T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRLÜ EGZOTİK MEYVELERİN GÜNCEL YÖNTEMLER İLE KURUTULMASI VE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Kübra KURNAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK

Ağustos, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRLÜ EGZOTİK MEYVELERİN GÜNCEL YÖNTEMLER İLE KURUTULMASI VE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Kübra KURNAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 01.08.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Tülin Banu İYİM, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa _____

Prof. Dr. Emek DERUN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof.Dr. Müge SARI YILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç.Dr.Aslı CAN KARAÇA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan ‘Türlü Egzotik Meyvelerin Güncel Yöntemler ile Kurutulması ve Matematiksel Modellemesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kübra KURNAZ

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FYL-2024-6600” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin destekleri, teşvik edici yaklaşımı ve yol gösterici tavsiyeleri sayesinde bu çalışmayı başarıyla tamamlayabildim.

Ayrıca, çalışma sürecimde bana destek olan Arş. Gör. Zehra Özden ÖZYALÇIN GENÇ'e akademik bilgileri ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim. Katkısı, araştırmamın her aşamasında bana ışık tutmuştur.

Bu süreçte manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme, arkadaşlarıma ve çalıştığım kuruma sonsuz teşekkür ederim. Onların sabrı, anlayışı ve teşviki olmasaydı bu süreci başarıyla tamamlamam mümkün olmazdı.

Son olarak, Türlü Egzotik Meyvelerin Güncel Yöntemler ile Kurutulması ve Matematiksel Modellemesi konulu yüksek lisans tezimi hazırlarken doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan herkese gönülden teşekkür ederim.

Kübra KURNAZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 8
2 EGZOTİK MEYVELER 10
2.1 Ejder Meyvesi *(Hylocereus undatus)* 10
2.2 Hint İnciri *(Opuntia ficus-indica)* 13
3 KURUTMA TEKNOLOJİSİ 16
3.1 Kurutma Yöntemleri 16
3.1.1 Dondurarak Kurutma 21
3.1.1.1 Vakumlu Dondurarak Kurutma 23
3.1.1.2 Atmosferik Dondurarak Kurutma 23
3.1.1.3 Sprey Dondurarak Kurutma 24
3.1.1.4 Dondurarak Kurutma Modifikasyonları 24
3.1.2 Infrared Kurutma 26
3.1.2.1 Radyötör Türleri 24
3.1.2.2 Kızılötesi Kurutmanın Diğer Kurutma Türleri ile Birleşimi 29
3.2 Kurutma Çalışmalarında Ön İşlem Kullanımı 29
3.2.1 Boyut Küçültme ve Püre Haline Getirme 30
3.2.2 Blanşlama 30
3.2.3 Osmotik Dehidrasyon 31
3.2.4 Alkalli Çözelti 31
3.2.5 Sülfürleme 32

3.2.6 Pulsed Electric Field (PEF) 32
3.2.7 Ultrason 32
3.2.8 Yüksek Hidrostatik Basınç 33
3.2.9 Asidik Ön İşlem 33
3.2.10 Etanol 34
3.2.11 Ozon 34
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR **35**
4.1 Hammadde Temini ve Örnek Hazırlanması 35
4.2 Ön İşlem Uygulamaları ve Nem Tayini 35
4.3 Kurutma İşlemleri 36
4.4 Kurutma Kinetiği Hesaplamaları 37
4.5 Matematiksel Modelleme ve İstatistiksel Veri Analizi 38
4.6 Efektif nem difüzyon katsayısı *(D_{eff})* 39
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR **41**
5.1 Ön İşlem Uygulamaları ve Nem Tayini Sonuçları 41
5.2 Ejder Meyvesi Dondurarak Kurutma Sonuçları 42
5.3 Hint İnciri Meyvesi Dondurarak Kurutma Sonuçları 45
5.4 Ejder Meyvesi IR kurutma Sonuçları 48
5.5 Hint İnciri Meyvesi IR kurutma Sonuçları 50
5.6 Dondurarak Kurutma Modelleri ve Veri Analizi Sonuçları 53
5.7 IR Kurutma Modelleri ve Veri Analizi Sonuçları 59
6 SONUÇ **76**
KAYNAKÇA **78**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **81**

