektedir. Yüzey özelliklerindeki bu değişimlerin, suyun ürün içerisinden taşınma mekanizmasını modifiye ederek kurutma hızında artışa yol açabileceği bildirilmektedir.

Bununla birlikte, kurutma hızındaki artışın her zaman ürün kalitesinde iyileşme anlamına gelmediği; özellikle yüzeyde aşırı yapısal hasar oluşması durumunda, rehidrasyon sırasında su tutma kapasitesinin ve yapısal geri kazanımın azalabileceği literatürde vurgulanmaktadır (Onwude vd., 2016).

1.3.1.3 Elma Kurutmada Kimyasal Ön İşlemler

Elma kurutma çalışmalarında askorbik asit ve sitrik asit dışındaki kimyasal ön işlemler de literatürde yaygın olarak rapor edilmiştir. Bu ön işlemler arasındasülfitler ve metabisülfitler (potasyum veya sodyum metabisülfit gibi) enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşmenin kontrolünde yüksek etkinlik göstermeleri nedeniyle uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak bu bileşiklerin katkı mevzuatı kapsamındaki sınırlamaları, duyusal özellikler üzerindeki olası olumsuz etkileri ve tüketici beklentilerinin "temiz etiket" yönünde gelişmesi, alternatif kimyasal ön işlemlerin araştırılmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, askorbik asit ve sitrik asit gibi organik asitlerin kullanımı, literatürde daha kabul edilebilir ve güvenli seçenekler arasında değerlendirilmektedir (Moon vd., 2020; Shrestha vd., 2020). Literatürde ayrıca tuz çözeltileri (NaCl) ve kükürt içermeyen anti-esmerleşme kombinasyonlarının da elma kurutma çalışmalarında kullanıldığı bildirilmektedir. Özellikle askorbik asit–sitrik asit veya askorbik asit–sodyum klorür kombinasyonlarının, polifenol oksidaz aktivitesinin kontrolünde daha etkili sonuçlar verebildiği rapor edilmiştir. Bu tür kombinasyonlar, enzimatik esmerleşmenin baskılanması açısından pratik çözümler sunmakla birlikte, farklı kimyasal bileşenlerin birlikte kullanımının ürün dokusu ve rehidrasyon özellikleri üzerindeki etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Yan vd., 2017; Wang vd., 2019).Kalsiyum tuzları (kalsiyum askorbat veya kalsiyum klorür gibi) ise hücre duvarı stabilitesini artırarak doku sertliğinin korunmasına katkı sağlamakta ve bazı çalışmalarda rehidrasyon kapasitesi ile tekstürel özellikler üzerinde olumlu etkiler göstermektedir. Bununla birlikte, bu tür uygulamaların temel etkisi yapısal bütünlüğün korunması olup, kurutma kinetiği ve esmerleşme kontrolü üzerindeki etkileri sınırlı kalabilmektedir (Oms-Oliu vd., 2010)

Genel olarak kimyasal ön işlemler, kurutma prosesinde gerçekleşen ısı ve kütle transfer mekanizmalarını değiştirerek ince tabaka kurutma modelleme parametreleri üzerinde belirgin farklılıklara yol açabilmektedir. Ön işlem türüne bağlı olarak Page, Henderson–Pabis gibi kurutma modellerinin hız sabitleri ve uygunluk kriterlerinde değişimler gözlenmekte; ayrıca etkin difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi gibi termodinamik parametrelerin de etkilendiği bildirilmektedir (Doymaz, 2010; Nieto vd., 1998). Bu nedenle, farklı ön işlem–kalınlık–sıcaklık kombinasyonlarının birlikte değerlendirilmesi ve çok değişkenli

istatistiksel yöntemler, özellikle temel bileşenler analizi (PCA), kullanılarak yorumlanması; kurutma kinetiği ve kalite parametreleri arasındaki ilişkilerin bütüncül olarak ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

1.3.2 Kızıl ötesi Ön İşlem

Kızıl ötesi ısıtma, elektromanyetik spektrumda 0.78–1000 μm dalga boyu aralığında yer alan radyasyonun gıda materyali tarafından absorbe edilmesi ve bu enerjinin moleküler titreşimler yoluyla ısı enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Gıda materyali tarafından absorbe edilen IR radyasyonu, özellikle su moleküllerinin titreşimini artırarak hızlı ve doğrudan ısınmaya neden olmakta; bu durum yüzey ve iç bölgelerde kısa sürede sıcaklık artışı sağlayarak nem taşınımını hızlandırmaktadır (Krishnamurthy vd., 2008; Delfiya vd., 2022).

IR ısıtmanın temel avantajlarından biri, konvansiyonel sıcak hava kurutmaya kıyasla daha hızlı ısı transferi sağlaması ve kurutma süresini önemli ölçüde kısaltabilmesidir. IR uygulamasında ürün yüzeyinde oluşan hızlı sıcaklık artışı, iç kısımlarda su buhar basıncının yükselmesine neden olmakta ve bu durum nemin içten dışa doğru difüzyonunu hızlandırmaktadır. Aynı zamanda yüzeydeki nemin daha kısa sürede uzaklaştırılması, kütle aktarım direncinin azalmasına katkı sağlamaktadır (Sakai ve Hanzawa, 1994; Rastogi, 2012).

Literatürde IR ön işlemin kurutma süresi ve enerji verimliliği üzerinde belirgin olumlu etkiler sağladığı bildirilmektedir. IR ile gerçekleştirilen veya IR destekli kurutma uygulamalarında, daha yüksek kurutma hızları ve daha düşük özgül enerji tüketimi (SEC) değerleri elde edildiği; bunun da enerji açısından daha verimli bir proses sunduğu rapor edilmiştir. Özellikle IR–sıcak hava kombinasyonlarının, yalnızca sıcak hava kurutmaya kıyasla hem kurutma süresini kısalttığı hem de termal verimliliği artırdığı belirtilmektedir (Hebbar vd., 2004; El-Mesery ve Mwithiga, 2015).

IR ön işlemin kalite özellikleri üzerindeki etkileri de literatürde kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Daha kısa işlem süreleri sayesinde ısıl hasarın sınırlanması, renk değişiminin ve büzülmenin azaltılmasına katkı sağlamakta; özellikle L* değerinin daha iyi korunabildiği rapor edilmektedir. Bununla birlikte, IR uygulamasının ürün mikroyapısında oluşturduğu değişimlerin, rehidrasyon kapasitesi üzerinde de belirleyici olduğu bildirilmektedir. Uygun IR koşullarında kurutulan ürünlerde,

gözenekli yapının daha iyi korunması sayesinde rehidrasyon oranlarının arttığı; ancak yüksek IR güçleri veya uzun maruziyet sürelerinin yapısal hasara yol açarak rehidrasyon kapasitesini olumsuz etkileyebileceği vurgulanmaktadır (Onwude vd., 2019; Aradward vd., 2023).

IR kurutma ve IR destekli kurutma uygulamalarında kurutma kinetiği, etkin nem difüzyon katsayısı (Deff) ve aktivasyon enerjisi (Ea) gibi parametrelerin, konvansiyonel yöntemlere kıyasla genellikle daha yüksek değerler aldığı rapor edilmiştir. Bu durum, IR ısıtmanın ısı ve kütle transfer mekanizmalarını değiştirdiğini ve ince tabaka kurutma modellerinin parametreleri üzerinde anlamlı farklılıklara yol açtığını göstermektedir. Literatürde, IR gücü, ürün kalınlığı, IR kaynağı–ürün mesafesi ve hava akış koşullarının bu parametreler üzerinde belirleyici faktörler olduğu ifade edilmektedir (Onwude vd., 2018 a-b; Delfiya vd., 2022).

Genel olarak değerlendirildiğinde, IR ön işlem; kurutma süresinin kısaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve kalite kayıplarının sınırlandırılması açısından gıda kurutma proseslerinde etkili bir alternatif veya tamamlayıcı teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleriyle IR uygulamaları, özellikle ince tabaka kurutma kinetiği, termodinamik parametreler ve kalite özelliklerinin birlikte değerlendirildiği çalışmalarda güçlü bir araştırma zemini sunmaktadır.

1.3.3 Ön İşlemler × Kurutma Yöntemi Etkileşimi

Kurutma proseslerinde uygulanan ön işlemler, ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek yalnızca kurutma kinetiğini değil, aynı zamanda kullanılan kurutma yönteminin etkinliğini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle ön işlemler ile kurutma yöntemi arasındaki etkileşim, kurutma performansının ve nihai ürün kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir faktör olarak ele alınmaktadır. Literatürde, aynı ön işlemin farklı kurutma yöntemleri altında farklı sonuçlar doğurabildiği ve bu etkileşimin göz ardı edilmesinin kurutma davranışının eksik yorumlanmasına yol açabileceği vurgulanmaktadır (Ratti, 2001; Onwude vd., 2016).

Kimyasal ön işlemler, ürün yüzey özelliklerini, hücre duvarı geçirgenliğini ve hücre içi–hücre dışı kütle transfer direncini değiştirerek kurutma mekanizmasını etkilemektedir. Bu etkiler, sıcak hava ile kurutma gibi konvektif yöntemlerde daha

çok dış kütle transfer direncinin azalması şeklinde ortaya çıkarken; kızıl ötesi gibi radyasyon temelli kurutma yöntemlerinde yüzey sıcaklığının yükselmesi ve iç nem gradyentinin artması yoluyla daha belirgin hâle gelebilmektedir (Delfiya vd., 2021).

Sıcak hava ile kurutmada, kimyasal ön işlemlerin yüzey bariyerini zayıflatması ve hücre duvarı geçirgenliğini artırması, nemin ürün içerisinden yüzeye doğru taşınmasını kolaylaştırarak kurutma süresini kısaltabilmektedir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık ve uzun kurutma süreleri, ön işlem uygulanmış ürünlerde dahi hücresel çökme ve büzülmeye neden olarak rehidrasyon kapasitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum, ön işlemin sağladığı olumlu etkinin, kurutma yöntemi ve koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Doymaz, 2010; Vega-Gálvez vd., 2012a).

Kızıl ötesi ön işlem veya IR destekli kurutma uygulamalarında ise ön işlemler ile kurutma yöntemi arasındaki etkileşim daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. IR kurutma, enerjinin doğrudan ürün yüzeyine ve kısmen iç yapıya nüfuz etmesi sayesinde hızlı bir yüzey ısınması oluşturmakta; bu durum ön işlemle değişmiş yüzey özelliklerinin kurutma kinetiği üzerindeki etkisini daha da belirgin hâle getirebilmektedir. Literatürde, IR kurutma ile birlikte uygulanan kimyasal ön işlemlerin, kurutma süresini önemli ölçüde azalttığı; ancak bu hızlı nem uzaklaştırmanın bazı koşullarda yüzey sertleşmesi ve yapısal hasar riskini artırabildiği rapor edilmiştir (Krishnamurthy vd., 2008; Hebbar vd., 2004; Salehi, 2020; Ngamwonglumlert ve Devahastin, 2018).

Ön işlemler ile kurutma yöntemi arasındaki bu etkileşim, yalnızca kurutma hızı açısından değil, aynı zamanda renk korunumu ve rehidrasyon davranışı açısından da önem taşımaktadır. Kimyasal ön işlemlerle PPO aktivitesinin sınırlandırılması renk stabilitesini artırırken; IR gibi yüksek enerji yoğunluklu yöntemlerde bu etki, hızlı kurutma sayesinde oksidatif reaksiyonlara ayrılan sürenin kısalmasıyla desteklenebilmektedir. Bununla birlikte, aşırı hızlı kurutma koşullarında meydana gelen yapısal bozulmalar, rehidrasyon kapasitesinde düşüşe yol açabilmektedir (Onwude vd., 2016; Shrestha vd., 2020).

Bu çerçevede, ön işlemler ile kurutma yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, kurutma kinetiği, termodinamik parametreler ve kalite özellikleri arasındaki ilişkilerin doğru biçimde yorumlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Farklı ön işlem türleri ile sıcaklık, dilim kalınlığı ve kurutma yöntemi kombinasyonlarının incelenmesi, kurutma prosesinin hem verimlilik hem de ürün kalitesi açısından optimize edilmesine olanak sağlayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

1.4 Kabin Kurutucuda Kurutma ve Proses Parametreleri

Kabin tipi kurutucular, gıda materyallerinin kontrollü sıcaklık, hava hızı ve bağıl nem koşulları altında kurutulmasına olanak sağlayan, laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarda yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerde kurutma işlemi, genellikle ısıtılmış havanın fan yardımıyla ürün yüzeyi üzerinden geçirilmesi ve ürün bünyesindeki suyun buharlaşarak ortamdan uzaklaştırılması prensibine dayanmaktadır. Kabin kurutucular, sabit ve tekrarlanabilir proses koşulları sağlamaları nedeniyle kurutma kinetiği, ince tabaka modelleme ve termodinamik analizlerin gerçekleştirilmesi açısından uygun bir altyapı sunmaktadır (Mujumdar, 2014; Adekanyev vd., 2025).

Kurutma prosesinde sıcaklık hem ısı transferini hem de kütle transferini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Kurutma havası sıcaklığının artması, ürün yüzeyinde suyun buharlaşma hızını artırmakta ve iç bölgelerde oluşan buhar basıncı gradyenti sayesinde nemin difüzyonunu hızlandırmaktadır. Literatürde, sıcaklığın artmasıyla birlikte kurutma süresinin kısaldığı, etkin nem difüzyon katsayısının (Deff) arttığı ve ince tabaka kurutma modellerinin hız sabiti (k) değerlerinde belirgin artışlar gözlendiği bildirilmektedir (Doymaz, 2011; Erbay ve Icier, 2010). Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkların ürün kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği; özellikle renk kayıpları, büzülme ve yapısal hasarın artabileceği de vurgulanmaktadır. Bu durum, kurutma sıcaklığının kalite–kinetik dengesi gözetilerek seçilmesini gerekli kılmaktadır (Vega-Gálvez vd., 2012a).

Dilim kalınlığı, kurutma davranışını belirleyen bir diğer kritik parametre olup, ürün içerisindeki nemin yüzeye ulaşması için kat etmesi gereken difüzyon yolunu doğrudan etkilemektedir. İnce dilimler, daha kısa difüzyon mesafesi nedeniyle daha hızlı kuruma eğilimi gösterirken; kalın dilimlerde kurutma süresinin uzadığı ve nem gradyentinin daha yavaş geliştiği bildirilmektedir. Literatürde dilim kalınlığının artmasıyla birlikte kurutma hızının azaldığı, Deff değerlerinin düştüğü ve bazı durumlarda iç bölgelerde nem hapsine bağlı heterojen yapıların oluşabildiği rapor

edilmiştir (Doymaz, 2012; Krokida ve Maroulis, 2003). Ayrıca dilim kalınlığı, ürünün büzülme davranışı, renk değişimi ve rehidrasyon kapasitesi üzerinde de belirleyici bir rol oynamaktadır.

Kurutma kinetiği ve ürün kalite özellikleri üzerinde sıcaklık ve dilim kalınlığının birlikte etkili olduğu göz önüne alındığında, bu iki parametrenin eş zamanlı olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Farklı sıcaklık ve dilim kalınlıklarında elde edilen kurutma verileri, ince tabaka kurutma modellerinin uygulanması ve proses parametrelerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi açısından güçlü bir veri seti oluşturmaktadır. Bu nedenle çalışmada farklı sıcaklıklar ve dilim kalınlıkları seçilmiştir. Bu yaklaşım, kurutma kinetiği, termodinamik parametreler, rehidrasyon davranışı ve renk özellikleri üzerindeki etkilerin sistematik olarak değerlendirilmesine ve proses–kalite ilişkilerinin bütüncül biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

1.5 İnce Tabaka Kurutma Modellemesi

İnce tabaka kurutma modellemesi, gıda materyallerinin kurutma davranışının matematiksel olarak tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda ürün, kalınlığı boyunca sıcaklık ve nem dağılımının ihmal edilebileceği, homojen bir tabaka olarak kabul edilmekte ve kurutma süreci zamana bağlı nem değişimi üzerinden modellenmektedir. İnce tabaka modelleri, kurutma kinetiğinin belirlenmesi, farklı kurutma koşullarının karşılaştırılması ve proses optimizasyonu açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Kucuk vd., 2014; Ertekin ve Fırat, 2017; Kidane vd., 2025).

İnce tabaka kurutma çalışmalarında nem içeriğindeki değişim genellikle nem oranı (Moisture Ratio, MR) kavramı ile ifade edilmektedir. Nem oranı, zamana bağlı nem içeriğinin başlangıç ve denge nem içeriğine göre normalize edilmesiyle tanımlanmaktadır. Literatürde gıdaların kurutma kinetiğini tanımlamak amacıyla çok sayıda ince tabaka kurutma modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, deneysel verilerin matematiksel olarak temsil edilmesini sağlamakta ve kurutma hızının zamana bağlı değişimini farklı varsayımlar altında açıklamaktadır. En yaygın kullanılan modeller arasında Lewis, Page, Henderson–Pabis, Logarithmic, Two-term ve Midilli–Küçük modelleri yer almaktadır.

Lewis modeli, en basit ince tabaka kurutma modeli olup, kurutma hızının yalnızca tek bir hız sabiti ile tanımlandığı birinci dereceden bir kinetik yaklaşım sunmaktadır. Ancak bu model, özellikle düşen hız döneminin baskın olduğu gıda kurutma süreçlerinde sınırlı bir uyum sağlayabilmektedir (Lewis, 1921; Erbay ve Icier, 2010).

Page modeli, Lewis modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olup, zamana bağlı üstel bir terim içermesi sayesinde deneysel verilerle daha iyi uyum göstermektedir. Bu nedenle Page modeli, meyve ve sebzelerin kurutma kinetiğini tanımlamada literatürde en sık kullanılan modellerden biri olarak öne çıkmaktadır (Page, 1949; Doymaz, 2010).

Henderson–Pabis modeli, Lewis modeline ek olarak deneysel uyumu artırmak amacıyla bir boyutsuz katsayı içermekte ve özellikle erken kurutma dönemlerinde daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Bununla birlikte, bazı ürünlerde düşen hız döneminin tamamını temsil etmekte yetersiz kalabildiği bildirilmiştir (Henderson ve Pabis, 1961).

Logarithmic model, Henderson–Pabis modeline eklenen sabit bir terim aracılığıyla kurutma eğrisinin deneysel verilere daha esnek bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanımaktadır. Bu modelin, farklı sıcaklık ve dilim kalınlıklarında elde edilen kurutma verilerinde başarılı sonuçlar verdiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Turan, 2019; Biswas et al., 2022).

İnce tabaka kurutma modellerinin performansı, deneysel verilerle olan uyum derecesine göre değerlendirilmektedir. Bu amaçla literatürde yaygın olarak kullanılan istatistiksel kriterler arasında belirleme katsayısı (R^2), ortalama kare hata karekökü (Root Mean Square Error, RMSE) ve ki-kare (χ^2) yer almaktadır. Yüksek R^2 değerleri, modelin deneysel verileri iyi temsil ettiğini gösterirken; düşük RMSE ve χ^2 değerleri modelin hata payının düşük olduğunu ifade etmektedir. Bu kriterlerin birlikte değerlendirilmesi, farklı modeller arasında karşılaştırma yapılmasına ve en uygun modelin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Doymaz, 2008; Aghbashlo et al., 2009; Erbay ve Icier, 2010). Literatürde farklı ön işlem ve proses koşullarının kurutma kinetiği ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Ön işlemlerin ürün mikroyapısını değiştirerek ısı ve kütle transfer mekanizmalarını etkilediği, bu durumun etkin nem difüzyon

katsayısında (Deff) artışa ve kurutma süresinde azalmaya yol açtığı bildirilmektedir. Ertekin ve Yaldız (2004), sıcaklık ve ürün kalınlığındaki değişimlerin kurutma eğrileri üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu ve bu etkilerin Page, Henderson– Pabis, Logarithmic ve Midilli gibi ince tabaka kurutma modelleri kullanılarak başarılı bir şekilde tanımlanabildiğini göstermiştir. Söz konusu çalışmalarda, farklı kurutma koşullarının karşılaştırılmasında belirleme katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ki-kare (χ^2) gibi istatistiksel kriterlerin birlikte kullanılmasının uygun olduğu vurgulanmaktadır (Ertekin ve Yaldız, 2004).

Bu bağlamda ince tabaka kurutma modellemesi, farklı sıcaklık, dilim kalınlığı ve ön işlem koşullarında elde edilen kurutma verilerinin matematiksel olarak karşılaştırılmasına olanak sağlayarak, kurutma kinetiğinin ve proses parametrelerinin sistematik biçimde değerlendirilmesine katkı sunmaktadır.

1.6 Kurutma Prosesinde Enerji ve Termodinamik Göstergeler

1.6.1 Etkin nem difüzyon katsayısı (Deff) ve aktivasyon enerjisi (Ea)

Kurutma sırasında gerçekleşen nem difüzyonu ve buharlaşma olayları, sıcaklıkla ilişkili kinetik süreçler olup, bu süreçlerin nicel olarak tanımlanmasında etkin nem difüzyon katsayısı (Deff) ve aktivasyon enerjisi (Ea) gibi termodinamik parametreler yaygın olarak kullanılmaktadır (Crank, 1975; Doymaz, 2007; Aghbashlo et al., 2009; Erbay ve Icier, 2010). Deff, kurutma sırasında nemin ürün içerisinden taşınma hızını temsil eden bir parametre olup, Fick'in ikinci difüzyon yasasına dayalı yaklaşımlar kullanılarak tanımlanmaktadır. Literatürde Deff değerlerinin; kurutma sıcaklığı, ürün kalınlığı ve uygulanan ön işlemlere bağlı olarak değiştiği; sıcaklığın artmasıyla birlikte Deff değerlerinde artış gözlendiği rapor edilmiştir. Bu durum, sıcaklık artışıyla birlikte su moleküllerinin hareketliliğinin artması ve iç kütle transfer direncinin azalması ile ilişkilendirilmektedir (Doymaz, 2011; Vega-Gálvez vd., 2012b).

Aktivasyon enerjisi (Ea), bir kurutma veya reaksiyon sürecinin gerçekleşebilmesi için aşılması gereken minimum enerji bariyerini ifade eden ve sıcaklık değişimlerine karşı proses hızının duyarlılığını gösteren temel bir kinetik parametredir. Ea değerinin düşük olması, sistemin sıcaklık artışlarına daha az bağımlı olduğunu ve sürecin daha kolay ilerlediğini; yüksek Ea değerleri ise

sıcaklık etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir (Madamba vd., 1996; Doymaz, 2004). Bu bağlamda Deff ve Ea değerleri, farklı sıcaklık, dilim kalınlığı ve ön işlem koşullarında elde edilen kurutma verilerinin bütüncül olarak yorumlanmasında önemli göstergeler olarak kullanılmaktadır. Literatürde bu parametrelerin, ince tabaka kurutma modelleriyle birlikte değerlendirilmesinin, kurutma proseslerinin optimizasyonu açısından güçlü bir yaklaşım sunduğu vurgulanmaktadır (Erbay ve Icier, 2010).

1.6.2 Entalpi (ΔH), Entropi (ΔS) ve Gibbs Serbest Enerjisi (ΔG)

Kurutma proseslerinin termodinamik değerlendirilmesinde, entalpi değişimi (ΔH), entropi değişimi (ΔS) ve Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) gibi parametreler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu parametreler, nem taşınımı sırasında sistemde meydana gelen enerji değişimlerinin ve moleküler düzensizliğin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Vigano vd., 2012; Cagnin vd., 2017; Kucuk vd., 2014). Entalpi değişimi (ΔH), kurutma sırasında nemin ürün matrisi içerisinden uzaklaştırılması için gerekli enerji miktarını temsil etmektedir. Pozitif ΔH değerleri, nem difüzyonunun endotermik bir süreç olduğunu ve su moleküllerinin bağlandıkları konumlardan ayrılabilmesi için enerji girdisine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Literatürde, kurutma sıcaklığının ve uygulanan ön işlemlerin ΔH değerlerini etkilediği; sıcaklık artışı ve hücresel yapıyı zayıflatan ön işlemlerle birlikte ΔH değerlerinde azalma eğilimi gözlenebildiği rapor edilmiştir (Rahman, 2005; Rizvi, 2014).

Entropi değişimi (ΔS), kurutma sürecinde sistemde meydana gelen düzensizlik derecesinin bir göstergesi olup, su moleküllerinin daha düzenli bir yapıdan daha serbest bir hâle geçişini yansıtmaktadır. Kurutma sırasında ΔS değerlerinin negatif olması, nem taşınımı sürecinde sistemin daha düzenli bir geçiş durumuna yöneldiğini göstermekte ve difüzyon sürecinin belirli bir enerji bariyeri ile sınırlandığını ifade etmektedir. Literatürde, ön işlemlerin ve farklı kurutma koşullarının ΔS değerlerini değiştirerek nem taşınım mekanizmasını etkileyebildiği bildirilmektedir (Onwude vd., 2016; Vega-Gálvez vd., 2009).

Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG), kurutma prosesinin termodinamik olarak gerçekleşebilirliğini ve sürecin kendiliğindenliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir parametredir. Pozitif ΔG değerleri, kurutma sürecinin kendiliğinden

gerçekleşmediğini ve dışarıdan enerji girdisine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Gıda kurutma prosesleri için literatürde genellikle pozitif ΔG değerleri rapor edilmekte olup, bu durum kurutmanın enerji gerektiren bir proses olduğunu doğrulamaktadır (Erbay ve Icier, 2010; Doymaz, 2011).

ΔH, ΔS ve ΔG parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi, farklı sıcaklık, dilim kalınlığı ve ön işlem koşullarının kurutma prosesinin enerji gereksinimi ve kinetik davranışı üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı biçimde yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu parametrelerin ince tabaka kurutma modeli sonuçları ve etkin nem difüzyon katsayısı ile birlikte ele alınmasının, kurutma proseslerinin optimizasyonu açısından güçlü bir yaklaşım sunduğu literatürde vurgulanmaktadır (Cagnin vd., 2017; Nadi ve Tzempelikos, 2018; Gomes vd., 2022).

1.6.3 Kurutma Kinetiği, Termodinamik Parametreler ve Ürün Kalitesi Arasındaki İlişki

Kurutma proseslerinin değerlendirilmesinde kurutma kinetiği, termodinamik parametreler ve ürün kalite özellikleri birbirinden bağımsız değişkenler olarak ele alınmamakta; aksine bu parametreler arasında güçlü ve çok yönlü ilişkiler bulunduğu kabul edilmektedir. Literatürde, ince tabaka kurutma modelleriyle elde edilen kinetik parametrelerin (ör. hız sabiti, k) ve etkin nem difüzyon katsayısının ($D_e$ff), kurutma sırasında gerçekleşen enerji gereksinimi ve ürün mikroyapısındaki değişimlerle yakından ilişkili olduğu bildirilmektedir (Erbay ve Icier, 2010; Onwude vd., 2016).

Kurutma kinetiğinin hızlanması genellikle $D_e$ff değerlerindeki artış ve aktivasyon enerjisindeki (E_a) azalma ile ilişkilendirilmekte olup, bu durum nemin ürün matrisi içerisinden daha kolay taşındığını göstermektedir. Bununla birlikte literatürde, daha yüksek kurutma hızının her zaman daha iyi ürün kalitesi ile sonuçlanmadığı vurgulanmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık veya yüksek enerji yoğunluklu kurutma koşullarında elde edilen yüksek k ve $D_e$ff değerleri, hücre duvarı bütünlüğünün bozulmasına, büzülmenin artmasına ve gözenek yapısının kapanmasına neden olarak rehidrasyon kapasitesini ve doku kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Krokida ve Maroulis, 2001; Lewicki, 1998c).

Termodinamik parametreler, kurutma kinetiği ile kalite özellikleri arasındaki bu dengeyi yorumlamak açısından önemli göstergeler sunmaktadır. Entalpi değişimi (ΔH), nem taşınımı için gerekli enerji miktarını yansıtırken; entropi değişimi (ΔS),

sistemdeki moleküler düzenin değişimini ifade etmektedir. Daha düşük ΔH ve ΔS değerleri genellikle daha kolay gerçekleşen bir difüzyon sürecine işaret etse de, bu durum her zaman yapısal bütünlüğün korunduğu anlamına gelmemektedir. Literatürde, düşük ΔH ve E_a değerlerine sahip örneklerde dahi, hızlı su kaybına bağlı olarak geri dönüşü olmayan yapısal hasarların oluşabileceği rapor edilmiştir (Aksoy vd., 2019; Aravindakshan vd., 2021).

Ürün kalitesi açısından rehidrasyon kapasitesi, kurutma kinetiği ve termodinamik parametrelerin bütüncül etkisini yansıtan temel bir gösterge olarak değerlendirilmektedir. Gözenekli yapının korunabildiği, hücresel çökmenin sınırlı olduğu koşullarda kurutulan ürünlerde, rehidrasyon sırasında suyun hücre içine daha kolay nüfuz ettiği ve daha yüksek rehidrasyon oranlarının elde edildiği bildirilmektedir. Buna karşılık, hızlı fakat kontrolsüz kurutma koşullarında elde edilen ürünlerde, yüksek kinetik hızlara rağmen rehidrasyon davranışının zayıfladığı sıklıkla rapor edilmektedir (Krokida ve Philippopoulos, 2005; Vega-Gálvez vd., 2012a).

Renk değişimleri de kurutma kinetiği–termodinamik–kalite ilişkisini yansıtan önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Kurutma süresinin kısalması, oksidatif ve enzimatik reaksiyonlar için ayrılan süreyi azaltarak renk korunumu açısından avantaj sağlayabilmektedir. Ancak yüksek sıcaklık ve hızlı ısı transferi, pigment bozunmalarını ve Maillard reaksiyonlarını hızlandırarak renk kaybına yol açabilmektedir. Bu durum, kurutma hızının ve enerji girdisinin kalite parametreleriyle dengeli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Maskan, 2001; Shrestha vd., 2020). Bu çok boyutlu ilişkiler nedeniyle literatürde, kurutma proseslerinin değerlendirilmesinde tek bir parametreye odaklanmak yerine, kurutma kinetiği, termodinamik özellikler ve kalite göstergelerinin birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Çok değişkenli istatistiksel yöntemler, özellikle Temel Bileşenler Analizi (PCA), bu parametreler arasındaki ilişkilerin bütüncül biçimde ortaya konulmasına olanak sağlayarak farklı proses koşullarının karşılaştırılmasında güçlü bir araç sunmaktadır (Jolliffe ve Cadima, 2016).

1.7 Rehidrasyon Kinetiği

Rehidrasyon, kurutulmuş bir gıda materyalinin yeniden su ile temas ettiğinde kaybettiği nemi geri kazanma yeteneğini ifade etmekte olup, kurutulmuş ürünlerin kalite değerlendirilmesinde en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Rehidrasyon kapasitesi, yalnızca ürünün yeniden su alabilme miktarını değil, aynı zamanda kurutma sırasında meydana gelen yapısal hasarın derecesini ve ürün dokusunun ne ölçüde korunabildiğini de yansıtmaktadır. Bu nedenle rehidrasyon davranışı, kurutma prosesinin ürün mikroyapısı üzerindeki etkilerinin dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Parthasarathi vd., 2014; Ngamwonglumlert vd., 2018).

Kurutma sırasında hücre duvarı bütünlüğünün bozulması, gözeneklerin kapanması, büzülme ve yüzeyde kabuk oluşumu gibi yapısal değişimler, kurutulmuş ürünlerin rehidrasyon kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde, daha gözenekli ve daha az büzülmüş yapıya sahip ürünlerin rehidrasyon sırasında suyu daha hızlı ve daha yüksek oranda absorbe edebildiği; buna karşılık yüksek sıcaklıkta veya uzun süreli kurutma işlemlerinin rehidrasyon oranını düşürdüğü bildirilmektedir (Krokida vd., 2003; Vega-Gálvez vd., 2012b).

Rehidrasyon süreci genellikle zamana bağlı bir kinetik davranış sergilemekte ve bu süreçte ürünün su alma hızı ile denge durumuna ulaşma süresi önemli parametreler olarak değerlendirilmektedir. Literatürde rehidrasyon kinetiğinin modellenmesinde farklı matematiksel yaklaşımlar kullanılmış olup, bu modeller kurutma koşullarının ürün yapısı üzerindeki etkilerinin nicel olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle rehidrasyon kinetiğinin, kurutma sıcaklığı, dilim kalınlığı ve uygulanan ön işlemlerle doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Lewicki, 1998c; Cunningham vd., 2008).

Rehidrasyon davranışının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar arasında Peleg modeli, birinci dereceden kinetik modeller ve empirik/logaritmik modeller yer almaktadır. Bu modeller, rehidrasyon sırasında su alım hızının zamanla azalmasını ve denge durumuna yaklaşımını tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde, özellikle Peleg modelinin meyve ve sebzelerin rehidrasyon kinetiğini başarılı bir şekilde tanımladığı ve farklı kurutma koşullarının

karşılaştırılmasında etkin bir araç sunduğu bildirilmektedir (Peleg, 1988; Lewicki, 1998a).

Rehidrasyon kapasitesi ve kinetiği, kurutma sırasında uygulanan ön işlemlerden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Kimyasal ve fiziksel ön işlemlerin hücre duvarı geçirgenliğini artırarak yapısal hasarı sınırladığı ve bu sayede rehidrasyon oranlarını iyileştirebildiği literatürde rapor edilmiştir. Bununla birlikte, aşırı ön işlem veya yüksek enerji girdisi içeren kurutma koşullarının, ürün dokusunda geri dönüşü olmayan hasarlara yol açarak rehidrasyon davranışını olumsuz etkileyebileceği de vurgulanmaktadır (Onwude vd., 2016; Lewicki ve Pawlak, 2003). Bu bağlamda rehidrasyon kinetiğinin incelenmesi, kurutma kinetiği ve termodinamik parametrelerle birlikte değerlendirilerek, kurutma prosesinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin bütüncül biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır. Rehidrasyon analizleri, farklı sıcaklık, dilim kalınlığı ve ön işlem koşullarının karşılaştırılmasında önemli bir kalite göstergesi olarak kullanılmaktadır.

1.8 Renk Analizi ve Temel Bileşen Analizi (PCA)

Renk, kurutulmuş meyve ve sebzelerin tüketici tarafından algılanan kalitesini belirleyen en önemli fiziksel özelliklerden biri olup, kurutma prosesinin ürün üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutma sırasında meydana gelen enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları, pigment bozunmaları ve oksidatif değişimler ürün renginde belirgin farklılıklara yol açabilmektedir. Bu nedenle renk değişimi, kurutma koşullarının ve uygulanan ön işlemlerin kalite üzerindeki etkilerinin dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Maskan, 2001; Vega-Gálvez vd., 2009).

Gıdaların renk özellikleri genellikle CIE Lab* renk uzayı kullanılarak ifade edilmektedir. Bu sistemde L* değeri parlaklık (0 = siyah, 100 = beyaz), a* değeri kırmızı–yeşil eksenini, b* değeri ise sarı–mavi eksenini temsil etmektedir. Kurutma işlemleri sırasında L* değerinde azalma, a* ve b* değerlerinde ise artış gözlenmesi genellikle esmerleşme reaksiyonları ile ilişkilendirilmektedir. Literatürde, kurutma sıcaklığının artmasıyla birlikte renk bozulmalarının hızlandığı; buna karşılık uygun

ön işlemlerin renk kaybını sınırlayabildiği rapor edilmiştir (Maskan, 2001; Doymaz, 2010).

Elma gibi fenolik bileşenlerce zengin ürünlerde renk değişimleri, özellikle polifenol oksidaz (PPO) aktivitesi ve oksidatif reaksiyonlarla yakından ilişkilidir. Bu nedenle sitrik asit ve askorbik asit gibi ön işlemler, PPO aktivitesinin baskılanması ve oksidatif reaksiyonların sınırlandırılması yoluyla renk korunumu açısından literatürde yaygın olarak incelenmiştir. Askorbik asidin indirgen özellikleri sayesinde o-kinonları tekrar fenolik forma dönüştürerek esmerleşmeyi geciktirdiği; sitrik asidin ise pH düşürücü ve metal şelatlayıcı etkileriyle PPO aktivitesini sınırlandırdığı bildirilmektedir (Doymaz, 2010; Shrestha vd., 2020).

Kurutma prosesinde elde edilen çok sayıda kalite ve proses parametresinin birlikte değerlendirilmesi, tek değişkenli analizlerle sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda gıda kurutma çalışmalarında çok değişkenli istatistiksel analizler, özellikle Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis, PCA) yaygın olarak kullanılmaktadır. PCA, çok sayıda değişken arasındaki ilişkileri daha az sayıda bağımsız bileşen ile açıklayarak veri setinin boyutunu azaltmakta ve değişkenler arasındaki temel eğilimlerin ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır (Jolliffe ve Cadima, 2016). Literatürde PCA'nın; renk parametreleri (L*, a*, b*), rehidrasyon kapasitesi, kurutma kinetiği ve termodinamik parametreler gibi farklı kalite göstergelerinin birlikte değerlendirilmesinde etkili bir araç olduğu gösterilmiştir. PCA analizleri sayesinde, farklı kurutma sıcaklıkları, dilim kalınlıkları ve ön işlem uygulamalarının ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin bütüncül biçimde ayrıştırılabildiği ve benzer özellikler gösteren örneklerin gruplanabildiği rapor edilmektedir (Vega-Gálvez vd., 2009). Bu kapsamda renk analizi ve PCA'nın birlikte kullanılması, kurutma prosesinde uygulanan farklı ön işlem ve proses koşullarının ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. PCA, tek tek parametrelerin ötesine geçerek kurutma kinetiği, termodinamik özellikler ve kalite göstergeleri arasındaki ilişkilerin daha net bir şekilde ortaya konulmasını sağlayan güçlü bir istatistiksel yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde kızılötesi (IR) ön işlem uygulamalarının kurutma kinetiği ve proses performansı üzerindeki etkileri çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. Bununla birlikte, kimyasal ön işlemler ile IR ön işlemlerinin birlikte değerlendirildiği ve bu

uygulamaların kurutma kinetiği, rehidrasyon davranışı ve termodinamik parametreler üzerindeki etkilerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle farklı ön işlem türlerinin kurutma performansı ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi literatüre önemli katkılar sağlayabilecek bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

1.9 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, farklı kimyasal ön işlemler ve kızıl ötesi ön işlem uygulanarak elma dilimlerinin kabin tipi kurutucuda farklı sıcaklık ve dilim kalınlıklarında kurutulması sürecini kurutma kinetiği, enerji gereksinimi ve ürün kalite özellikleri açısından kapsamlı biçimde değerlendirmektir. Bu kapsamda, uygulanan ön işlemlerin ve kurutma koşullarının kurutma davranışı üzerindeki etkilerinin matematiksel ve deneysel olarak ortaya konulması hedeflenmiştir.

Çalışmada, elma dilimlerinin kurutma sürecinde nem içeriğindeki zamana bağlı değişim ince tabaka kurutma modelleri kullanılarak modellenmiş; farklı sıcaklık, dilim kalınlığı ve ön işlem kombinasyonları için uygun kurutma modelleri belirlenmiştir. Ayrıca etkin nem difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi gibi kinetik ve enerjiye bağlı parametreler hesaplanarak kurutma sürecinin enerji gereksinimi değerlendirilmiştir. Tezin bir diğer amacı, kurutma sırasında uygulanan ön işlemler ve proses koşullarının ürün kalite özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemektir. Bu doğrultuda, kurutulmuş elma örneklerinin rehidrasyon kinetiği ve renk özellikleri incelenmiş; kurutma kinetiği, termodinamik göstergeler ve kalite parametreleri arasındaki ilişkiler çok değişkenli istatistiksel analizler kullanılarak bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile, elma kurutma proseslerinde ön işlem türü, kurutma koşulları ve ürün kalitesi arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlanması ve kurutma proseslerinin hem verimlilik hem de kalite açısından optimize edilmesine yönelik bilimsel bir altyapı oluşturulması amaçlanmaktadır.

1.10 Hipotez

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

H_1: Uygulanan farklı kimyasal ön işlemler ve kızıl ötesi ön işlem, elma dilimlerinin kurutma kinetiğini anlamlı düzeyde etkilemektedir.

H_2: Kurutma sıcaklığı ve dilim kalınlığındaki artış, elma dilimlerinin kurutma hızını artırmakta; buna bağlı olarak ince tabaka kurutma modeli parametrelerinde ve etkin nem difüzyon katsayısında anlamlı değişimlere neden olmaktadır.

H_3: Kimyasal ve kızıl ötesi ön işlemler, kurutma sürecinin enerji gereksinimini etkileyerek aktivasyon enerjisi ve diğer enerjiye bağlı göstergelerde farklılaşmalara yol açmaktadır.

H_4: Kurutma koşulları ve uygulanan ön işlemler, kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon kinetiği ve rehidrasyon kapasitesi üzerinde anlamlı etkiye sahiptir.

H_5: Kurutma sürecinde uygulanan ön işlemler ve farklı proses parametreleri, elma dilimlerinin renk özelliklerini (L*, a*, b*) anlamlı düzeyde etkilemektedir.

H_6: Kurutma kinetiği, enerji ve termodinamik göstergeler ile ürün kalite parametreleri (rehidrasyon ve renk) arasında anlamlı ilişkiler bulunmaktadır ve bu ilişkiler çok değişkenli istatistiksel analizler (PCA) ile ayırt edilebilmektedir.

2
MATERYAL METOT

2.1 Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılan elmalar, yerel pazarlardan temin edilen, olgunluk düzeyi ve fiziksel özellikleri açısından benzerlik gösteren, yeşil kabuklu taze elmalardan seçilmiştir. Deneylerde kullanılacak elmalar, görünür mekanik hasar, çürüme veya yüzey kusuru bulunmayan örnekler arasından seçilmiş; deneysel çalışmalara başlamadan önce yabancı maddelerden arındırılmak amacıyla musluk suyu ile yıkanmış ve yüzey suları temiz bir bez yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Elmalar, deneyler süresince kalite kaybını önlemek amacıyla +4 °C'de buzdolabında muhafaza edilmiş ve kurutma denemeleri öncesinde oda sıcaklığına getirilmiştir.

Deneylerde kullanılacak elmalar, paslanmaz çelik bıçak kullanılarak çekirdek evleri çıkarıldıktan sonra, 0,5 cm dilim kalınlıklarında olacak şekilde dilimlenmiştir. Dilimleme işlemi sırasında örnekler arasında homojenliğin sağlanmasına özen gösterilmiş ve kalınlık ölçümleri dijital kumpas yardımıyla kontrol edilmiştir. Dilimleme işleminin ardından elma örnekleri, kurutma öncesi uygulanacak ön işlemler için hazırlanmıştır.