SİMGE LİSTESİ

χ^2	Azaltılmış ki-kare
°C	Celsius
°Brix	Çözünmüş şeker miktarı
Deff	Efektif difüzyon katsayısı
µm	Mikrometre
k_1	Peleg hız sabiti
k_2	Peleg kapasite sabiti
R^2	Regresyon katsayısı
T	Sıcaklık
W	Watt
%	Yüzde
L	Yarı kalınlık
R	Uluslararası gaz sabiti
T	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

BE	Betasianin
CUPRAC	Bakır İyonu Antioksidan İndirgeme Kapasitesi
DR	Kuruma Hızı
FRAP	Demir İyonu İndirgeme Antioksidan Gücü
HAD	Hava ile Kurutma
IE	Betaksantin
OD	Osmotik Dehidrasyon
TBC	Toplam Betalain İçerik
TFC	Toplam Flavonol İçerik
TPC	Toplam Fenolik İçerik

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Hylocereus cinsine ait pitayanın çiçekleri (A), sapları (B) ve meyveleri (C, D) **11**

Şekil 2.2 Hint inciri meyvesi meyve, yaprak ve kök **15**

Şekil 3.1 Ürün nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimi **16**

Şekil 3.2 Kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi **17**

Şekil 3.3 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi **17**

Şekil 3.4 Yeni kurutma yöntemlerinin avantajları **19**

Şekil 3.5 Laboratuvarımızda bulunan dondurarak kurutma cihazı **22**

Şekil 3.6 Liyafilizasyon **22**

Şekil 3.7 Sprey Dondurarak Kurutucu **24**

Şekil 3.8 Infrared Kurutucu **28**

Şekil 3.9 Meyve veya sebzelerin ön işleme yöntemleri **30**

Şekil 4.1 Deneysel çalışmalar için hazırlanan ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri **35**

Şekil 4.2 Dondurarak kurutma öncesi ön işlem uygulanmış ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri **36**

Şekil 4.3 IR öncesi ön işlem uygulanmış ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri **36**

Şekil 4.4 Ön işlemsiz ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri **37**

Şekil 4.5 Ön işlemsiz ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri **37**

Şekil 5.1 Ejder Meyvesi numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği **43**

Şekil 5.2 Ejder meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği **44**

Şekil 5.3 Ejder meyvesi numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri **45**

Şekil 5.4 Hint İnciri numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği **46**

Şekil 5.5 Hint İnciri numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği **47**

Şekil 5.6 Hint İnciri numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri **47**

Şekil 5.7 Ejder Meyvesi numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği **48**

Şekil 5.8 Ejder meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği **49**

Şekil 5.9 Ejder meyvesi numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri **50**

Şekil 5.10 Hint İnciri numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği **51**

Şekil 5.11 Hint İnciri numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği**.....52**
Şekil 5.12 Hint İnciri numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri **.....53**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Literatürde bulunan bazı kurutma modelleri **6**

Tablo 2.1 Farklı bölgelerden elde edilen ejder meyvesi türlerinin kimyasal bileşimleri **13**

Tablo 5.1 Farklı bölgelerden elde edilen ejder meyvesi türlerinin kimyasal bileşimleri **42**

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler **54**

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler..... **60**

Tablo 5.4 İnfrared kurutucuda 60°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler **66**

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler..... **70**

ÖZET

Türlü Egzotik Meyvelerin Güncel Yöntemler ile Kurutulması ve Matematiksel Modellemesi

Kübra KURNAZ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK

Gıda maddeleri söz konusu olduğunda, kurutma işleminin uygulanması, ürünün kütlesini ve genellikle hacmini azaltmayı amaçlar; bu da taşınmasını, depolanmasını ve paketlenmesini daha kolay ve ekonomik hale getirir. Meyve ve sebzeler, %80'in üzerinde yüksek bir nem içeriğine sahiptir, bu da onları bozulmaya neden olan bakterilere karşı son derece hassas hale getirir. Kurutma, su aktivitesini azaltarak gıdaları kararlı ve güvenli bir durumda muhafaza eder ve taze ürünlere kıyasla raf ömrünü önemli ölçüde uzatır. Çeşitli kurutma teknikleri arasında, dondurarak kurutma veya liyofilizasyon, gıda ürünlerinin korunmasında en önemli işlemlerden biri haline gelmiştir. Dondurarak kurutma, bir üründeki çözücünün süblimasyonu esasına dayanır. İnfrared kurutma prosesinde ise enerji, bir ısıtma elemanından ürüne, çevredeki havayı ısıtmadan aktarılır ve bu da ürünün iç katmanlarında havadan daha yüksek bir sıcaklık oluşmasına yol açar. Bu çalışmada ön işlemsiz ve ön işlem uygulanmış, ejder meyvesi ve hint inciri meyvesi numuneleri, dondurarak kurutucuda ve Infrared kurutucuda kurutulmuştur. Kurutma deneylerinden elde edilen veriler çeşitli matematiksel modelere uygulanarak en uygun kurutma modelleri belirlenmiştir. Numunelerin kuruma

davranışları gözlemlenmiş, ön işlemlerin kuruma hızına etkisi üzerine değerlendirme yapılmıştır.

Her iki kurutma yöntemi IR ve liyofilizasyon için gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında, ejder meyvesi ve hint inciri örnekleri için uygulanan çeşitli matematiksel modellerin uygunlukları, belirlenen R^2, χ^2 ve RMSE değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

IR kurutma yöntemiyle 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarında kurutulan ejder meyvesi ve hint inciri örneklerinde, genellikle Aghbashlo ve Midilli ve Küçük modelleri, hem ön işlemsiz hem de ön işlem uygulanmış numuneler için en yüksek R^2($\geq$ 0,9995) ve χ^2 ve RMSE değerleri ile en iyi uyumu sağlamıştır.

Benzer şekilde, liyofilizasyon yöntemiyle kurutulan meyve örneklerinde de, hem ejder meyvesi hem de hint inciri için Aghbashlo ve İki Terimli Üstel modelleri, elde edilen yüksek R^2 ($\geq$ 0,9965) ve düşük χ^2 ve RMSE hata değerleriyle, kuruma davranışını en iyi temsil eden modeller olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dondurarak kurutma, infrared kurutma, ejder meyvesi, hint inciri, askorbik asit, elma suyu

ABSTRACT

Drying and Mathematical Modeling of Various Exotic Fruits Using Current Methods

Kübra KURNAZ

Department of Chemical Engineering
Master of Science

Prof. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK

When it comes to food products, the application of drying processes aims to reduce the mass and often the volume of the product, making transportation, storage, and packaging easier and more economical. Fruits and vegetables have a high moisture content of over 80%, making them highly susceptible to spoilage caused by bacteria. Drying preserves food in a stable and safe state by reducing water activity, significantly extending its shelf life compared to fresh products. Among various drying techniques, freeze-drying or lyophilization has become one of the most important processes for food preservation. Freeze-drying is based on the sublimation of the solvent in a product. In the infrared drying process, energy is transferred from a heating element to the product without heating the surrounding air, leading to higher temperatures in the inner layers of the product compared to the air.

In this study, untreated and pretreated samples of dragon fruit and prickly pear were dried using a freeze dryer and an infrared dryer. The data obtained from the drying experiments were applied to various mathematical models to determine the most suitable drying models. The drying behavior of the samples was observed, and the effect of pretreatments on drying rate was evaluated.

In the modeling studies conducted for both drying methods, infrared (IR) drying and lyophilization, the suitability of various mathematical models applied to dragon fruit and prickly pear samples was evaluated based on the determined values of R^2, χ^2 and RMSE.

For the IR drying method, carried out at temperatures of 50°C, 60°C, and 70°C, the Aghbashlo and Midilli and Küçük models generally provided the best fit for both untreated and pre-treated samples, yielding the highest R^2 values (≥ 0.9995) and the lowest χ^2 and RMSE values.

Similarly, in the case of lyophilized fruit samples, the Aghbashlo and Two-Term Exponential models were identified as the most appropriate models for both dragon fruit and prickly pear. These models produced high R^2 values (≥ 0.9965) along with low χ^2 and RMSE error values, thus best representing the drying behavior under freeze-drying conditions.

Keywords: Freeze-drying, infrared drying, dragon fruit, prickly pear, ascorbic acid, apple juice