Kimyasal ön işlemlerin uygulanması için gerekli olan askorbik asit ve sitrik asit çözeltileri distile su kullanılarak hazırlanmış; potasyum karbonat (K_2CO_3) ise yüzey özelliklerini değiştirmeye yönelik olarak bitkisel yağ ile emülsiyon formunda kullanılmıştır. Çözelti konsantrasyonları ve uygulama koşulları, literatürde yaygın olarak kullanılan değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Tüm kimyasallar analitik saflıkta olup ticari tedarikçilerden temin edilmiştir.

Kızıl ötesi ön işlem için halojen destekli infrared kurutucudan (AND MX-50, A&D Company, Tokyo, Japonya) yararlanılmış ve tüm ön işlem görmüş örnekler kurutma prosesi için kabin tipi kurutucuya (APV & PASILAC, UK) yerleştirilmiştir. Kurutma sırasında sıcaklık ve süre kontrolü dijital kontrol ünitesi aracılığıyla sağlanmıştır. Renk analizleri için taşınabilir renk ölçüm cihazı (CR-400 Model Colorimeter, Konica Minolta, Japan) kullanılmış; nem tayini ve diğer analizler laboratuvar koşullarında yürütülmüştür. Rehidrasyon deneyleri ve ağırlık ölçümleri hassas terazi (APV & PASILAC, UK) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan tüm deneysel materyaller ve ekipmanlar, deneysel tekrarlar arasında tutarlılığın sağlanmasına ve elde edilen verilerin güvenilirliğinin artırılmasına yönelik olarak dikkatle seçilmiş ve kullanılmıştır.

2.2 Deneysel Tasarım

Bu tez çalışmasında, elma dilimlerinin kurutma davranışı ve kalite özellikleri üzerinde etkili olduğu bilinen temel proses parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla kontrollü bir deneysel tasarım uygulanmıştır. Deneysel tasarım kapsamında, ön işlem türü ve kurutma sıcaklığı bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Dilim kalınlığı ise tüm deneyler boyunca 0,5 cm olarak sabit tutulmuştur. Çalışmada ön işlem faktörü; termal ve termal olmayan ön işlemlerin etkisini görmek amacıyla kimyasal ve kızıl ötesi uygulamalar olarak iki farklı türde seçilmiştir. Termal olmayan kimyasal ön işlemler için sitrik asit, askorbik asit ve potasyum karbonat kullanılırken, termal ön işlem için kızıl ötesi ışınımdan destek alınmıştır. Ön işlem ile muamele edilen örneklere kabin kurutucuda 45, 55, 65 ve 75 °C olmak üzere dört farklı seviyede güç uygulanmıştır.

Deneysel tasarımda, tüm ön işlem–sıcaklık kombinasyonları için kurutma denemeleri gerçekleştirilmiş ve her bir deney koşulu için kurutma süresince zamana bağlı kütle kayıpları izlenmiştir. Ayrıca kurutulmuş örneklerin rehidrasyon kinetiği ve renk özellikleri belirlenerek, farklı deney koşulları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu deneysel tasarım sayesinde, ön işlem türü ve kurutma sıcaklığının elma dilimlerinin kurutma davranışı, enerji gereksinimi ve ürün kalite özellikleri üzerindeki etkilerinin sistematik ve tutarlı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Laboratuvar ölçekli elde edilen deneysel veriler analitik olarak irdelenmiştir.

2.3 Ön İşlemler

Bu tez çalışmasında, elma dilimlerinin kurutma davranışı ve kalite özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla termal (kızılötesi) ve termal olmayan (kimyasal) ön işlemler uygulanmıştır. Ön işlemler, kurutma öncesinde ürünün yüzey özelliklerini ve hücresel yapısını değiştirerek kurutma kinetiğini etkileme potansiyeline sahip uygulamalar olarak değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında, elma dilimlerine farklı kimyasal çözeltiler kullanılarak daldırma ön işlemleri uygulanmıştır. Kimyasal ön işlemler; K2CO3 (%2 potasyum karbonat + %0,5 zeytinyağı çözeltisi), %1 SA (sitrik asit çözeltisi) ve %1 AA (askorbik asit çözeltisi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca termal ön işlem olarak kızılötesi uygulama yapılmış (IR); bu amaçla elma dilimleri 74 W güçte çalışan kızıl ötesi sistem altında 30 dakika süreyle ön işleme tabi tutulmuştur. Ön işlem uygulanan ve uygulanmayan 0,5 cm sabit dilim kalınlığındaki yeşil elma dilimleri, 45, 55, 65 ve 75 °C sıcaklıklarda, hava hızı sabit tutulacak şekilde kabin tipi kurutucuda kurutulmuştur.

2.3.1 Kimyasal Ön İşlemler

Kimyasal ön işlemler için temin edilen çözeltiler distile su kullanılarak hazırlanmış ve deneyler öncesinde oda sıcaklığında bekletilmiştir. Ön işlem uygulamaları, dilimleme işleminin hemen ardından gerçekleştirilmiş olup, tüm örneklerde aynı uygulama koşullarının sağlanmasına özen gösterilmiştir.

AA (%1) ve SA (%1) çözeltileri, elma dilimlerinin yüzeyinde enzimatik esmerleşmeyi sınırlandırmak ve oksidatif reaksiyonları azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Bu çözeltiler, belirlenen konsantrasyonlarda hazırlanmış ve elma dilimleri çözelti içerisinde belirli bir süre daldırılarak ön işleme tabi tutulmuştur. Ön işlem süresi sonunda örnekler çözelti içerisinden çıkarılmış, yüzeydeki fazla çözelti süzülerek kurutma denemelerine alınmıştır.

K2CO3 ön işlemi, elma dilimlerinin yüzey özelliklerini değiştirmeye ve yüzeyden nem uzaklaştırılmasını kolaylaştırmaya yönelik olarak uygulanmıştır. Bu amaçla potasyum karbonat çözeltisi, belirlenen oranda bitkisel yağ ilavesiyle hazırlanmış ve homojen bir emülsiyon elde edilmiştir. Elma dilimleri bu emülsiyon içerisinde aynı koşullar altında daldırma yöntemiyle ön işleme tabi tutulmuştur. Ön işlem sonrasında örnekler yüzeylerinde biriken fazla emülsiyonun uzaklaştırılması için kısa süreli olarak bekletilmiştir. Kimyasal ön işlemler sırasında çözelti

konsantrasyonu, uygulama süresi ve sıcaklık gibi parametreler tüm örnekler için sabit tutulmuş; böylece ön işlem türünün etkilerinin karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2.3.2 Kızılötesi Ön İşlem

Kızıl ötesi ön işlem, elma dilimlerine kurutma öncesinde termal bir ön işlem olarak uygulanmıştır. Kızıl ötesi ön işlem sırasında elma dilimleri, belirlenen güç seviyesinde çalışan kızıl ötesi ısıtma sistemi altında (AND MX-50, A&D Company, Limited, Tokyo, Japan) kontrollü koşullar altında tutulmuştur. Bu uygulama ile ürün yüzeyinde hızlı ve homojen bir ısınma sağlanarak, ürünün iç bölgeleri ile yüzey arasında nem gradyentinin artırılması amaçlanmıştır. Kızıl ötesi ön işlem, kimyasal ön işlem uygulanmayan elma dilimleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve bu örnekler ön işlem sonrasında doğrudan kurutma denemelerine alınmıştır. Kızıl ötesi ön işlem süresi 30 dakika ve güç seviyesi 74 W olarak belirlenmiş olup, bu parametreler tüm deneyler boyunca sabit tutulmuştur. Böylece Kızıl ötesi ön işlemin kurutma kinetiği ve ürün kalite özellikleri üzerindeki etkilerinin izole bir şekilde değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Kızıl ötesi ön işlem sonrasında elma dilimleri herhangi bir bekletme süresine tabi tutulmadan kurutma denemelerine alınmış; kızıl ötesi ön işlemin kurutma süresi, enerjiye bağlı parametreler ve ürün kalite özellikleri üzerindeki etkileri, kontrol örnekleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2.4 Kurutma Denemeleri (Kabin Kurutucu Koşulları)

Kurutma denemeleri, laboratuvar tipi tepsi (kabin) kurutucu (APV & PASILAC, UK) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi sırasında kurutma havası sıcaklığı deneysel değişken olarak ele alınmış ve 45, 55, 65 ve 75 °C olmak üzere dört farklı sıcaklık seviyesinde çalışmalar yürütülmüştür. Kurutma havası hızı tüm denemelerde sabit tutulmuş ve sistem kararlı hâle geldikten sonra deneylere başlanmıştır. Hazırlanan elma dilimleri, 0,5 cm sabit dilim kalınlığında olacak şekilde kesilmiş ve kurutma tepsilerine tek kat hâlinde, birbirleriyle temas etmeyecek biçimde yerleştirilmiştir. Dilim kalınlığının sabit tutulması ile kurutma kinetiği üzerindeki etkinin yalnızca kurutma sıcaklığı ve ön işlem türünden kaynaklanması amaçlanmıştır. Kurutma süresi boyunca numunelerin kütle kaybı belirli zaman aralıklarında hassas terazi yardımıyla ölçülerek zamana bağlı nem içeriği değişimi izlenmiştir. Ölçümler, ardışık iki tartım

arasındaki kütle değişiminin ihmal edilebilir seviyeye ulaşmasına kadar sürdürülmüş ve bu nokta denge nem içeriği olarak kabul edilmiştir. Kurutma denemeleri, ön işlem uygulanmamış kontrol örnekleri ile kızıl ötesi ön işlem uygulanmış örnekler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler aynı çevresel koşullar altında yürütülerek, deneysel tekrarlar arasında karşılaştırılabilirliğin sağlanmasına özen gösterilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak nem içeriği–zaman ve kuruma hızı–zaman eğrileri oluşturulmuş; bu veriler daha sonraki aşamalarda ince tabaka kurutma modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca kurutma denemeleri sonucunda elde edilen örnekler, kalite analizleri için muhafaza edilmiştir.

2.5 Analitik Yöntemler

Laboratuvar ölçekli elde edilen deneysel verileri analitik olarak değerlendirilmiş ve kurutmanın kinetik davranışının ürün kalite özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla modellenmiştir. Kurutma denemeleri sırasında elde edilen veriler kullanılarak nem içeriği değişimi, rehidrasyon davranışı ve renk özellikleri belirlenmiş ve elde edilen bu deneysel veriler uygun kinetic modellerle tanımlanmıştır. Ayrıca termodinamik analizlerle prosesin enerji gereksinimi araştırılmıştır. Tüm analizler, deneysel tekrarlar arasında karşılaştırılabilirliğin sağlanmasına yönelik olarak aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

2.5.1 Nem İçeriği ve Nem Oranının Hesaplanması

Elma dilimlerinin nem içeriği, kurutma süreci boyunca zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Numunelerin başlangıç nem içeriğinin tayini amacıyla, yaklaşık 5,00±0,10 g elma dilimi örneği alınarak 105 ± 1 °C sıcaklıkta çalışan etüvde (Selecta, Barcelona, İspanya) 5 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonunda elde edilen ağırlık değerleri kullanılarak numunelerin başlangıç nem içeriği hesaplanmıştır. Kurutma denemeleri sırasında elma dilimlerinin kütle kaybı belirli zaman aralıklarında hassas terazi (XB 220 A model, Precisa Instruments AG, Dietikon, Switzerland) yardımıyla ölçülmüş ve bu ölçümler kullanılarak zamana bağlı nem içeriği değişimi izlenmiştir. Nem içeriği değerleri kuru baz esasına göre ifade edilmiştir. Kurutma işleminin sonlandırılmasında, ardışık ölçümler arasındaki kütle değişiminin ihmal edilebilir seviyeye ulaşması kriteri esas alınmıştır. Elde edilen nem içeriği verileri, kurutma kinetiğinin değerlendirilmesi, nem oranı (MR)

hesaplamaları ve ince tabaka kurutma modellerinin uygulanması için temel veri seti olarak kullanılmıştır (2.1 ve 2.2).

$$M_t = \frac{m - KM}{KM} \quad (2.1)$$

M_t: Herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su/g kurumadde)

m: Numunenin ağırlığı (g)

KM: Numunenin içerdiği kuru madde miktarı (g) (Brooker vd., 1992).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2.2)$$

MR : Nem oranı (birimsiz)

M_t : t anındaki nem miktarı (g su/g kurumadde)

M_e : Denge anındaki nem miktarı (g su/g kurumadde)

M_0 : Başlangıçtaki nem miktarı (g su/g kurumadde) (Maskan, 2001).

2.5.2 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Kurutma eğrilerinin matematiksel olarak açıklanması için kullanılan modeller Tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1 Çalışmada kullanılan ince tabaka kurutma modelleri

Model adı	Denklem	Kaynak
Lewis	$MR = \exp(-k \cdot t)$	(Ayensu, 1997)
Henderson–Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(Westerman vd., 1973)
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	(Agrawal ve Singh 1977)
Logaritmik (Logarithmic)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(Yagcioglu vd., 1999)
Midilli–Küçük	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(Midilli vd., 2002)
Weibull	$MR = \exp[-(t/\alpha)^\beta]$	(Corzo vd., 2008)

2.5.3 Efektif Difüzyon Katsayısı ve Arrhenius Tabanlı Aktivasyon Enerjisi

Kurutma sürecinde nem taşınım davranışını tanımlamak amacıyla efektif nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) değerleri, ince tabaka kurutma varsayımı altında Fick'in ikinci yasası esas alınarak hesaplanmıştır. Elma dilimleri levha geometri kabul nem oranı (MR) aşağıdaki eşitlik (2.3) ile ifade edilmiştir;

$$\mathrm{MR} = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(\frac{-\pi^2 Deff}{4L^2}t\right) \quad (2.3)$$

Burada MR nem oranını, M□ t anındaki nem içeriğini, M_0 başlangıç nem içeriğini, M_e denge nem içeriğini, t zamanı (s), L ise örnek yarı kalınlığını (m) temsil etmektedir. Elde edilen MR değerlerinin doğal logaritması alınarak aşağıdaki doğrusal form (2.4) kullanılmıştır;

$$\ln(\mathrm{MR}) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\frac{-\pi^2 Deff}{4L^2}t \quad (2.4)$$

Bu doğrusal ilişkinin eğiminden $D_e$ff değerleri hesaplanmıştır.

Sıcaklığın difüzyon katsayısı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla Arrhenius eşitliği (2.5) kullanılarak aktivasyon enerjisi (E_a) değerleri hesaplanmıştır;

$$\mathrm{D}_{eff} = D_0 exp\frac{-E_a}{RT} \quad (2.5)$$

Burada D_0 ön-üstel katsayı (m²/s), E_a aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R gaz sabiti (8.314 J mol^{-1} K^{-1}) ve T mutlak sıcaklığı (K) ifade etmektedir. ln($D_e$ff) ile 1/T değerleri arasındaki doğrusal regresyonun eğiminden aktivasyon enerjisi belirlenmiştir (Arrhenius, 1889; Madamba vd., 1996).

2.5.4 Rehidrasyon Modelleri

Rehidrasyon kapasitesini kinetik olarak tanımlayabilmek için kullanılan modeller Tablo 2.2.' de belirtilmiştir.

Tablo 2.2 Çalışmada kullanılan rehidrasyon kapasitesi modelleri

Model adı	Denklem	Kaynak
Peleg	$RR=t/k_1+k_2t$	(Peleg, 1988)
Weibull	$RR = \exp[-(t/\alpha)^{\beta}]$	(Corzo vd., 2008)
Eksponensiyel	RR=exp(-kt)	(Lewis,1921)

2.5.5 Termodimaik Parametreler

Tez çalışması kapsamında kurutma karakteristiklerinin değerlendirilmesinde entalpi (ΔH), entropi (ΔS) ve Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) gibi termodinamik parametreler kullanılmıştır.

Entalpi değişimi (ΔH) aşağıdaki eşitlik (2.6) kullanılarak belirlenmiştir;

$$\Delta H = Ea - RT \quad (2.6)$$

Burada E_a aktivasyon enerjisini (kJ mol^{-1}), R evrensel gaz sabitini (8.314 J mol^{-1} K^{-1}) ve T mutlak sıcaklığı (K) ifade etmektedir.

Entropi değişimi (ΔS) aşağıdaki denklem (2.7) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\Delta S = R(ln\frac{D0hp}{kbT}) \quad (2.7)$$

Burada D_0 ön-üstel faktörü (m^2 s^{-1}), h□ Planck sabitini (6.626×10^{-34} J s) ve k_B Boltzmann sabitini (1.381×10^{-23} J K^{-1}) temsil etmektedir.

Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) ise aşağıdaki eşitlik (2.8) ile hesaplanmıştır:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.8)$$

Bu parametreler kurutma sürecinin endotermik/ekzotermik yapısını, sistemdeki düzensizlik değişimini ve sürecin kendiliğinden gerçekleşme eğilimini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Eyring, 1935; Madamba vd., 1996).

2.6 Renk Değerleri İçin Temel Bileşen Analizi

Kurutma işlemi sonrasında elde edilen örneklere ait renk parametreleri (L*, a* ve b* değerleri) arasındaki ilişkilerin ortaya konulması ve veri boyutunun indirgenmesi amacıyla Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA) uygulanmıştır. Analiz öncesinde veriler standartlaştırılmış ve değişkenler arası korelasyon yapısı dikkate alınmıştır. PCA sonuçları, özdeğer ve açıklanan varyans yüzdesi esas alınarak değerlendirilmiş; bileşen yükleri ve skor grafikleri kullanılarak örnekler arasındaki benzerlik ve farklılıklar yorumlanmıştır.

2.7 İstatistik Analiz

İstatistiksel analizler, çok değişkenli veri analizine olanak sağlayan Statistica 10.0 yazılım (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3
BULGULAR VE TARTIŞMA

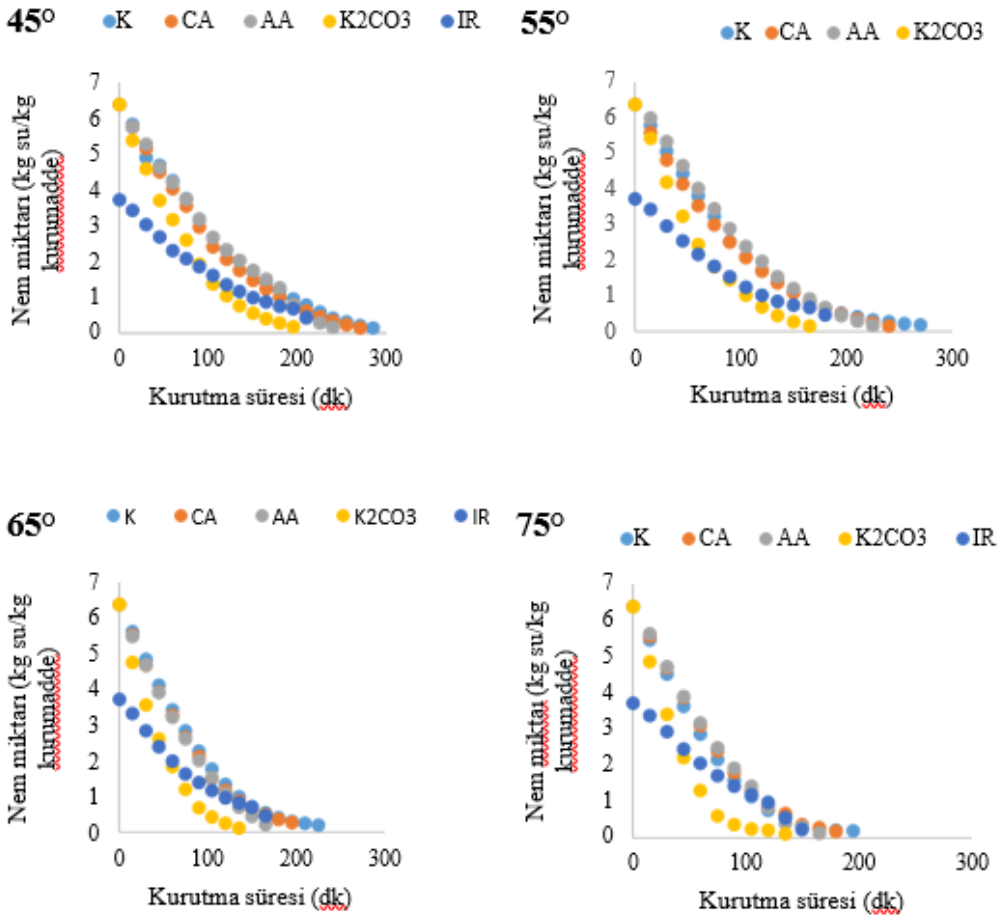
3.1 Kuruma Karakteristiklerine Ait Bulgular

3.1.1 Farklı Ön İşlem ve Sıcaklığın Elma Dilimlerinin Nem İçeriğine Etkisi

Kimyasal ve kızıl ötesi ön işlem uygulanan elma örneklerinin kabin kurutucuda farklı sıcaklıklara ait kurutma süresince değişen nem içeriği Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Tüm örneklerde artan sıcaklık derecesi ile nem içeriğinin daha hızlı azaldığı ve uygulanan tüm ön işlemlerin kontrol örneğine (K) kıyasla daha kısa kurutma süresine sahip olduğu görülmektedir. Tüm sıcaklık derecelerinde en hızlı kuruma K_2CO_3+zeytinyağı ile muamele edilen örneklere ait olmuş (185, 165, 135 ve 120 dakika), sitrik asit (SA) ile ön işlem görmüş örnekler ise (270, 240, 195, 180 dakika) neredeyse kontrol örneklerine yakın bir eğilim göstermiştir. Kızıl ötesi (IR) ile ön işlem uygulanan örneklerin nem miktarı infrared kurutucuda 30 dakika sonunda %41,84 oranında azalmış olsa dahi, kabin kurutucuda geçen süre sırasıyla 210, 180, 165 ve 150 dakika olarak saptanmış ve kurutma hızı bakımından K2CO3 kadar etkili olamamıştır.

Literatürde farklı ön işlemlerin ham maddenin kurutma davranışına etkisi üzerine dair yapılan çalışmalar incelendiğinde; K_2CO_3 ile yapılan uygulamaların diğer kimyasal ön işlemlere kıyasla daha etkin sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Örneğin, İsmail (2005), tarafından yapılan bir çalışmada üzüm örneği %5 K_2CO_3+%0,5 zeytin yağı ile ön işleme tabii tutularak kurutulmuştur. Bu örneklerin kontrol örneğine göre %123,9 oranında zamandan tasarruf sağladığı rapor edilmiştir. Gök ve Kıpçak (2024) yılında yapılan bir başka çalışmada yaban mersininin K_2CO_3 çözeltisine 1 dakika daldırıldıktan sonra kurutmanın sürede en belirgin azalmaya, etkin nem difüzyon katsayısının (Deff) değerlerinde en belirgin artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Elma dilimlerinin kurutulması ile ilgili bir başka çalışmada ise en

düşük kuruma süresinin K_2CO_3 ve zeytinyağı ile ön muamele edilen örneklere ait olduğu bildirilmiştir (Soydan, 2019).



Şekil 3.1 Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait nem içeriği

Elde edilen bulgular literatürle uyum içinde olup, K_2CO_3 + zeytinyağı ile yapılan ön işlem sayesinde elma kabuğundaki epikutikular mum tabakasının zayıflatılarak kısmen uzaklaştırıldığı ve yüzeyde mikro-çatlak oluşumunu teşvik ederek kütle transfer direncini azalttığı düşünülmektedir. Yüzeydeki bu yapısal değişimler, kurutma sırasında ürün içerisindeki nemin daha kolay yüzeye taşınmasını sağlayarak kütle transferini hızlandırmakta ve etkin nem difüzyon katsayısının (Deff) artmasına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu mekanizmanın kuruma hızının yükselmesine ve toplam kurutma süresinin kısalmasına neden olduğu değerlendirilmektedir (Shafiq vd., 2022; Keskin vd., 2022; Demircan vd., 2025).

SA ile ön işleme tabii tutulmuş örneklerin kuruma süresinin K örneklerine yakın bulunması çalışmanın metadolojik bütünlüğünü destekleyen beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Çünkü SA literatürde kurutma hızını arttırmak amacından ziyade enzimatik esmerleşmeyi baskılayarak ürününün renk kalitesini koruyan bir kalite ajanı olarak görev almaktadır. Bu etki, SA' nın pH düşürücü özelliği ve polifenol oksidaz (PPO) enziminin aktivitesini sınırlandırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Nitekim birçok çalışmada SA ön işleminin, kütle transfer direnci ve etkin nem difüzivitesi üzerinde sınırlı bir etki gösterdiği, buna karşın renk stabilitesi üzerinde belirgin iyileştirmeler sağladığı raporlanmıştır. Örneğin Yıldız (2022) tarafından muz halkaları %2,5 SA çözeltisi ile muamele edilerek güneş enerjili kurutucuda kurutulmuş ve taze muz halkalarında renk kalitesi oldukça yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde patates kurutmada farklı ön-işlemlerin karşılaştırıldığı bir çalışmada SA ön işlemlerinin kuruma hızına belirgin bir etkisinin olmadığı, buna karşılık daha iyi renk ve daha yüksek C vitamini konsantrasyonu sağladığı açıkça ifade edilmiştir (Sun vd, 2020). Ayrıca bazı ürünlerde SA uygulamasının kurutmayı hızlandırmadığı, hatta ön-işlemler arasında en yüksek kuruma süresine neden olabildiği de bildirilmiştir (Şimşek ve Süfer, 2021).

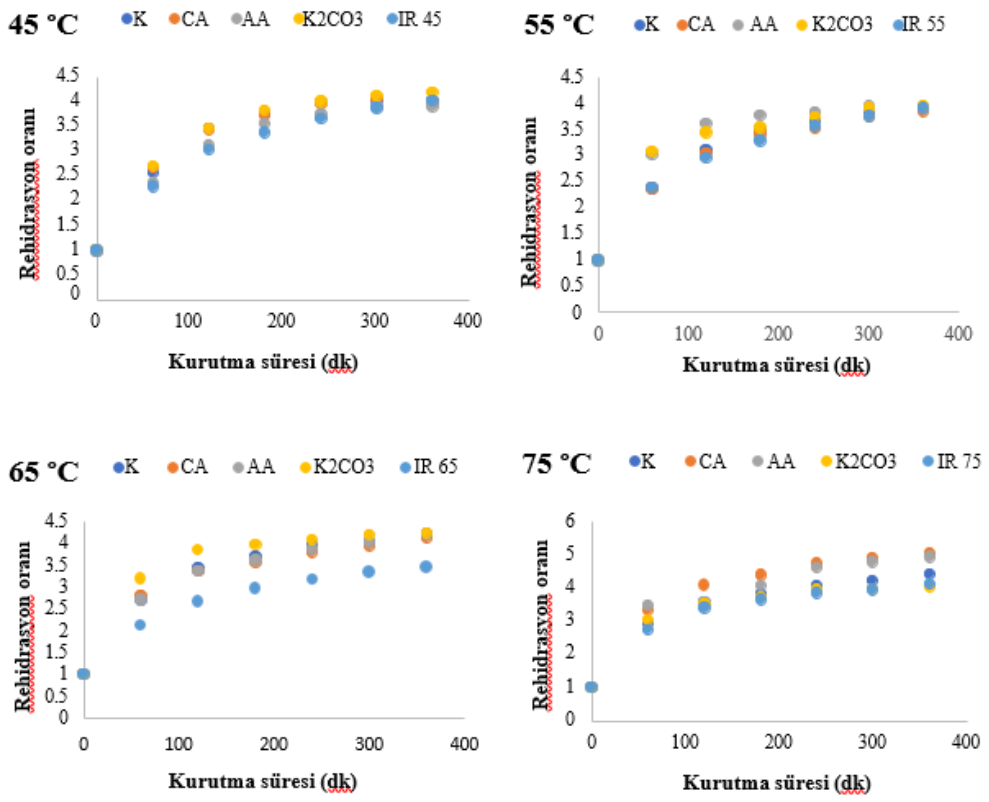
AA ile ön işleme tabi tutulmuş örneklerde kuruma süresinin K örneklerine kıyasla daha kısa bulunması, AA'nın esmerleşmeyi önleyici etki mekanizması üzerinden açıklanabilir. Literatürde AA'nın, oksidatif reaksiyonlar sırasında oluşan kinonları polifenollere indirgediği ve böylece esmerleşme reaksiyon zincirini kestiği bildirilmektedir (Rocculi vd, 2007). Bu mekanizma, pH düşürücü etkiye dayanan SA den farklı olarak, kurutma sırasında ürün yüzeyinde sertleşme ve reaksiyon kaynaklı bariyer oluşumunu geciktirebilmekte ve nem transferini sınırlı düzeyde iyileştirebilmektedir (Moon vd, 2020). Nitekim elma dilimleri üzerinde yapılan çalışmalarda AA ön işleminin kontrol örneklerine göre daha kısa kuruma süresi sağladığı raporlanmış, ancak bu etkinin epikutikular mum tabakasını hedef alan alkali ön işlemler kadar belirgin olmadığı vurgulanmıştır (Akpınar Borazan ve Yokuş, 2014; Thuwapanichayanan vd, 2014; Soydan, 2019).

Termal bir ön işlem olan kızılötesi (IR) uygulamasından elde edilen kuruma eğrileri, kimyasal olarak ön işleme tabi tutulan elma dilimlerine ait kuruma eğrileri ile değerlendirilmiştir (Şekil 3.1). Şekil 3.1'de görüldüğü üzere tüm sıcaklık

koşullarında (45,55,65,75 C) K_2CO_3 ön işlemini takiben en hızlı kuruma süresi IR uygulanan örneklerden elde edilmiştir. IR ön işlemi, ürün yüzeyine doğrudan aktarılan enerjinin ürün tarafından soğrulması ve ürün içinde artan sıcaklıkla beraber nem miktarının azalması sayesinde (Özkoç, 2010; Günaydın vd., 2023) hızlı ve etkin bir kurutma sağlamıştır. Bu mekanizma, IR uygulamasının kimyasal ön işlemler gibi yüzey bariyerini değiştirmemesine rağmen, termal etki yoluyla nem uzaklaştırma hızını belirgin biçimde arttırabildiğini göstermektedir. Ancak IR uygulaması epikutikular mum tabakasının zayıflatan bir kimyasal etki içermediğinden, kütle transfer direncini doğrudan azaltan K_2CO_3 ön işlemine kıyasla kuruma süresi daha uzun kalmış; buna karşın SA ve AA asit gibi kalite odaklı kimyasal ön işlemlerden daha hızlı bir kuruma davranışı sergilemiştir. Literatürde termal ve termal olmayan (kimyasal) ön işlemlerin birlikte değerlendirildiği çalışmalar nispeten sınırlı olup, IR odaklı çalışmaların önemli bir kısmı kimyasal ön işlem karşılaştırmasından ziyade IR'nin şiddeti, ürüne mesafesi, ürün kalınlığı ve hava hızı gibi proses parametrelerinin kurutma süresi ve kalite üzerindeki etkilerine yoğunlaşmaktadır (Darvishi vd., 2013; Adak vd., 2017; Aktaş vd., 2017; Alaei vd., 2018; Boateng vd., 2021). Nitekim elma dilimlerinde IR uygulamasının kuruma periyodu, rehidrasyon oranı, renk ve büzülme gibi kalite parametreleri üzerindeki etkisinin IR şiddeti, dilim kalınlığı ve hava hızı gibi değişkenlerle birlikte incelendiği ve IR'nin bu parametrelere bağlı olarak kuruma süresini anlamlı biçimde değiştirebildiği de raporlanmıştır (El-Mesery vd., 2023). Benzer şekilde, elma dilimlerinde IR kurutma kinetiği ve etkin nem difüzivitesi (Deff) üzerine yapılan bir başka çalışmada IR'nin kuruma davranışını belirgin biçimde etkilediği ve Deff üzerinden proses verimliliğinin değerlendirildiği gösterilmiştir (Salehi and Satorabi, 2021). Ayrıca kombine kurutma prosesi tasarlanan bir çalışmada elma dilimleri infrared kurutucu ile 1 saat boyunca ön ısıtmaya tabii tutulduktan sonra kabin kurutucuda kurutma yapılmış ve kuruma süresinin normal kabin kurutucuya kıyasla %17 oranında düştüğü rapor edilmiştir (Soydan, 2019).

3.1.2 Farklı Ön İşlem ve Sıcaklığın Elma Dilimlerinin Rehidrasyon Kapasitesine Etkisi

Şekil 3.2' de farklı kurutma sıcaklıklarında elde edilen rehidrasyon oranı–zaman eğrileri birlikte değerlendirildiğinde, tüm örneklerde başlangıçta hızlı bir su alımı gerçekleştiği, ilerleyen dakikalarda ise artış hızının azalarak denge değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Bu davranış, kurutma sırasında oluşan gözenek yapısı ile hücre duvarı bütünlüğünün rehidrasyon sürecindeki rolünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2 Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait rehidrasyon oranları

45 °C'de kurutulan örneklerde eğrilerin daha dengeli ve birbirine yakın seyretmesi, büzülmenin sınırlı kaldığını ve dokusal bütünlüğün büyük ölçüde korunduğunu düşündürmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte bazı örneklerde rehidrasyon oranındaki nispi düşüş, literatürde yüzey sertleşmesi olarak tanımlanmaktadır (Baik ve Mittal, 2003; Krokida ve Maroulis, 2001). Buna karşın 75 °C'de gözlenen nispi artışın, yüksek sıcaklığın tetikleyebildiği mikro-yapısal bozulmalar ve buna bağlı örnekteki gözenek artışı sonucunda suyun doku içine daha kolay nüfuz etmesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Marabi ve Saguy, 2004; Witrowa-Rajchert vd., 2009). Ön işlemler

açısından bakıldığında K_2CO_3 uygulamasının çoğu sıcaklıkta daha yüksek denge rehidrasyon oranları göstermesi, alkali ortamın bitkisel dokuda yüzey bariyerini zayıflatıp geçirgenliği artırarak kütle transferini kolaylaştırabilen etkisiyle uyumlu görünürken (Doymaz, 2008); AA ve SA uygulamalarının ise özellikle enzimatik esmerleşmeyi sınırlayan karakterleri sayesinde daha istikrarlı bir kalite profili sergileyebildiği bildirilmektedir (Doymaz, 2010). Genel olarak grafikler, kurutma hızının yüksek olmasının her zaman daha iyi bir rehidrasyon kapasitesi anlamına gelmediğini; aksine orta sıcaklıklarda uygulanan uygun kimyasal ön işlemlerin ürünün su geri kazanım yeteneğini daha olumlu etkileyebildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, kurutma koşullarının yalnızca proses verimliliği açısından değil, nihai ürün kalitesinin korunması bakımından da dengeli biçimde seçilmesi gerektiğini vurgulayan önceki çalışmalarla uyum içindedir (Ratti, 2001; Bilbao-Sáinz vd., 2005; Nurkhoeriyati vd., 2021).

3.2 Matematiksel Modelleme Sonuçları

3.2.1 Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Kurutma süresi boyunca elma dilimlerinde meydana gelen nem transferinin nicel olarak tanımlanabilmesi ve farklı ön işlem uygulamalarının kuruma kinetiği üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, deneysel kurutma verileri çeşitli matematiksel modeller kullanılarak analiz edilmiştir.

Bu kapsamda, farklı sıcaklıklar ve ön işlem koşulları altında elde edilen kurutma eğrileri, literatürde ince tabaka kurutma proseslerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ampirik ve yarı ampirik kurutma modellerine uyarlanmıştır (Lewis, Henderson-Pabis, Logaritmik, Page, Midilli-Küçük, Weibull). Matematiksel modelleme yaklaşımı, yalnızca kurutma eğrilerinin tanımlanmasını değil, aynı zamanda kuruma hızındaki değişimlerin ve ön işlemlere bağlı farklılıkların istatistiksel olarak değerlendirilmesini de mümkün kılmaktadır.

Elde edilen model parametreleri ve istatistiki parametreler (R2 ve RMSE), farklı ön işlem uygulamalarının ve farklı kurutma sıcaklıklarının kuruma davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla sırasıyla Tablo 3.1-Tablo 3.5' de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Kontrol (K) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Lewis	45	k=0.008759	0.980009	0.042632
	55	k=0,010636	0.981090	0.042765
	65	k=0.012965	0.984735	0.038341
	75	k=0.014999	0.976148	0.051287
Henderson-Pabis	45	a=1.056708 k=0.009257	0.984258	0.037831
	55	a=1.074709 k=0.011395	0.987509	0.034757
	65	a=1.056204 k=0.013659	0.988546	0.033212
	75	a=1.061925 k=0.015870	0.986762	0.036522
Logaritmik	45	a=1.211533 k=0.006245 c=-0.199408	0.997216	0.015909
	55	a=1.145869 k=0.00905 c=0.10114	0.994725	0.022588
	65	a=1.130419 k=0.01078 c=0.10295	0.996064	0.019468
	75	a=1.141791 k=0.01244 c=0.10784	0.995009	0.022425
Page	45	k=0.002505 n=1.257175	0.995427	0.020389
	55	k=0.002580 n=1.301867	0.999520	0.006810
	65	k=0.004006 n=1.260324	0.998737	0.011028
	75	k=0.004031 n=1.301170	0.999302	0.008389

Tablo 3.1 Kontrol (K) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri (devamı)

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Midilli-Küçük	45	a=0.98993 b=0.00024 k=0.00362 n=1.153837	0.997771	0.014237
	55	a=0.99131 b=0.00001 k=0.00225 n=1.330947	0.999579	0.006377
	65	a=0.988262 b=0.000044 k=0.003878 n=1.260781	0.998986	0.009883
	75	a=0.991521 b=0.00002 k=0.003839 n=1.308641	0.999392	0.007830
Weibull	45	α=1.257174 β=117.223962	0.995427	0.020389
	55	α=1.301867 β=97.327923	0.999520	0.006810
	65	α=1.260324 β=79.821299	0.998737	0.011028
	75	α=1.301170 β=69.234321	0.999302	0.008389

Tablo 3.2 Askorbik Asit (AA) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Lewis	45	k=0.008631	0.980352	0.0420
	55	k=0.009837	0.961591	0.0625
	65	k=0.013138	0.974567	0.0493
	75	k=0.013321	0.980530	0.0439
Henderson–Pabis	45	a=1.059907 k=0.009161	0.985380	0.0362
	55	a=1.098373 k=0.010811	0.974465	0.0509
	65	a=1.056326 k=0.013898	0.979494	0.0443
	75	a=1.067114 k=0.014189	0.986375	0.0367
Logaritmik	45	a=1.249543 k=0.005918 c=-0.235813	0.998869	0.0100
	55	a=1.406160 k=0.006032 c=-0.362955	0.996543	0.0187
	65	a=1.379373 k=0.007665 c=-0.371142	0.999355	0.0078
	75	a=1.181423 k=0.010470 c=-0.147226	0.996163	0.0195
Page	45	k=0.002401 n=1.263648	0.996925	0.0166
	55	k=0.001199 n=1.447892	0.998825	0.0109
	65	k=0.003191 n=1.320413	0.995860	0.0199
	75	k=0.003395 n=1.307290	0.999627	0.0060

Tablo 3.2 Askorbik Asit (AA) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri (devamı)

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Midilli–Küçük	45	a=0.996579 b=-0.000316 k=0.003916 n=1.131451	0.999315	0.0078
	55	a=1.001871 b=-0.000242 k=0.001781 n=1.343149	0.999891	0.0033
	65	a=0.995890 b=-0.000757 k=0.005812 n=1.133485	0.999677	0.0055
	75	a=0.996182 b=-0.000054 k=0.003540 n=1.292676	0.999726	0.0052
Weibull	45	α=1.447891 β=104.120343	0.998825	0.0109
	55	α=1.447891 β=104.120343	0.998825	0.0109
	65	α=1.320412 β=77.691239	0.995860	0.0199
	75	α=1.307290 β=77.404916	0.999627	0.0060

Tablo 3.3 Sitrik Asit (SA) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Lewis	45	k=0,014002	0,982453	0,040269
	55	k=0,011079	0,988705	0,031995
	65	k=0,012174	0,980539	0,043668
	75	k=0,013321	0,975191	0,050651
Henderson-Pabis	45	a=1,061709 k=0,010033	0,987379	0,034152
	55	a=1,044777 k=0,011571	0,991357	0,027987
	65	a=1,065924 k=0,012944	0,985882	0,037193
	75	a=1,072781 k=0,014961	0,981664	0,043545
Logaritmik	45	a=1,187354 k=0,007150 c=-0,165260	0,998085	0,013302
	55	a=1,141946 k=0,008710 c=-0,130503	0,999483	0,006842
	65	a=1,167703 k=0,009672 c=-0,135761	0,995848	0,020170
	75	a=1,195752 k=0,010772 c=-0,158768	0,994345	0,024183
Page	45	k=0,002683 n=1,262871	0,998321	0,012454
	55	k=0,004389 n=1,199071	0,998392	0,012071
	65	k=0,003063 n=1,302767	0,999017	0,009815
	75	k=0,002822 n=1,362642	0,998988	0,010229

Tablo 3.3 Sitrik Asit (SA) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri (devamı)

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Midilli–Küçük	45	a=0,993203 b=-0,000159 k=0,003403 n=1,195881	0,999365	0,007658
	55	a=0,996102 b=-0,000221 k=0,006023 n=1,110463	0,999849	0,003701
	65	a=0,988926 b=-0,000058 k=0,003036 n=1,296947	0,999309	0,008227
	75	a=0,990093 b=-0,000066 k=0,002828 n=1,354359	0,999263	0,008730
Weibull	45	α=1,262870 β=108,692111	0,998321	0,012454
	55	α=1,199071 β=92,519283	0,998392	0,012071
	65	α=1,302767 β=85,036357	0,999017	0,009815
	75	α=1,362642 β=74,301010	0,998988	0,010229