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Meyveler, insan beslenmesinde önemli bir yer tutan, vitaminler, mineraller ve biyoaktif bileşenler açısından zengin gıda ürünleridir. Ancak yüksek su içerikleri nedeniyle, enzimatik ve mikrobiyolojik bozulmaya karşı son derece hassastırlar. Bu durum, meyvelerin raf ömrünü önemli ölçüde kısaltmakta ve muhafaza yöntemlerini zorunlu hale getirmektedir. Bununla birlikte gıda ürünlerinin işlenmesi, kaliteyi kısmen veya tamamen etkileyebilen yaygın bir olgudur. Depolama, işleme, ve dağıtım süreçleri sırasında gıda maddelerinin biyolojik, kimyasal ve/veya fiziksel özelliklerinde çeşitli değişimler meydana gelebilir. Kalite kriteri, tüketicilerin tercihleri açısından giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu nedenle, endüstriyel ürünler ve bileşenler, taze ürünlere benzer şekilde tat, sağlık açısından fayda ve güvenlik gibi çeşitli özellikler sunmalıdır. Kurutma, meyvelerin raf ömrünü uzatmak, taşınabilirliğini artırmak, depolama alanı gereksinimini azaltmak ve mikrobiyal aktiviteyi kontrol altına almak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Dondurarak kurutma (liyofilizasyon), çözücünün (genellikle su) veya süspansiyon ortamının düşük sıcaklıkta kristalize edilmesini ve ardından katı halden doğrudan buhar fazına süblimasyonunu içeren bir kurutma işlemidir. Günümmüzde dondurarak kurutma, ısıya duyarlı biyolojik materyallerin korunmasında en önemli işlemlerden biri haline gelmiştir. Bu yöntemin kullanım alanı, nispeten basit muhafaza edilebilir gıdalardan, karmaşık biyoteknolojik veya farmasötik ürünlere, hatta çoğalan bakteri ve mantarlara kadar genişletilebilmektedir. Kahve, çay, çıtır meyve ve sebzeler, hazır yemek bileşenleri ve bazı aromatik bitkiler gibi gıda ürünlerinin yanı sıra çiçekler, mikroorganizmalar, ilaçlar, tıbbi cihazlar, kozmetikler, özel kimyasallar ve

pigmentler, enzimler ve seramik tozlar gibi çeşitli ürünlerin korunması için de uygundur (Ciurzyńska & Lenart, 2011).

IR (infrared) kurutma, yüksek termal verimliliği, hızlı ısıtma tepkisi ve malzeme tarafından doğrudan emilebilirliği nedeniyle tarım endüstrisinin dikkatini çekmektedir. Gerçekten de IR radyasyonu endüstriyel üzüm yan ürünleri, çekirdeksiz üzümler, zeytin posası, kaju çekirdekleri, otlar, arpa, longan meyvesi, patates, havuç, elma dilimleri, domates yan ürünleri, karides, kabuklu pirinç, soğan, taze ve şekerle işlenmiş yaban mersini, Trabzon hurması, safran, ananas ve kırmızı biber gibi çeşitli gıda ürünlerinin kurutulması için araştırılmıştır (Efremov, 2014).

Ejder meyvesi veya pitaya, yüksek besin değeri ve güçlü doğal antioksidanlar da dahil olmak üzere çeşitli biyoaktif bileşikleri sayesinde insan sağlığına birçok fayda sağlayan egzotik bir tropikal bitkidir. Ejder meyvesinin sapları, çiçekleri, kabukları ve meyve eti özleri; bakteriler, mantarlar, virüsler gibi patojenik mikroplara karşı ve diyabet, obezite, hiperlipidemi, kanser gibi hastalıklara karşı çeşitli faydalı biyolojik aktivitelere sahiptir. Ayrıca, ejder meyvesi özleri kardiyovasküler ve hepatoprotektif özelliklere sahip olup prebiyotik potansiyel de taşımaktadır (Luu vd., 2021).

Hint inciri, öz, kabuk ve tohumlardan oluşur ve bunların ağırlık oranları sırasıyla %28-58, %37-67 ve %2-10 arasında değişir. Meyvenin öz kısmı fruktoz, glikoz ve pektin açısından zengindir. Ayrıca meyve, diğer besin öğelerinin yanı sıra askorbik asit, flavonoidler, betalainler ve fenoller içerir. Bazı araştırmalar, bu fenolik bileşiklerin konsantrasyonunun meyvenin rengi ve çeşidi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. *Opuntia ficus-indica*, özellikle cladodes (fotosentez yapan özel bir düzleşmiş gövde uzantısıdır) ve meyveleri, taze yenilebilir gıda maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmasının yanı sıra reçel, alkollü içecekler, doğal sıvı tatlandırıcılar veya hayvan yemi gibi ürünlerde de yer almaktadır. Buna ek olarak, Meksikalılar meyveleri arteriyoskleroz, diyabet, gastrit ve hiperglisemi gibi hastalıkların tedavisinde geleneksel olarak kullanmaktadır (Andreu vd., 2018).