Tablo 3.4 Potasyum karbonat (K_2CO_3) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Lewis	45	k=0,013585	0,984461	0,038496
	55	k=0,016458	0,988133	0,034203
	65	k=0,021668	0,991953	0,028361
	75	k=0,024648	0,976148	0,051287
Henderson-Pabis	45	a=1,047033 k=0,014208	0,987425	0,034630
	55	a=1,050123 k=0,017256	0,991502	0,028943
	65	a=1,024828 k=0,022175	0,992808	0,026811
	75	a=1,044845 k=0,025711	0,979515	0,047530
Logaritmik	45	a=1,159446 k=0,010451 c=-0,145424	0,997148	0,016491
	55	a=1,132365 k=0,013608 c=-0,107492	0,997925	0,014302
	65	a=1,098893 k=0,017763 c=-0,095542	0,998991	0,010044
	75	a=1,342514 k=0,014968 c=-0,330443	0,998292	0,013724
Page	45	k=0,004616 n=1,242639	0,997265	0,016149
	55	k=0,006313 n=1,225233	0,999202	0,008872
	65	k=0,011041 n=1,167627	0,997801	0,014826
	75	k=0,006136 n=1,364917	0,998211	0,014047

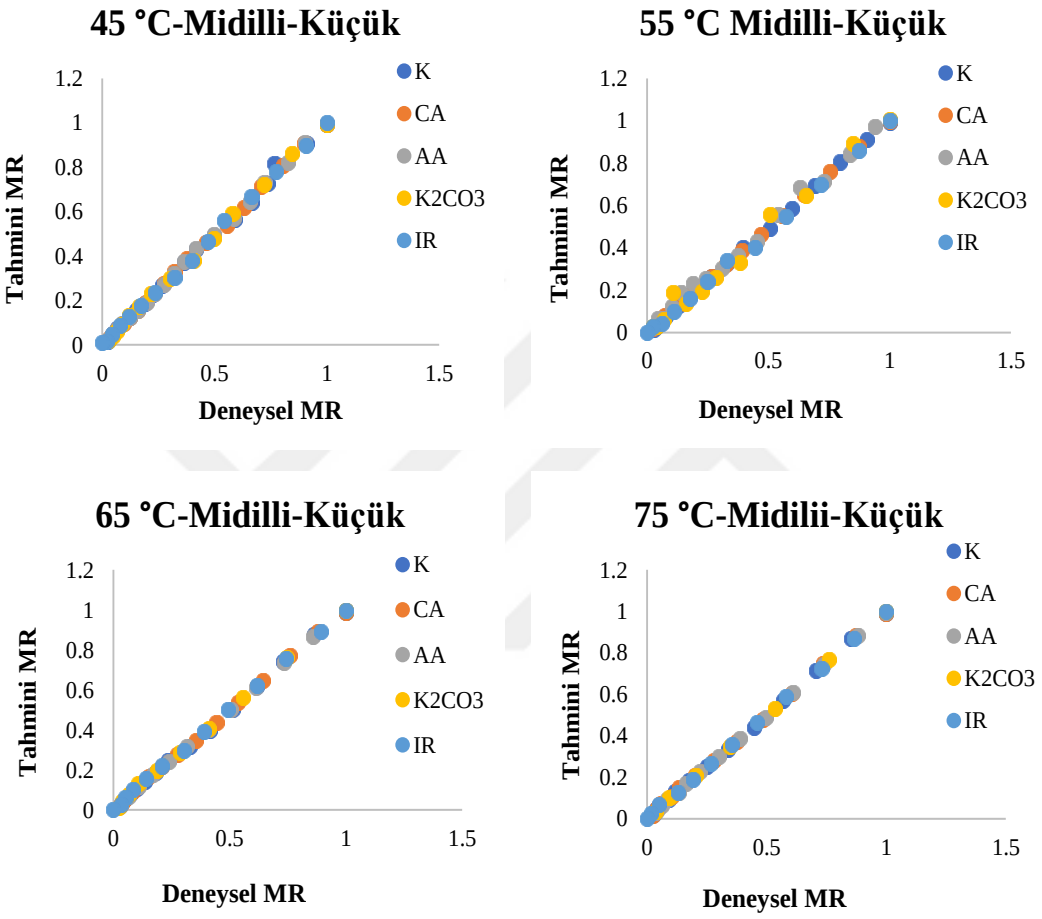
Tablo 3.4 Potasyum karbonat (K_2CO_3) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri (devamı)

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Midilli–Küçük	45	a=0,989718 b=-0,000196 k=0,005462 n=1,187107	0,998312	0,012688
	55	a=1,005103 b=-0,000134 k=0,007614 n=1,173272	0,999480	0,007160
	65	a=0,996064 b=-0,000339 k=0,014296 n=1,082764	0,999116	0,009399
	75	a=0,998870 b=-0,000793 k=0,008883 n=1,232591	0,999815	0,004516
Weibull	45	α=1,242638 β=75,798039	0,997265	0,016149
	55	α=1,225233 β=62,429648	0,999202	0,008872
	65	α=1,167626 β=47,430570	0,997801	0,014826
	75	α=1,364917 β=41,753864	0,998211	0,014047

Tablo 3.5 Kızılötesi (IR) örneklerine ait ince tabaka kurutma modelleri

MODEL	SICAKLIK (°C)	PARAMETRE	R^2	RMSE
Lewis	45	k=0,011654	0,9661	0,0591
Henderson-Pabis	45	a=1,080702 k=0,012565	0,9744	0,0513
Logaritmik	45	a=1,345860 k=0,007205 c=-0,320164	0,9978	0,0148
Page	45	k=0,001981 n=1,386556	0,9947	0,0232
Midilli–Küçük	45	a=1,00164 b=-0,0004 k=0,003884 n=1,200395	0,9989	0,0104
Weibull	45	α=1,386554 β=89,037421	0,9947	0,0232
Lewis	55	k=0,015118	0,96860	0,0581
Henderson-Pabis	55	a=1,076268 k=0,016213	0,97617	0,0506
Logaritmik	55	a=1,310544 k=0,009810 c=-0,280912	0,99748	0,0164
Page	55	k=0,002640 n=1,403307	0,99764	0,0159
Midilli–Küçük	55	a=1,000904 b=-0,000420 k=0,004208 n=1,267246	0,99989	0,0034
Weibull	55	α=1,403307 β=68,758868	0,99764	0,0159
Lewis	65	k=0,013769	0,96449	0,0618
Henderson-Pabis	65	a=1,083364 k=0,014859	0,97332	0,0536
Logaritmik	65	a=1,333733 k=0,008774 c=-0,300298	0,99645	0,0195
Page	65	k=0,002011 n=1,435430	0,99735	0,0168
Midilli–Küçük	65	a=0,997336 b=-0,000358 k=0,003063 n=1,313293	0,99950	0,0073
Weibull	65	α=1,435429 β=75,608238	0,99735	0,0168
Lewis	75	k=0,014720	0,96501	0,0612
Henderson-Pabis	75	a=1,073216 k=0,015749	0,97213	0,0546
Logaritmik	75	a=1,375744 k=0,008681 c=-0,354940	0,99803	0,0144
Page	75	k=0,002479 n=1,409164	0,99494	0,0232
Midilli–Küçük	75	a=0,998064 b=-0,000647 k=0,004643 n=1,221215	0,99934	0,0083
Weibull	75	α=1,409163 β=70,650190	0,9949	0,023255

Uygulanan tüm ön işlem ve sıcaklık koşullarında Midilli–Küçük modelinin en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerlerini vermesi, modelin kurutma sürecini temsil etme kapasitesinin diğer modellere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu modelin deneysel nem oranı verileri ile sağladığı mükemmel uyum Şekil 3. 3' te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Tahmini ve deneysel nem oranlarının uyumu (Midilli-Küçük modeli)

Midilli–Küçük modeli, difüzyon kontrollü kuruma davranışını temsil eden üstel terimin yanı sıra, deneysel kurutma eğrilerinde sıklıkla gözlenen doğrusal sapmaları tanımlayan ek bir terim içermektedir (Midilli vd., 2002). Bu yapı, kimyasal (K_2CO_3, SA, AA) ve termal (IR) ön işlemlerin neden olduğu yüzey ve iç yapı değişimlerinin kurutma eğrisi üzerindeki etkilerinin daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır (Ertekin ve Fırat, 2017; Onwude vd., 2016). Literatürde de ön işlem uygulanmış tarımsal ürünlerin kurutma davranışının modellenmesinde Midilli– Küçük modelinin sıklıkla en iyi uyumu sağladığı bildirilmektedir. Örneğin IR ile elma dilimlerinin kurutulduğu çalışmada Midilli eşitliğinin deneysel eğrileri

başarılı şekilde temsil ettiği belirtilirken (Toğrul, 2005), başka bir çalışmada elma dilimlerinin kurutulmasında kimyasal (potasyum karbonat, sitrik+askorbik asit karışımı, haşlama vb.) ve termal (IR) ön işlem uygulamalarının Midilli–Küçük modeliyle yüksek uyum sağladığı belirtilmektedir (Soydan, 2019).

Benzer şekilde, yalnızca elma değil, farklı meyvelerde de ince tabaka kurutma davranışının modellenmesinde Midilli-Küçük modelinin etkin biçimde kullanıldığı bildirilmektedir. Örneğin armut için yürütülen bir çalışmada deneysel ve hesaplanan nem oranı değerleri arasında genelleştirilmiş Midilli modeli ile iyi bir uyum bulunduğu ifade edilmiştir (Lutovska vd., 2016). K_2CO_3 + zeytinyağı ile ön işlem uygulanan üzüm örneklerinde yüzey bariyerinin azalarak kurumanın hızlandığı ve bu tür ön işlemlerin kurutma eğrisi formunu değiştirmesi nedeniyle daha esnek modellerin (Midilli–Küçük) daha yüksek uyum verdiği ifade edilmiştir (Doymaz, 2012). Bu bulgular, mevcut çalışmada farklı sıcaklık ve ön işlem koşullarında Midilli–Küçük modelinin en yüksek uyumu vermesinin literatürle uyumlu olduğunu ve seçilen modelin kurutma eğrilerinin temsili açısından uygun olduğunu desteklemektedir.

3.2.2 Efektif Nem Difüzyonu ve Arrhenius Tabanlı Aktivasyon Enerjisi

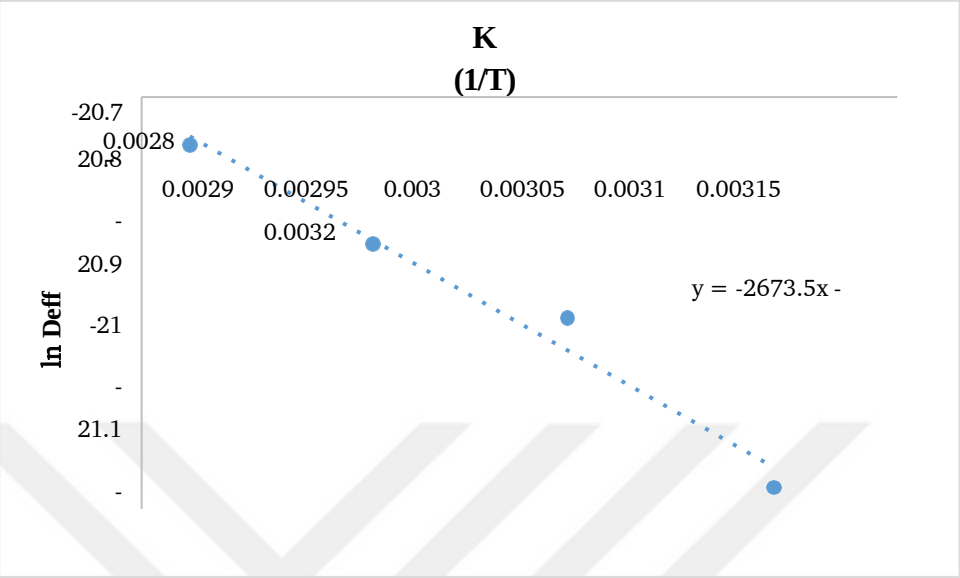
Kurutma prosesi boyunca elma dilimlerinden suyun uzaklaşması, çoğu gıda matriksinde sabit hız periyodundan ziyade azalan hız periyodu ile karakterize edilmekte olup, bu bölgede nem taşınımı büyük ölçüde ürün içindeki difüzyon mekanizması ile açıklanmaktadır (Crank, 1975; Mujumdar, 2014). Bu nedenle prosesin tasarımı, farklı sıcaklık ve ön işlem koşullarının karşılaştırılması ve ölçek büyütme hesapları açısından efektif nem difüzyon katsayısı (D_{eff}), kurutma kinetiğini tanımlayan temel bir kütle transfer parametresi olarak kabul edilmektedir (Zogzas vd., 1996; Doymaz, 2006). İnce tabaka kurutma verilerinden efektif nem difüzyon katsayısının ($D_e$ff) hesaplanması, genellikle Fick'in ikinci yasasının uygun geometri (levha, silindir veya küre) için geliştirilen çözümlerine dayandırılmakta ve gıda kurutma literatüründe yaygın biçimde kullanılmaktadır (Ertekin ve Fırat, 2017). Tablo 3.6' da elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve ön işlemlere ait D_{eff} değerleri verilmiştir.

Tablo 3.6 Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve ön işlemlere ait D_{eff} değerleri

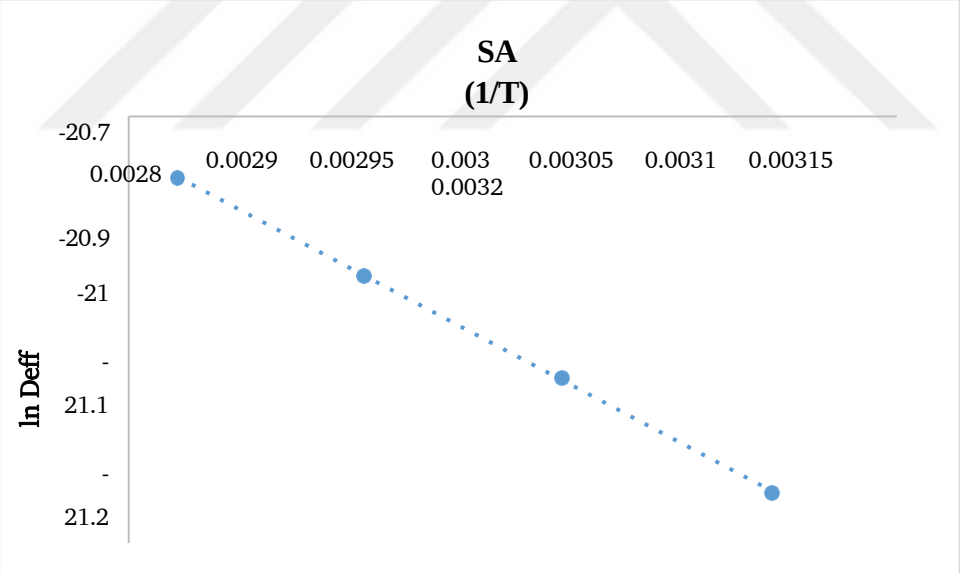
Kurutma Sıcaklığı	Ön İşlem Metodu	Efektif Nem Difüzyon Katsayısı/Deff (m^2/s)
45 °C	K	4.36009×10^{-10}
45 °C	SA	5.05581×10^{-10}
45 °C	AA	4.21099×10^{-10}
45 °C	K_2CO_3	8.0828×10^{-10}
45 °C	IR	8.37×10^{-10}
55 °C	K	$6.31492403342935\times 10^{-10}$
55 °C	SA	$6.2697244310114\times 10^{-10}$
55 °C	AA	5.96743×10^{-10}
55 °C	K_2CO_3	$8.57508164631425\times 10^{-10}$
55 °C	IR	9.64×10^{-10}
65 °C	K	$7.42372662176965\times 10^{-10}$
65 °C	SA	$7.59115227798288\times 10^{-10}$
65 °C	AA	$7.95981581402897\times 10^{-10}$
65 °C	K_2CO_3	$12.6766121343665\times 10^{-10}$
65 °C	IR	10.6×10^{-10}
75 °C	K	$9.21119264473204\times 10^{-10}$
75 °C	SA	$9.127642095014\times 10^{-10}$
75 °C	AA	$8.07267029088401\times 10^{-10}$
75 °C	K_2CO_3	$14.5227139032009\times 10^{-10}$
75 °C	IR	12.9×10^{-10}

Aktivasyon enerjisi (E_a), kurutma sırasında nemin ürün matriksi içinde difüze olabilmesi için aşılması gereken enerji bariyerini temsil eder (Vyazovkin, 2016). Bu nedenle difüzyonun sıcaklığa duyarlılığını nicel olarak yorumlamaya imkan verir. D_{eff}'in sıcaklıkla artması çoğu gıdada gözlenen tipik bir davranıştır ve bu sıcaklık bağımlılığı genellikle Arrhenius tipi bir ilişkiyle ifade edilir (Adus ve Widom, 2024). Literatürde E_a'nın, farklı kurutma koşulları ve ürün yapısına bağlı olarak değiştiği; bu parametrenin proses optimizasyonu ve enerji verimliliği değerlendirmelerinde önemli bir gösterge olarak kullanıldığı vurgulanmaktadır (Motevali vd., 2010, Babalis ve Belessiotis, 2004; Goyal vd., 2007, Pahavanzadeh

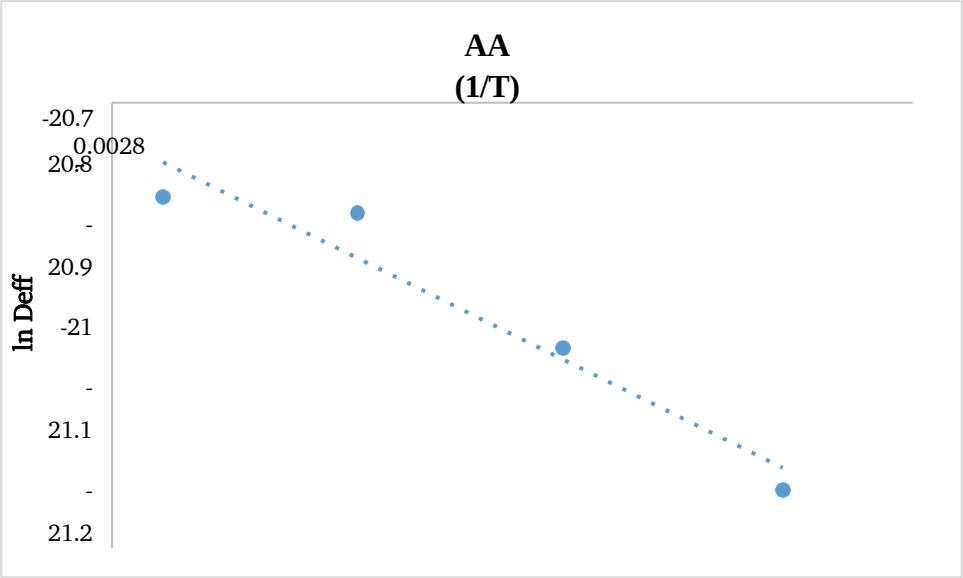
vd., 2001; Mousavi ve Javan, 2009). Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8' de sırasıyla K, SA, AA, K_2CO_3 ve IR örneklerine ait ln(D_{eff})-1/T arasında çizilen eğriler verilmiş, eğrilerin eğiminden hesaplanan E_a değerleri Şekil 3.9' da sunulmuştur.



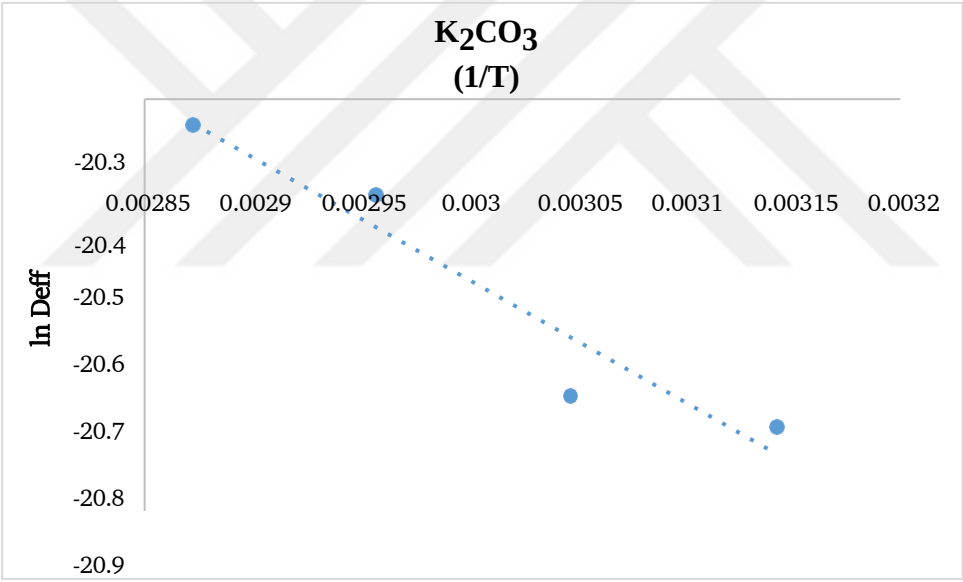
Şekil 3.4 Kontrol örneğine ait difüzyon katsayısı- sıcaklık ilişkisi



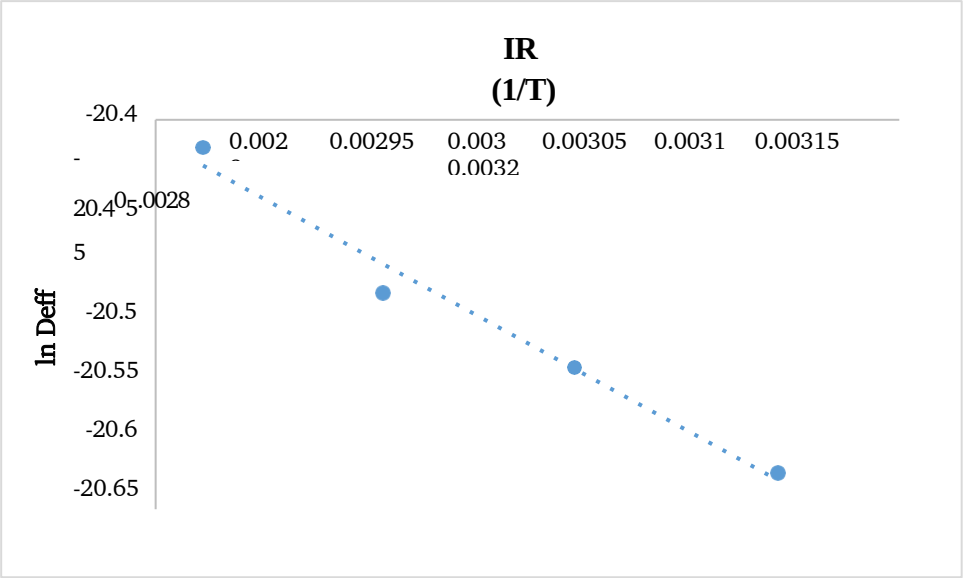
Şekil 3.5 Sitrik asit örneğine ait difüzyon katsayısı sıcaklık ilişkisi



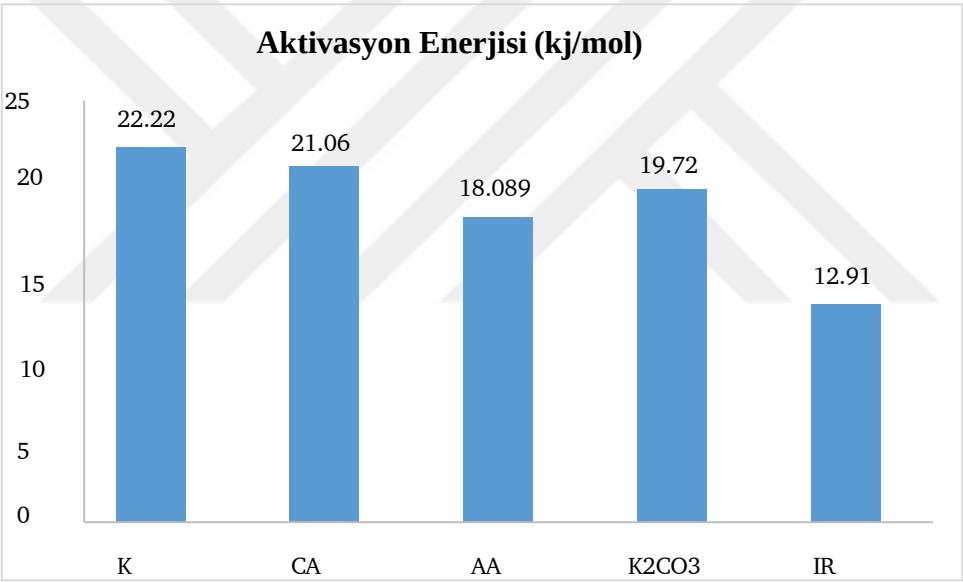
Şekil 3.6 Askorbik asit örneğine ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 3.7 Potasyum karbonat (K_2CO_3) örneğine ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 3.8 Kızıl ötesi (IR) örneğine ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 3.9 Farklı ön işlemlere ait aktivasyon enerjisi değerleri

Şekil 3.9'da verilen E_a değerleri, farklı ön işlemlerin elma dilimlerinde nem difüzyonu için aşılması gereken enerji bariyerini belirgin biçimde değiştirdiğini göstermektedir. K örneklerinde en yüksek E_a değerinin (22.227 kJ/mol) elde edilmesi, ön işlem uygulanmayan numunelerde kütle transfer direncinin daha baskın olduğunu ve nem taşınımının daha fazla enerji gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Kimyasal ön işlemler arasında CA ve K_2CO_3 uygulamalarının E_a değerlerini K örneğine kıyasla düşürdüğü, AA uygulamasının ise daha belirgin bir azalma sağladığı görülmektedir. En düşük E_a değerinin IR örneklerinde (12.912 kJ/mol) elde edilmesi, IR ön işleminin difüzyon için gerekli enerji bariyerini önemli

ölçüde azalttığını düşündürmektedir. Bu eğilim, tarımsal ürünlerin kurutulmasında ön işlemlerin aktivasyon enerjisini düşürerek nem difüzyonunu hızlandırabildiğini bildiren literatür bulgularıyla uyumludur (Babalis ve Belessiotis, 2004; Motevali vd., 2010; Onwude vd., 2016). E_a değerindeki bu azalma, kurutma sürecinin daha düşük enerji gereksinimiyle yürütülebileceğini ve özellikle IR uygulamasının proses verimliliği açısından avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

3.2.3 Rehidrasyon Kapasitesinin Matematiksel Modellenmesi

Kurutulmuş gıda ürünlerinde rehidrasyon kapasitesi, ürünün kurutma sırasında maruz kaldığı yapısal değişimlerin ve hücresel hasarın dolaylı bir göstergesi olarak kabul edilmekte olup (Demiray ve Tülek, 2016), kurutma kalitesinin değerlendirilmesinde yaygın biçimde kullanılan temel kalite parametrelerinden biridir (Taşova ve Güzel, 2020). Rehidrasyon süreci, kurutma sırasında uzaklaştırılan suyun ürün matriksi tarafından tekrar absorbe edilmesini ifade etmekte ve bu süreç; hücre duvarı bütünlüğü, gözenek yapısı, büzülme derecesi ve kurutma koşulları gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Lewicki, 1998a; Mayor ve Sereno, 2004). Bu nedenle rehidrasyon davranışının nicel olarak tanımlanması, yalnızca kütle artışı üzerinden değil, aynı zamanda kurutma prosesinin ürün mikro-yapısı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından da önem taşımaktadır.

Bu çalışmada farklı ön işlem ve kurutma koşullarında elde edilen elma dilimlerinin rehidrasyon davranışı, Peleg, Weibull ve Eksponensiyel modeller kullanılarak modellenmiş ve her üç modelin de deneysel verileri yüksek doğrulukla temsil edebildiği belirlenmiştir.Modellerin genel uyum başarısı birlikte değerlendirildiğinde, rehidrasyon sürecinin zamana bağlı olarak hızlı başlangıç ve ilerleyen aşamalarda yavaşlayan bir karakter sergilediği; bu davranışın hem Peleg hem de Weibull modelleri tarafından başarıyla yakalandığı görülmüştür. Bu sonuç, rehidrasyonun difüzyon kontrollü bir süreç olması ve su alım hızının zamanla azalması nedeniyle literatürde sıkça raporlanan tipik rehidrasyon kinetiği ile uyumludur (Peleg, 1988; Marabi vd., 2006).

Peleg modelinin, özellikle rehidrasyonun başlangıç evresindeki hızlı su alımını ve uzun sürelerde ulaşılan dengeye yakın davranışı başarılı şekilde temsil etmesi, model parametrelerinin rehidrasyon hızı ve kapasitesiyle doğrudan ilişkili olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yönüyle Peleg modeli, farklı ön işlemlerin rehidrasyon davranışı üzerindeki etkilerinin nicel olarak karşılaştırılmasında pratik

ve yorumlanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Benzer şekilde, Peleg modelinin elma ve diğer meyvelerin rehidrasyon kinetiğinin modellenmesinde yüksek uyum verdiği önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Planinick vd., 2005; Tepe ve Tepe, 2020).

Weibull modelinin rehidrasyon verilerini başarıyla temsil etmesi ise, modelin esnek yapısından ve şekil parametresi aracılığıyla rehidrasyon eğrisinin formunu tanımlayabilme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Özellikle farklı ön işlem uygulamaları sonucunda ürün yapısında meydana gelen değişimlerin, rehidrasyon eğrisinin şeklini etkilediği durumlarda Weibull modelinin daha iyi uyum gösterebildiği literatürde belirtilmektedir (Marabi vd., 2006; Simal vd., 2005). Bu bağlamda Weibull modelinin kullanımı, rehidrasyon sürecinin yalnızca hızını değil, aynı zamanda sürecin zamana bağlı karakterini de değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Eksponensiyel modelin de rehidrasyon verilerini tatmin edici düzeyde temsil etmesi, rehidrasyon sürecinin genel olarak birinci dereceden kinetik davranışa yakın bir eğilim sergilediğini göstermektedir. Ancak eksponensiyel modelin, Peleg ve Weibull modellerine kıyasla daha sınırlı parametre yapısına sahip olması, farklı ön işlem koşullarının neden olduğu yapısal değişimleri ayrıntılı biçimde yansıtma kapasitesini kısmen sınırlayabilmektedir. Buna rağmen, eksponensiyel modelin basitliği ve yorumlanabilirliği, rehidrasyon davranışının genel eğilimini ortaya koymak açısından literatürde hâlen yaygın biçimde tercih edildiğini göstermektedir (Lewicki, 1998b; Rastogi vd., 2002).

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada Peleg, Weibull ve Eksponensiyel modellerin birlikte kullanılması, rehidrasyon davranışının hem hız hem de eğri şekli açısından kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgular, farklı ön işlem uygulamalarının rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkilerinin, kurutma sırasında oluşan yapısal değişimlerle doğrudan ilişkili olduğunu ve bu ilişkinin matematiksel modeller aracılığıyla güvenilir biçimde ortaya konulabildiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, elma ve benzeri meyvelerde rehidrasyon kinetiğinin modellenmesine ilişkin literatürle uyumlu olup, kurutma–rehidrasyon ilişkisini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmektedir. Elde edilen model parametreleri ve istatistiki parametreler (R^2 ve RMSE), farklı ön işlem uygulamalarının ve farklı kurutma sıcaklıklarının rehidrasyon kapasitesi üzerine etkilerini ortaya koymak amacıyla sırasıyla Tablo 3.7 - Tablo 3.11' te sunulmuştur.

Tablo 3.7 Kontrol (K) örneklerine ait rehidrasyon modelleri

Model	**Sıcaklık (°C)**	**Model Parametreleri**	**R^2**	**RMSE**
Peleg	45	k1=5.142107, k2=0.076887	0,998623	0,105301
Peleg	55	k1=8.721911, k2=0.092020	0.998623	0.105309
Peleg	65	k1=5.766209, k2=0.077929	0.999207	0.098028
Peleg	75	k1=5.320461, k2=0.078485	0.997821	0.162653
Weibull	45	α=1.176547, β=78.2759	0.999163	0.106304
Weibull	55	α=1.023491, β=93.605655	0.999373	0.071066
Weibull	65	α=0.857901, β=82.960846	0.998112	0.151288
Weibull	75	α=0.761892, β=77.606518	0.996724	0.199472
Eksponensiyel	45	H=0.013343	0.996612	0.213826
Eksponensiyel	55	H=0.010749	0.999294	0.075395
Eksponensiyel	65	H=0.011476	0.994876	0.249232
Eksponensiyel	75	H=0.015671	0.991274	0.293617

Tablo 3.8 Sitrik aist (SA) örneklerine ait rehidrasyon modelleri

Model	**Sıcaklık (°C)**	**Model Parametreleri**	**R^2**	**RMSE**
Peleg	45	k1=4,820717, k2=0,082305	0,994000	0,269917
Peleg	55	k1=7,903946, k2=0,084946	0,998853	0,104002
Peleg	65	k1=4,964007, k2=0,075677	0,997200	0,191988
Peleg	75	k1=4,406810, k2=0,067354	0,999044	0,126576
Weibull	45	α=1,104395, β=72,213484	0,997593	0,170944
Weibull	55	α=0,953839, β=93,665937	0,997966	0,138491
Weibull	65	α=0,738306, β=75,375937	0,996381	0,218267
Weibull	75	α=0,806593, β=74,506193	0,997327	0,211624
Eksponensiyel	45	H=0,014289	0,996685	0,200622
Eksponensiyel	55	H=0,010538	0,997623	0,149740
Eksponensiyel	65	H=0,011826	0,983875	0,460703
Eksponensiyel	75	H=0,012391	0,991495	0,377520

Tablo 3.9 Askorbik asit (AA) örneklerine ait rehidrasyon modelleri

Model	**Sıcaklık (°C)**	**Model Parametreleri**	**R^2**	**RMSE**
Peleg	45	k1=6,411061, k2=0,065573	0,995755	0,259723
Peleg	55	k1=3,162343, k2=0,105806	0,997316	0,150660
Peleg	65	k1=5,716464, k2=0,073449	0,998827	0,124868
Peleg	75	k1=5,225711, k2=0,064617	0,968147	0,727350
Weibull	45	α=1,135437, β=92,917662	0,999096	0,119843
Weibull	55	α=0,890067, β=49,080202	0,999280	0,078026
Weibull	65	α=0,829705, β=85,130894	0,997148	0,194726
Weibull	75	α=0,687290, β=77,464272	0,970161	0,703972
Eksponensiyel	45	H=0,011114	0,996897	0,222077
Eksponensiyel	55	H=0,019340	0,998752	0,102731
Eksponensiyel	65	H=0,011048	0,991954	0,327086
Eksponensiyel	75	H=0,010920	0,948342	0,926269

Tablo 3.10 Potasyum karbonat (K_2CO_3) örneklerine ait rehidrasyon modelleri

Model	**Sıcaklık (°C)**	**Model Parametreleri**	**R^2**	**RMSE**
Peleg	45	k1=5,237766, k2=0,075023	0,998387	0,148033
Peleg	55	k1=5,988900, k2=0,070762	0,998927	0,123374
Peleg	65	k1=3,143434, k2=0,090493	0,998581	0,125618
Peleg	75	k1=4,003735, k2=0,093238	0,999400	0,076977
Weibull	45	α=0,972981, β=80,113784	0,999725	0,061079
Weibull	55	α=0,965832, β=89,320484	0,999043	0,116483
Weibull	65	α=0,774707, β=50,470727	0,998844	0,113375
Weibull	75	α=0,737231, β=55,550741	0,998633	0,116217
Eksponensiyel	45	H=0,012381	0,999639	0,070042
Eksponensiyel	55	H=0,011085	0,998873	0,126430
Eksponensiyel	65	H=0,017653	0,995453	0,224841
Eksponensiyel	75	H=0,015671	0,991274	0,293617

Tablo 3.11 Kızıl ötesi (IR) örneklerine ait rehidrasyon modelleri

Model	Sıcaklık (°C)	Model Parametreleri	R^2	RMSE
Peleg	45	k1=12,491071, k2=0,096892	0,999406	0,060789
Weibull	45	α=1,008306, β=110,181412	0,996827	0,140453
Eksponensiyel	45	H=0,009094	0,996814	0,140738
Peleg	55	k1=11,157412, k2=0,102390	0,998801	0,084568
Weibull	55	α=0,917821, β=102,561808	0,995264	0,168092
Eksponensiyel	55	H=0,009515	0,993925	0,190377
Peleg	65	k1=15,161649, k2=0,135298	0,999963	0,011170
Weibull	65	α=0,981323, β=102,824362	0,997620	0,090104
Eksponensiyel	65	H=0,009677	0,997558	0,091273
Peleg	75	k1=6,579594, k2=0,100988	0,998984	0,087353
Weibull	75	α=0,805702, β=77,048906	0,998128	0,118570
Eksponensiyel	75	H=0,012051	0,992212	0,241858

Rehidrasyon kapasitesinin modellenmesine dair elde edilen tüm çizelgeler birlikte değerlendirildiğinde; IR grubunda tüm sıcaklıklarda Peleg modelinin en yüksek uyumu vermesi rehidrasyon sürecinin ilk fazındaki hızlı su alımı ile sonraki fazdaki yavaşlama eğiliminin bu modelle daha tutarlı temsil edildiğini söylemek mümkündür. Aynı şekilde K örneğinde de tüm sıcaklıklarda Peleg modelinin yüksek uyum sergilemesi, elma dilimlerinde rehidrasyon davranışının ağırlıklı olarak hızlı başlangıç ve dengeye yaklaşım şeklinde bir kinetik izlediğini desteklemektedir.

Ön işlemler arasındaki farklılıklar değerlendirildiğinde, AA'nın K örneğine kıyasla daha kısa kuruma süresi sağlamasına rağmen K_2CO_3 kadar belirgin bir hızlandırıcı etki göstermemesi, rehidrasyon kapasitesi bakımından da K örneğine göre iyileşme olsa dahi yüksek etki yok şeklinde bir değerlendirmeye neden olmaktadır, K_2CO_3 ön işlemi ise kurutma sırasında kütle transfer direncini azaltarak kuruma süresini kısaltmakla birlikte, aynı zamanda ürün yüzeyinde ve doku bütünlüğünde meydana getirdiği değişimler nedeniyle rehidrasyon davranışını belirgin biçimde etkileyebilecek bir ön işlemdir. Bu tür uygulamalar ürünün gözenekliliğini ve su giriş yollarını artırarak rehidrasyon hızını yükseltebilirken; çok agresif koşullarda hücresel yapıdaki hasar da rehidrasyon kapasitesini sınırlayabilir. IR ön işleminde ise ısının ürüne hızlı aktarımı ve kurutma dinamiğinin farklılaşması, dokuda oluşan gözenekli yapı ve mikro-yapı değişimlerini etkileyerek rehidrasyon kinetiğini belirgin biçimde şekillendirebilir. Bu nedenle IR grubunda Peleg modelinin sistematik olarak en iyi uyumu vermesi, rehidrasyon davranışının kuvvetli biçimde iki fazlı (hızlı başlangıç–yavaş dengeye yaklaşım) karakter sergilediğinin güçlü bir göstergesidir. Genel olarak bu çalışmada rehidrasyon kinetiği sonuçları, ön işlemlerin yalnızca kuruma hızını değil, ürünün suyu geri alma kapasitesini ve rehidrasyon hızını da etkilediğini; bu etkinin ise kurutma sırasında oluşan mikro-yapısal değişimlerle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca Peleg, Weibull, Eksponensiyel modellerin birlikte kullanılması, hem basit (eksponensiyel) hem de esnek (Weibull) yaklaşımlar üzerinden rehidrasyon eğrilerinin şeklinin değerlendirilebilmesini sağlamış; ancak özellikle Peleg modelinin birçok koşulda en iyi uyumu vermesi, elma dilimlerinde rehidrasyon sürecinin başlangıç hızının ve dengeye yaklaşım koşullarının optimize edilmesinde yalnızca kuruma süresinin değil, rehidrasyon kinetiği parametrelerinin de dikkate alınması gerektiğini desteklemektedir.

3.2.4 Termodinamik Parametreler

Elma dilimlerinin farklı kurutma sıcaklıkları ve ön işlemlerde kurumasına ait termodinamik davranışları Tablo 3.12'de verilmiştir. Tüm koşullar için entalpi değişiminin (ΔH) pozitif, entropi değişiminin (ΔS) negatif ve Gibbs serbest enerji değişiminin (ΔG) pozitif olduğu belirlenmiştir. ΔH'nin pozitif çıkması, elma dilimlerinden nemin uzaklaştırılmasının endotermik karakterde olduğunu ve nem taşınımının gerçekleşebilmesi için dışarıdan ısı girdisine ihtiyaç duyulduğunu doğrulamaktadır. Benzer eğilimler pek çok tarımsal ürünün konvektif kurutma

çalışmalarında raporlanmıştır (Babalis ve Belessiotis, 2004; Motevali vd., 2010; Onwude vd., 2016). Ön işlemler kıyaslandığında, K_2CO_3 uygulaması K örneğine göre daha düşük ΔH sergileyerek elma örneği içinde suyun taşınması için aşılması gereken entalpik bariyeri K_2CO_3' ın azalttığını; dolayısıyla nemin ürün içerisindeki hareketinin daha düşük enerji gereksinimiyle gerçekleşebildiğini düşündürmektedir. Buna karşılık K örneklerinin ΔH değerlerinin daha yüksek bulunması ön işlem uygulanmadığında nemin elma örnekleri içindeki taşınımın daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir. IR grubunda ΔH'nin en düşük olması ise, enerjinin ürüne doğrudan aktarılması (radyant ısıtma) sayesinde ürün içi sıcaklık artışının daha hızlı gerçekleşmesi ve bu sayede suyun hareketinin kolaylaşmasıyla açıklanabilir. Literatürde IR uygulamalarının kurutma kinetiğini hızlandırması ve etkin taşınım parametrelerini iyileştirmesinden açıkça bahsedilmektedir (Salehi ve Satorabi, 2021).

ΔS değerlerinin tüm koşullarda negatif bulunması, nem taşınımının geçiş durumunda daha düzenli bir yapı gerektirdiğini ve sistemin düzensizliğinin azaldığını göstermektedir. Gıda kurutma termodinamiğinde bu durum sıklıkla difüzyon kontrollü taşınımın bir göstergesi olarak yorumlanır (Babalis ve Belessiotis, 2004; Onwude vd., 2016). Ayrıca sıcaklık arttıkça ΔS'nin mutlak değerinin bazı örneklerde azalması (K_2CO_3 ve IR), sıcaklığın yükselmesiyle birlikte nem taşınımın daha kolay gerçekleştiği ve suyun elma örneği içinde daha rahat hareket edebildiğini göstermektedir.

ΔG'nin tüm koşullarda pozitif olması ise kurutmanın kendiliğinden ilerleyen bir süreç olmadığını, prosesin sürdürülebilmesi için enerji girdisine ihtiyaç duyduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır (Mujumdar, 2014; Motevali vd., 2010). Sıcaklık artışıyla ΔG'nin genel olarak yükselmesi, kurutmanın enerjiye bağımlı karakterinin devam ettiğini, yani yüksek sıcaklıkta dahi kurutma prosesinin termodinamik olarak dış bir enerjiye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, termodinamik parametreler birlikte değerlendirildiğinde, IR ve SA uygulamalarının daha düşük ΔH ve daha düşük ΔG değerleriyle öne çıkarak nem taşınımını daha düşük enerji bariyeriyle gerçekleştirebildiği; K_2CO_3'nin ise kontrol örneğine göre belirgin bir iyileşme sağlayarak kütle transfer açısından avantaj sunduğu söylenebilir.Bu değerlendirme, kuruma süreleri üzerinden yapılan karşılaştırmayı daha da güçlendirmekte ve ön işlemlerin etkisini mekanizmaya

dayalı biçimde açıklamaya imkân tanımaktadır.

Tablo 3.12 Elma dilimlerine ait kurutma termodinamik parametreleri

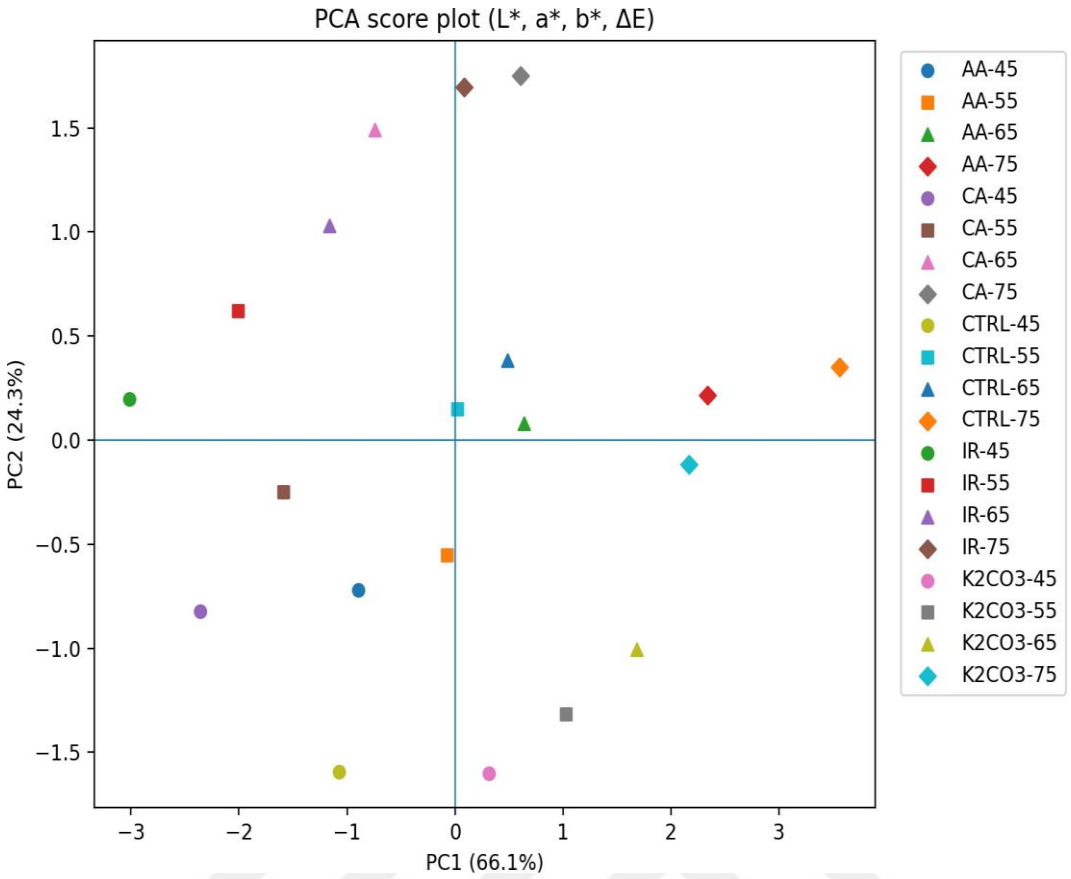
Kurutma Sıcaklığı	Ön İşlem Metodu	ΔH (kj/mol)	ΔS (j/molK)	ΔG (kj/mol)
45 °C	K	19,5823	-317,5181	120,6008
45 °C	SA	15,4445	-316,2872	116,0713
45 °C	AA	18,4159	-317,6509	119,4766
45 °C	K_2CO_3	17,0790	-312,3863	116,4647
45 °C	IR	10,2673	-312,0985	109,5615
55 °C	K	19,4992	-314,6957	122,7669
55 °C	SA	15,3613	-314,7554	118,6483
55 °C	AA	18,3327	-315,2503	121,7821
55 °C	K_2CO_3	16,9958	-312,1521	119,4282
55 °C	IR	10,1842	-311,1829	112,2989
65 °C	K	19,4160	-313,6003	125,4600
65 °C	SA	15,2782	-313,4149	121,2594
65 °C	AA	18,2496	-312,9894	124,0870
65 °C	K_2CO_3	16,9127	-309,1517	121,4524
65 °C	IR	10,1010	-310,6004	115,1306
75 °C	K	19,3329	-312,0490	127,8728
75 °C	SA	15,19508	-312,1248	123,8361
75 °C	AA	18,16650	-312,9424	127,1174
75 °C	K_2CO_3	16,8296	-308,2637	124,1516
75 °C	IR	10,0179	-309,2285	117,6754

3.2.5 Renk Analiz Sonuçları ve Renk Değerlerine Ait Temel Bileşen Analizi

Tablo 3.13'de renk parametreleri birlikte değerlendirilmiş ve kurutma sıcaklığındaki artışın tüm örneklerde parlaklık azalması (L*), kırmızılık artışı (a*) ve buna paralel olarak toplam renk farkında (ΔE) yükselme ile sonuçlandığı açıkça belirtilmiştir. K örneklerinde ΔE'nin 45 °C'de 8.99'dan 75 °C'de 13.94'e yükselmesi, sıcaklığa bağlı enzimatik olmayan esmerleşme ve pigment degradasyonunun hızlandığını göstermektedir. Buna karşın SA ön işlemi, tüm sıcaklık aralığında en düşük ΔE değerlerini üretmiş (7.30–9.18) ve aynı zamanda daha yüksek L* değerlerini korumuştur. Bu durum asidik ortamın polifenol oksidaz aktivitesini baskılayarak enzimatik esmerleşmeyi sınırladığı yönündeki literatür bulgularıyla uyumludur (Moon vd., 2020; McEvily vd., 1992). Benzer şekilde IR ön işlemi de düşük ΔE aralığı (6.05–8.53) ile dikkat çekmiş, özellikle 45–55 °C'de parlaklığın daha iyi korunmasıyla öne çıkmıştır. AA uygulamalarında ΔE'nin sıcaklıkla birlikte 8.85'ten 12.19'a yükselmesi, askorbik asidin başlangıçta indirgen özellik göstermesine rağmen ileri sıcaklıklarda oksidatif parçalanma ve eşzamanlı Maillard reaksiyonları nedeniyle koruyucu etkisinin azalabileceğini düşündürmektedir. K_2CO_3 gibi alkali ön işlemlerde ise ΔE ve a* değerlerindeki belirgin artış (10.75–12.06), alkali ortamın hücre duvarı geçirgenliğini artırarak pigment dönüşümünü hızlandırması ve esmerleşme reaksiyonlarını tetiklemesiyle açıklanabilir. Genel olarak veriler, ΔE ile a* arasında pozitif, ΔE ile L* arasında ise negatif bir ilişki olduğunu; yani kırmızılık artışı ve parlaklık kaybının renk değişimini birlikte sürüklediğini göstermektedir. Bu eğilimler, meyve ve sebze kurutma literatüründe sıcaklık artışıyla L*'ın azaldığı, a* ve ΔE'nin arttığı ve kimyasal ön işlemlerin renk korunumu sağladığı yönündeki çok sayıdaki çalışma ile paralellik göstermektedir (Maskan, 2001; Dadalı vd., 2007; Pathare vd., 2013; Moon vd., 2020). Sonuç olarak, mevcut bulgular sıcaklığın renk değişiminin büyüklüğünü, ön işlem türünün ise renk değişiminin yönünü ve şiddetini belirlediğini ortaya koymakta; özellikle SA ve IR uygulamalarının renk stabilitesi açısından daha avantajlı, K_2CO_3 uygulamasının ise daha agresif renk değişimine eğilimli olduğunu göstermektedir.

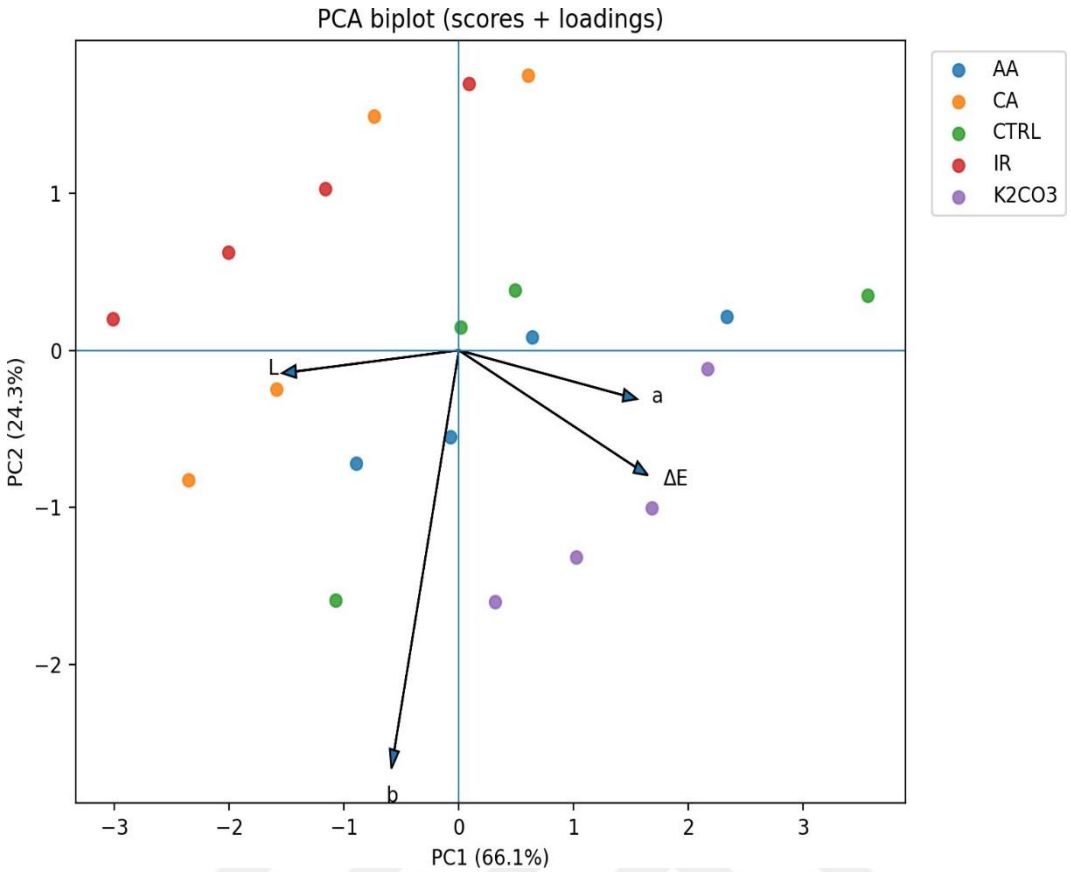
Tablo 3.13 Elma dilimlerine ait renk parametreleri

Ön İşlem Metodu	Kurutma Sıcaklığı	L*	a*	b*	ΔE
K	45 °C	74,04	2,14	23,90	8,9920
	55 °C	73,14	3,60	21,07	9,0998
	65 °C	72,80	4,17	20,56	9,5870
	75 °C	68,36	6,40	19,59	13,942
SA	45 °C	78,27	2,12	22,94	7,3020
	55 °C	77,65	3,30	21,88	7,6747
	65 °C	76,15	3,83	19,20	7,5687
	75 °C	74,00	4,78	18,43	9,1775
AA	45 °C	77,40	4,41	22,25	8,8472
	55 °C	76,00	5,17	21,81	9,5631
	65 °C	75,40	6,05	20,65	10,1022
	75 °C	73,22	7,60	19,90	12,1890
K_2CO_3	45 °C	76,20	5,90	23,1	10,7478
	55 °C	74,98	6,61	22,49	11,3589
	65 °C	73,21	6,73	21,94	11,8933
	75 °C	72,60	7,04	20,52	12,0618
IR	45 °C	79,39	1,39	21,67	6,0542
	55 °C	78,37	2,81	20,76	6,7309
	65 °C	76,95	3,61	19,97	7,3312
	75 °C	74,95	4,49	18,66	8,5267



Şekil 3.10 Elma dilimlerin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait renk parametrelerinin (L*, a*, b* ve ΔE) temel bileşen analizi (PCA) skor grafiği

PCA skor grafiği (Şekil 3,8), elma dilimlerinin renk parametrelerine (L*, a*, b* ve ΔE) bağlı olarak ön işlem türü ve kurutma sıcaklığına göre belirgin şekilde ayrıştığını göstermektedir, Toplam varyansın %66,1'ini açıklayan PC1 ekseni, örnekler arasındaki ana farklılaşmayı temsil etmekte olup, özellikle kurutma sıcaklığının artışıyla birlikte örneklerin bu eksen boyunca düzenli bir dağılım sergilediği görülmektedir. Bu durum, sıcaklığın renk değişimi üzerinde baskın bir etken olduğunu ve L*, a* ve ΔE parametrelerinin birlikte hareket ederek örnekleri ayırdığını düşündürmektedir. PC2 ekseni (%24,3) ise ön işlem türlerine bağlı ikincil farklılıkları yansıtarak, aynı sıcaklıkta farklı ön işlemlerin renk davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. PCA biplot grafiği, örneklerin dağılımı ile renk parametrelerinin (L*, a*, b* ve ΔE) katkı yönlerini aynı düzlemde göstererek, değişken–örnek ilişkilerinin daha açık biçimde yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.11 Elma dilimlerin farklı kurutma sıcaklıkları ve farklı ön işlemlere ait renk parametrelerinin (L*, a*, b* ve ΔE) temel bileşen analizi (PCA) biplot grafiği

Yük vektörlerinin yönleri incelendiğinde, a* ve ΔE parametrelerinin PC1 ekseni boyunca pozitif yönde güçlü yükler sergilediği ve L* değerinin PC1'in negatif yönüyle ilişkili olduğu görülmektedir. Bu durum, PC1 ekseninin esas olarak renk koyulaşması ve toplam renk değişimi (ΔE) ile ilişkili olduğunu; L*'ın ise bu değişime ters yönde davrandığını göstermektedir. b* parametresinin PC2 ekseni boyunca baskın bir yük sergilemesi ise sarılık–mavilik ekseninin ön işlem türlerine bağlı ikincil bir ayrım düşündürmektedir. Örneklerin biplot üzerindeki konumları değerlendirildiğinde, IR ve K_2CO_3 uygulamalarının a* ve ΔE yük vektörlerine daha yakın konumlanması, bu ön işlemlerin daha belirgin renk değişimleriyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık AA ve SA örneklerinin L* vektörüne daha yakın veya merkez çevresinde yer alması, bu uygulamaların parlaklık kaybını sınırladığını ve renk stabilitesini daha iyi koruduğunu göstermektedir. Kontrol örneklerinin ise farklı sıcaklıklarda geniş bir dağılım sergilemesi, herhangi bir koruyucu mekanizma olmaksızın sıcaklık artışına daha duyarlı bir renk değişimi yaşandığını düşündürmektedir. Genel olarak biplot analizi, renk parametrelerinin

birlikte değerlendirilmesiyle ön işlemlerin renk davranışı üzerindeki etkilerinin mekanistik açıdan yorumlanmasını mümkün kılmaktadır.

4
SONUÇ

Bu tez çalışmasında, farklı kimyasal (SA, AA, K_2CO_3) ve termal (kızılötesi) ön işlemler uygulanmış elma dilimlerinin kurutma davranışı, rehidrasyon kinetiği, renk özellikleri ve termodinamik parametreleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kurutma işlemleri farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiş; elde edilen deneysel veriler matematiksel modeller, temel bileşen analizi (PCA) ve termodinamik yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, ön işlem türlerinin ve kurutma sıcaklığının ürün kalitesi ve proses performansı üzerindeki etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktır.

Kurutma kinetiği sonuçları, tüm örneklerde nem uzaklaştırma sürecinin ağırlıklı olarak azalan hız periyodu ile karakterize edildiğini ve bu süreçte difüzyon kontrollü mekanizmanın baskın olduğunu göstermiştir. İnce tabaka kurutma modelleri arasında Midilli–Küçük modelinin tüm ön işlem ve sıcaklık koşullarında yüksek uyum sergilemesi, modelin deneysel kurutma eğrilerini temsil etme kapasitesinin diğer modellere kıyasla daha güçlü olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, Midilli–Küçük modelinin hem üstel hem de doğrusal terimler içeren yapısı sayesinde, ön işlemlerle birlikte değişen yüzey ve iç yapı özelliklerini daha iyi yansıtabilmesiyle açıklanabilir. Elde edilen sonuçlar, elma ve benzeri tarımsal ürünlerde rapor edilen literatür bulgularıyla da uyumlu olup, söz konusu modelin kurutma kinetiği analizlerinde güvenilir bir araç olduğunu desteklemektedir.

Ön işlem türleri karşılaştırıldığında, K_2CO_3 uygulamasının kuruma süresini belirgin biçimde kısalttığı ve kuruma hızını artırdığı görülmüştür. Bu etki, K_2CO_3 ön işleminin ürün yüzeyindeki mum tabakasını zayıflatması, mikro çatlak oluşumunu teşvik etmesi ve böylece kütle transfer direncini azaltmasıyla ilişkilendirilebilir. AA ön işlemi, K örneğine kıyasla daha kısa kuruma süreleri sağlamakla birlikte, K_2CO_3 kadar belirgin bir hızlandırıcı etki göstermemiştir. CA uygulamasının ise kuruma süresi açısından K örneklerine yakın davranış

sergilemesi, bu ön işlemin esas olarak renk ve kaliteyi korumaya yönelik bir ajan olarak işlev gördüğünü ve kütle transferini sınırlı ölçüde etkilediğini göstermektedir. IR ön işlemde ise enerjinin ürüne doğrudan radyasyon yoluyla aktarılması, nem kaybını hızlandırmış ve kurutma dinamiğini kimyasal ön işlemlerden farklı bir düzleme taşımıştır.

Rehidrasyon kinetiği sonuçları, kurutma sırasında ürün yapısında meydana gelen değişimlerin suyu geri alma kapasitesi ve hızı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Peleg, Weibull ve Eksponensiyel modellerin tümü rehidrasyon davranışını başarıyla temsil etmekle birlikte, Peleg modelinin özellikle rehidrasyonun başlangıç aşamasındaki hızlı su alımını ve ilerleyen aşamalardaki yavaşlama eğilimini daha iyi yansıttığı belirlenmiştir. Ön işlemler birlikte değerlendirildiğinde, K_2CO_3 ve IR uygulamalarının rehidrasyon kinetiğini belirgin biçimde etkilediği; AA ve CA uygulamalarının ise daha sınırlı ancak kontrollü bir rehidrasyon davranışı sağladığı görülmüştür. Bu bulgular, kurutma kinetiği ile rehidrasyon davranışı arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya koymakta ve ön işlemlerin yalnızca kuruma süresini değil, nihai ürün kalitesini de şekillendirdiğini göstermektedir.

Renk analizleri ve PCA sonuçları, ön işlemler ve kurutma sıcaklığının elma dilimlerinin renk özellikleri üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. PCA skor ve biplot grafikleri, renk parametrelerinin birlikte değerlendirilmesiyle örneklerin ön işlem türü ve sıcaklığa bağlı olarak belirgin şekilde ayrıştığını göstermiştir. Özellikle PC1 ekseninin renk koyulaşması ve toplam renk değişimi (ΔE) ile ilişkili olması, sıcaklık artışının renk bozulması üzerindeki baskın rolünü ortaya koymuştur. AA ve CA uygulamalarının L* değerlerini daha iyi koruması, bu ön işlemlerin enzimatik esmerleşmeyi baskılayıcı etkileriyle uyumlu bulunmuştur. Buna karşılık IR ve K_2CO_3 uygulamalarında daha belirgin renk değişimleri gözlenmiş; bu durum, kurutma hızının artması ve ürün yapısında meydana gelen değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

Termodinamik analiz sonuçları, kurutma sürecinin enerji gereksinimini ve moleküler düzeydeki düzen değişimini açıklamada önemli bilgiler sunmuştur. Tüm ön işlem ve sıcaklık koşullarında entalpi değişiminin (ΔH) pozitif bulunması, nem uzaklaştırma sürecinin endotermik karakter taşıdığını doğrulamıştır. Entropi değişiminin (ΔS) negatif olması, nem taşınımının daha düzenli bir geçiş durumu

gerektirdiğini ve sistemin düzensizliğinin azaldığını göstermiştir. Gibbs serbest enerji değişiminin (ΔG) pozitif bulunması ise kurutmanın kendiliğinden gerçekleşmeyen, dışarıdan enerji girdisine ihtiyaç duyan bir proses olduğunu ortaya koymuştur. Ön işlemler karşılaştırıldığında, CA ve K_2CO_3 uygulamalarının daha düşük ΔH ve ΔG değerleri sergilemesi, bu ön işlemlerin nem taşınımı için gerekli enerji bariyerini azalttığını göstermekte ve kurutma kinetiği sonuçlarıyla tutarlılık arz etmektedir. IR uygulaması ise farklı ısı transfer mekanizması nedeniyle termodinamik açıdan özgün bir davranış sergilemiş, ancak temel eğilimler bakımından diğer gruplarla benzer bir çerçevede değerlendirilmiştir.

Genel olarak bu çalışma, elma dilimlerinin kurutulmasında ön işlem türü ve kurutma sıcaklığının hem proses performansı hem de ürün kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur. Kimyasal ve termal ön işlemler yalnızca kuruma süresini etkilemekle kalmamış, aynı zamanda rehidrasyon davranışı, renk özellikleri ve termodinamik parametreler üzerinde de anlamlı farklılıklar oluşturmuştur. Elde edilen bulgular, kurutma proseslerinin optimizasyonunda tek bir parametreye odaklanmak yerine, kinetik, termodinamik ve kalite kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bütüncül yaklaşımın hem endüstriyel uygulamalar hem de ileri akademik çalışmalar için yol gösterici nitelikte olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada farklı kimyasal ve kızılötesi ön işlemlerin elma dilimlerinin kurutma kinetiği, rehidrasyon davranışı, renk özellikleri ve termodinamik parametreleri üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bununla birlikte, kurutma proseslerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve elde edilen bulguların endüstriyel uygulamalara daha etkin şekilde aktarılabilmesi için gelecekte yapılacak çalışmalarda aşağıdaki konuların ele alınmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir:

- Farklı kızılötesi (IR) güç seviyeleri ve uygulama sürelerinin kurutma kinetiği, enerji verimliliği ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi,
- Farklı dilim kalınlıklarının kurutma davranışı, nem difüzyonu ve rehidrasyon kapasitesi üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi,

- Kurutma prosesine ait özgül enerji tüketimi (SEC) ve enerji verimliliği parametrelerinin belirlenerek farklı ön işlem ve kurutma koşullarının enerji performanslarının analiz edilmesi,
- Kurutma sırasında meydana gelen yapısal değişimlerin daha ayrıntılı ortaya konulabilmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi mikroyapı analiz yöntemlerinin kullanılması,
- Farklı meyve ve sebzelerde benzer ön işlem ve kurutma koşullarının uygulanarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve kurutma proseslerinin genellenebilirliğinin araştırılması.
- Bu tür çalışmaların, kurutma proseslerinin optimizasyonuna katkı sağlayacağı ve gıda kurutma teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik yeni araştırma alanları oluşturacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Adekanye, T., Alhassan, E., Amodu, M., Olanrewaju, T., & Iyanda, M. (2025). Kinetics of heat and mass transfer in moringa leaves drying in a cabinet dryer. Results in Engineering, 26, 104763.

Adak, N., Heybeli, N., & Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. Food Chemistry, 219, 109–116.

Adus, S., & Widom, B. (2024). Arrhenius behavior and temperature dependence in diffusion-controlled processes. Journal of Physical Chemistry A, 128(3), 512–521.

Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Arabhosseini, A. (2009). Modeling of thin-layer drying of potato slices in a continuous band dryer. Energy Conversion and Management, 50(5), 1348–1355.

Agrawal, Y. C., & Singh, R. P. (1977). Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. Transactions of the ASAE.

Akpınar Borazan, A., & Yokuş, B. (2014). Influence of different parameters on the drying kinetics while making apple snack with microwave. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2014).

Aktaş, M., Khanlari, A., Amini, A., & Şevik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. Energy Conversion and Management, 132, 327–338.

Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. Foods, 8(6), 216.

Alaei, B., Dibagar, N., Chayjan, R. A., Kaveh, M., & Taghinezhad, E. (2018). The effect of short and medium infrared radiation on drying and quality characteristics of quince slices under vacuum conditions. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 10(4), 371–381.

Aradwad, P. P., Thirumani Venkatesh, A. K., & Mani, I. (2023). Infrared drying of apple (Malus domestica) slices: Effect on drying and color kinetics, texture, rehydration, and microstructure. Journal of Food Process Engineering, 46(2), e14218.

Aravindakshan, S., Nguyen, T. H. A., Kyomugasho, C., Buvé, C., Dewettinck, K., Van Loey, A., & Hendrickx, M. E. (2021). The impact of drying and rehydration on the structural properties and quality attributes of pre-cooked dried beans. Foods, 10(7), 1665.

Arrhenius, S. (1889). Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 4(1), 226–248.

ASHRAE. (2003). ASHRAE applications handbook: Industrial drying systems (Chapter 28).

Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. Solar Energy, 59(4–6), 121–126.

Babalis, S. J., & Belessiotis, V. G. (2004). Influence of drying conditions on drying kinetics and quality of figs. Journal of Food Engineering, 65(3), 449–458.

Baik, O. D., & Mittal, G. S. (2003). Kinetics of tofu color changes during deep-fat frying. LWT – Food Science and Technology, 36(1), 43–48.

Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). Dehydration of foods. Chapman & Hall.

Bilbao-Sáinz, C., Andrés, A., & Fito, P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying and rehydration conditions. Journal of Food Engineering, 68(1), 83–90.

Biswas, R., Hossain, M. A., & Zzaman, W. (2022). Thin-layer modeling of drying kinetics, rehydration kinetics and color changes of osmotic pre-treated pineapple slices during drying: Development of a mechanistic model for mass transfer. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 80, 103094.

Boateng, I. D., Yang, X. M., & Li, Y. Y. (2021). Optimization of infrared drying parameters for Ginkgo biloba seed and evaluation of product quality and bioactivity. Industrial Crops and Products, 160, 113108.

Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). Drying and storage of grains and oilseeds. Van Nostrand Reinhold.

Cagnin, C., Lima, M. D., Silva, R. D., Silva, M. D., Plácido, G. R., Freitas, B. D., & Oliveira, D. D. (2017). Garlic: Kinetic drying and thermodynamic properties. Bioscience Journal, 33(4), 905–913.

Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., & Özkan, M. (2003). Meyve ve sebze işleme teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları.

Chow, Y. N., Louarme, L., Bonazzi, C., Nicolas, J., & Billaud, C. (2011). Apple polyphenoloxidase inactivation during heating in the presence of ascorbic acid and chlorogenic acid. Food Chemistry, 129(3), 761–767.

Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. LWT – Food Science and Technology, 41(10), 2023–2028.

Cunningham, S. E., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2008). Modelling water absorption of pasta during soaking. Journal of Food Engineering, 84(3), 389–395.

Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion (2nd ed.). Oxford University Press.

Dadalı, G., Demirhan, E., & Özbek, B. (2007). Color change kinetics of spinach during microwave drying. Drying Technology, 25(10), 1713–1723.

Darvishi, H., Najafi, G., Hosainpour, A., Khodaei, J., & Aazdbakht, M. (2013). Far-infrared drying characteristics of mushroom slices. Chemical Product and Process Modeling, 8(2), 107–117.

Delfiya, D. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (2022). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. Journal of Food Process Engineering, 45(6), e13810.

Demiray, E., & Tülek, Y. (2016). Güneşte kurutulmuş bamyaların rehidrasyon kinetiği. Akademik Gıda, 14(4), 368–374.

Demircan, B., McClements, D. J., & Velioglu, Y. S. (2025). Utilization of potassium carbonate–olive oil solutions for wax removal from fruits: Investigation of mode of action using a model gelatin-based film system. Food Chemistry, 483, 144362.

Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin-layer carrots. Journal of Food Engineering, 61, 359–364.

Doymaz, İ. (2006). Thin-layer drying behaviour of mint leaves. Journal of Food Engineering, 74(3), 370–375.

Doymaz, İ. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. International Journal of Food Science and Technology, 43(3), 506–514.

Doymaz, İ. (2010). Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. Food and Bioproducts Processing, 88(2–3), 124–132.

Doymaz, İ. (2011). Drying of green beans and effects of temperature on drying kinetics. African Journal of Biotechnology, 10(52), 10628–10633.

Doymaz, İ. (2012a). Sun drying of seedless and seeded grapes. Journal of Food Science and Technology, 49(2), 214–220.

Doymaz, İ. (2012b). Infrared drying of sweet potato (Ipomoea batatas L.) slices. Journal of Food Science and Technology, 49(6), 760–766.

El-Mesery, H. S., Ashiagbor, K., Hu, Z., & Alshaer, W. G. (2023). A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes. Case Studies in Thermal Engineering, 52, 103676.

El-Mesery, H. S., & Mwithiga, G. (2015). Performance of a convective, infrared and combined infrared–convective heated conveyor-belt dryer. Journal of Food Science and Technology, 52(5), 2721–2730.

Erbay, Z., & Icier, F. (2010). Thin layer drying behaviours of olive leaves (Olea europaea L.). Journal of Food Process Engineering, 33, 287–308.

Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2017). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57(4), 701–717.

Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin-layer drying model. Journal of Food Engineering, 63(3), 349–359.

Eskin, N. A. M. (1990). Browning reactions in foods. In Biochemistry of foods (2nd ed., pp. 240–295). Academic Press.

Evranuz, Ö. (1998). Gıda mühendisliği tasarımı ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Mathematical modelling of thin-layer drying kinetics of plum. Journal of Food Engineering, 79(1), 176–180.

Eyring, H. (1935). The activated complex in chemical reactions. The Journal of Chemical Physics, 3(2), 107–115.

Gomes, F. P., Resende, O., Sousa, E. P. D., Célia, J. A., & de Oliveira, K. B. (2022). Application of mathematical models and thermodynamic properties in the drying of Jambu leaves. Agriculture, 12(8), 1252.

Gök, B., & Kıpçak, E. (2024). The effect of chemical pretreatment on the drying behavior of blueberries. Bulgarian Chemical Communications.

Günaydın, S., Çetin, N., & Sağlam, C. (2023). Kurutmada termal ve termal olmayan ön işlem uygulamaları. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 37(2), 499–518.

Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H., & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal of Food Engineering, 65(4), 557–563.

Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research, 6, 169–174.

İsmail, O. (2005). Investigation of the effect of potassium carbonate solutions on drying of Sultana grapes. Sigma, 2005(1), 108–114.

Keskin, N., Kaya, O., Ateş, F., Turan, M., & Gutiérrez-Gamboa, G. (2022). Drying grapes after the application of different dipping solutions: Effects on hormones, minerals, vitamins, and antioxidant enzymes in Gök Üzüm (Vitis vinifera L.) raisins. Plants, 11(4), 529.

Kidane, H., Farkas, I., & Buzás, J. (2025). Characterizing agricultural product drying in solar systems using thin-layer drying models: A comprehensive review. Discover Food, 5(1), 84.

Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: An overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 7(1), 2–13.

Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. Drying Technology, 15(10), 2441–2458.

Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (2001). Structural properties of dehydrated products during rehydration. International Journal of Food Science and Technology, 36(5), 529–538.

Krokida, M. K., & Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. Journal of Food Engineering, 57(1), 1–7.

Krokida, M. K., & Philippopoulos, C. (2005). Rehydration of dehydrated foods. Drying Technology, 23(4), 799–830.

Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., & Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. Drying Technology, 32(7), 757–773.

Lewicki, P. P. (1998a). Some remarks on rehydration of dried foods. Journal of Food Engineering, 36(1), 81–87.

Lewicki, P. P. (1998b). Effect of pre-drying treatment on rehydration of dried foods. Journal of Food Engineering, 36(1), 81–87.

Lewicki, P. P. (1998c). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. International Journal of Food Properties, 1(1), 1–22.

Lewicki, P. P., & Pawlak, G. (2003). Effect of drying on microstructure of plant tissue. Drying Technology, 21(4), 657–683.

Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. Industrial & Engineering Chemistry, 13(5), 427–432.

Lozano, J. R., Rotstein, E., & Urbicain, M. J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Food Science, 48, 1497–1502.

Lutovska, M., Mitrevski, V., Pavkov, I., Mijakovski, V., & Radojčin, M. (2016). Mathematical modelling of thin layer drying of pear. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 22(2), 191–199.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering, 29(1), 75–97.

Marabi, A., & Saguy, I. S. (2004). Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. Journal of the Science of Food and Agriculture, 84(10), 1105–1110.

Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M., & Saguy, I. S. (2003). Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. European Food Research and Technology, 217, 311–318.

Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering, 48(2), 169–175.

Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. Journal of Food Engineering, 61(3), 373–386.

McEvily, A. J., Iyengar, R., & Otwell, W. S. (1992). Inhibition of enzymatic browning in foods and beverages. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 32(3), 253–273.

Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. Drying Technology, 20(7), 1503–1513.

Moon, K. M., Kwon, E. B., Lee, B., & Kim, C. Y. (2020). Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. Molecules, 25(12), 2754.

Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Kazemi, M. (2010). Drying of pomegranate arils: Drying kinetics and thermodynamic parameters. Journal of Food Engineering, 98(3), 300–308.

Mujumdar, A. S. (2006). Handbook of industrial drying (3rd ed.). Taylor & Francis.

Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). Handbook of industrial drying (4th ed.). CRC Press.

Nadi, F., & Tzempelikos, D. (2018). Vacuum drying of apples (Golden Delicious): Drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. Heat and Mass Transfer, 54(7), 1853–1866.

Ngamwonglumlert, L., & Devahastin, S. (2018). Microstructure and its relationship with quality and storage stability of dried foods. In Food microstructure and its relationship with quality and stability (pp. 139–159). Woodhead Publishing.

Nieto, A., Salvatori, D., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. (1998). Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. Journal of Food Engineering, 36(1), 63–79.

Nurkhoeriyati, T., Supriyadi, S., & Pranoto, Y. (2021). The effect of pre-drying treatment and drying conditions on quality and energy demand in hot-air dried celeriac slices: An optimization approach. Foods, 10(9), 2101.

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374(2065), 20150202.

Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (2007). Food dehydration. In D. R. Heldman & D. B. Lund (Eds.), Handbook of food engineering (2nd ed.). CRC Press.

Oms-Oliu, G., Aguiló-Aguayo, I., & Martín-Belloso, O. (2006). Inhibition of browning on fresh-cut pear wedges by natural compounds. Journal of Food Science, 71(3), S216–S224.

Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. Journal of Food Engineering, 241, 75–87.

Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., Chen, G., & Kumar, C. (2018a). Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato. Journal of Food Engineering, 228, 12–24.

Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2018b). Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (Ipomoea batatas L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. Journal of Food Process Engineering, 41(4), e12686.

Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15, 599–618.

Özkoç, S. Ö. (2010). Kızılötesi ve kızılötesi-kombinasyon ısıtma teknolojilerinin gıda işleme uygulamalarında kullanımı. GIDA, 35(3), 211–218.

Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers (Master's thesis). Purdue University.

Pahavanzadeh, H., Basiri, A., & Zarrabi, M. (2001). Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying. Drying Technology, 19(1), 217–226.

Parthasarathi, S., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Modeling of shrinkage, rehydration, and textural changes for food structural analysis: A review. Journal of Food Process Engineering, 37(2), 199–210.

Planinić, M., Velić, D., Tomas, S., Bilić, M., & Bucić, A. (2005). Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model. European Food Research and Technology, 221(3), 446–451.

Mousavi, S. M., & Javan, A. J. (2009). Kinetic and thermodynamic analysis of drying processes in food materials. Journal of Food Processing and Preservation, 33(4), 512–524.

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods. Food and Bioprocess Technology, 6, 36–60.

Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. Journal of Food Science, 53(4), 1216–1217.

Potter, N., & Hotchkiss, J. H. (1998). Food science (5th ed.). Chapman & Hall.

Rahman, M. S. (1999). Handbook of food preservation. Marcel Dekker.

Rahman, M. S. (2005). Dried food properties: Challenges ahead. Drying Technology, 23(4), 695–715.

Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., & Niranjan, K. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: Methods to enhance mass transfer. Trends in Food Science & Technology, 13(2), 48–59.

Rastogi, N. K. (2012). Recent trends and developments in infrared heating in food processing. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 52(9), 737–760.

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. Journal of Food Engineering, 49(4), 311–319.

Rocculi, P., Galindo, F. G., Mendoza, F., Wadsö, L., Romani, S., Dalla Rosa, M., & Sjöholm, I. (2007). Effects of anti-browning substances on metabolic activity and sugar composition of fresh-cut potatoes. Postharvest Biology and Technology, 43(1), 151–157.

Sakai, N., & Hanzawa, T. (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. Trends in Food Science & Technology, 5(11), 357–362.

Salehi, F. (2020). Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. International Journal of Fruit Science, 20(3), 586–602.

Salehi, F., & Satorabi, M. (2021). Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. International Journal of Fruit Science, 21(1), 519–532.

Sapers, G. M., & Miller, R. L. (1998). Browning inhibition in fresh-cut pears. Journal of Food Science, 63(2), 342–346.

Shafiq, F. A., Krishna, H. C., Mushrif, S. K., Ramegowda, G. K., Bhuvaneswari, S., Shankarappa, T. H., & Ahmad, S. N. (2022). Effects of pretreatments and drying methods on drying kinetics and physical properties of raisins. In Biological Forum – An International Journal (Vol. 14, pp. 155–160).

Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page and Weibull models to describe drying kinetics of kiwi fruit. Journal of Food Engineering, 66(3), 323–328.

Simşek, M., & Süfer, Ö. (2021). Influence of different pretreatments on hot air and microwave–hot air combined drying of white sweet cherry. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 9(6), 1172–1179.

Soydan, K. (2019). Elma dilimlerinin kurutulmasında farklı ön işlemlerin etkisinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi.

Shrestha, L., Kulig, B., Moscetti, R., Massantini, R., Pawelzik, E., Hensel, O., & Sturm, B. (2020). Optimisation of physical and chemical treatments to control browning and enzymatic activity on fresh-cut apple slices. Foods, 9(1), 76.

Sun, X., Jin, X., Fu, N., & Chen, X. (2020). Effects of different pretreatment methods on drying characteristics and quality of potatoes. Food Science & Nutrition, 8, 5767–5775.

Taşova, M., & Güzel, M. (2020). Kurutma sıcaklıklarının mantarın (Agaricus bisporus L.) rehidrasyon, model, kuruma performansı ve yüzey alanı değerlerine etkisi. Turkish Journal of Agricultural Engineering Research, 1(1), 74–84.

Tepe, T. K., & Tepe, B. (2020). The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent microwave and hot-air dried apple slices. Heat and Mass Transfer, 56(11), 3047–3057.

Thuwapanichayanan, R., Phowong, C., Jaisut, D., & Štencl, J. (2014). Effects of pretreatments and drying temperatures on drying characteristics, antioxidant properties and color of ginger slices. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 62(5), 1125–1134.

Toğrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. Journal of Food Engineering, 71(3), 311–323.

Turan, O. Y., & Firatligil, F. E. (2019). Modelling and characteristics of thin-layer convective air-drying of thyme (Thymus vulgaris) leaves. Czech Journal of Food Sciences, 37(2).

Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., & Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physicochemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (Capsicum annuum L.). Food Chemistry, 117(4), 647–653.

Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Diaz, L. P., Lopez, L., Rodriguez, K., & Di Scala, K. (2012a). Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of Chilean papaya (Carica pubescens). Food Chemistry, 132(1), 166–172.

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., & Di Scala, K. (2012b). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (Granny Smith) slices. Food Chemistry, 132(1), 51–59.

Viganó, J., Azuara, E., Telis, V. R., Beristain, C. I., Jiménez, M., & Telis-Romero, J. (2012). Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. Thermochimica Acta, 528, 63–71.

Vyazovkin, S. (2016). Isoconversional kinetics of thermally stimulated processes. Springer.

Wang, Y., Zhao, H., Deng, H., Song, X., Zhang, W., Wu, S., & Wang, J. (2019). Influence of pretreatments on microwave vacuum drying kinetics, physicochemical properties and sensory quality of apple slices. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 69(3).

Westerman, P. W., White, G. M., & Ross, I. J. (1973). Relative humidity effect on high-temperature drying of shelled corn. Transactions of the ASAE, 16(6), 1136–1139.

Witrowa-Rajchert, D., & Rząca, M. (2009). Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. Drying Technology, 27(7–8), 903–909.

Yan, S., Luo, Y., Zhou, B., & Ingram, D. T. (2017). Dual effectiveness of ascorbic acid and ethanol combined treatment to inhibit browning and inactivate pathogens on fresh-cut apples. LWT, 80, 311–320.

Yağcıoğlu, A., Değirmencioğlu, A., & Çağatay, F. (1999). Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions. In Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy (pp. 565–569).

Yoruk, R., & Marshall, M. R. (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: A review. Journal of Food Biochemistry, 27(5), 361–422.

Yıldız, Z. (2022). Effect of scalding pretreatment on drying of banana rings in a solar dryer. Journal of Food Processing and Preservation, 46(5), e16520.

Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying Technology, 14(10), 2225–2253.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Kılıç, U., Tekin-Cakmak, Z. H. ve Erim-Kose, Y., Yeşil Elmanın Kurutma Koşullarının Değerlendirilmesi, 7. Uluslararası 5 Ocak Uygulamalı Bilimler Kongresi, 3-5 Ocak 2026, 101-102, Adana.