Literatürde, farklı parametreler, ön işlemler ve kurutma yöntemlerinin nihai ürün üzerindeki etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Bhagya Raj & Dash, 2020, çalışmalarında ejder meyvesinin mikrodalga ve konvektif kurutma sürecindeki sıcaklık profilini tahmin etmek için üç boyutlu

analitik bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Mikrodalga kurutma için elektromanyetik (Maxwell denklemi) ve ısı transferi modellerinin birleşimi kullanılmıştır. Isı transferi modellemesi, tarımsal ürünlerin mikrodalga ve konvektif kurutma sürecindeki ısıl yayılımını tanımlamak için uygundur. Bu çalışmada, 15 mm boyutundaki ejder meyvesi küpleri, mikrodalga kurutma işlemi sırasında 200, 400 ve 600 W mikrodalga gücüne, konvektif kurutma işlemi sırasında ise 60°C sıcaklıktaki sıcak havaya maruz bırakılarak kurutulmuştur. Mikrodalga kurutma sırasında, ejder meyvesi küpünün merkez sıcaklığı, yüzey sıcaklığına kıyasla maksimum seviyede bulunmuştur. 60 saniyelik kurutma süresi boyunca, 200, 400 ve 600 W mikrodalga gücüne maruz kalan ejder meyvesi küpünün merkez sıcaklığı sırasıyla 34,67°C, 44,34°C ve 54,02°C olarak tahmin edilmiştir. Konvektif kurutma sürecinde ise kenar sıcaklıkları, ejder meyvesi küpünün merkez noktasındaki sıcaklıktan daha yüksek olmuştur. Kurutma sırasında, meyve numunesi sıcak havaya 8 dakika maruz kaldıktan sonra maksimum 60°C sıcaklığa ulaşmıştır. Deneysel ve model tarafından öngörülen değerler arasındaki RMSE ve χ^2 değerleri mikrodalga kurutmada sırasıyla 0,988 ve 0,029'un altında, konvektif kurutmada ise 0,891 ve 0,018'in altında bulunmuş olup, modelin öngördüğü değerlerin deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.

Mahayothee vd., 2019, çalışmalarında, kırmızı etli ejder meyvesinin farklı sıcaklıklarda (40°C, 50°C, 60°C, 70°C ve 80°C) ve hava hızlarında (1,0 ve 1,5 m/s) belirli bir bağıl nemde (25 g H_2O/kg kuru hava) kurutulması üzerine çalışmıştır. Sonuçlar, daha yüksek sıcaklıklarda kurutmanın daha kısa kuruma süreleriyle sonuçlandığını göstermiştir. Ancak hava hızı ve sıcaklık, kurutulmuş ürünlerde toplam betasianin içeriğini ve antioksidan kapasitesini önemli ölçüde etkilememiştir. LC-MS ile belirlenen yedi betasianin bileşiği; betanin, izobetanin, fillokaktin, izofillokaktin, betanidin, izobetanidin, glukozit ve dekarboksile fillokaktin olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklığın betasianinlerin izomerizasyonunu artırdığı belirlenmiştir. 80 °C sıcaklıkta ve 1,5 m/s hava hızında kurutma kırmızı etli ejder meyvesinin rengini ve betasianin içeriğini korumak için en uygun koşul olarak bulunmuştur. Bu koşul, kuruma süresini kısaltırken kurutulmuş ürüne parlak kırmızı bir renk kazandırmış ve betasianinler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır.

Macedo vd., 2021, çalışmalarında köpük yatak kurutma yöntemi kullanılarak beyaz ve kırmızı ejder meyvesi tozu elde edilmesi incelenmiş, köpükleştirici madde oranı ve karıştırma süresi optimize edilmiştir. Etanol kullanımı ve hava sıcaklığının kuruma kinetiği, etkin nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) ve kuruma hızı (DR) üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma iki aşamaya ayrılmıştır. İlk aşamada, köpüğün yoğunluğu, stabilitesi, gözenekliliği ve kabarma oranı değerlendirilmiş ve optimum koşul belirlenmiştir. Beyaz ve kırmızı meyve posası köpükleri için optimum koşullar sırasıyla 26.88 dakika ve 4,12 kg 100 kg^{-1} ile 23.5 dakika ve 3,44 kg 100 kg^{-1} olarak bulunmuştur. İkinci aşamada, köpük etanol ön işlemi uygulanarak konvektif kurutmaya (50°C veya 70°C) tabi tutulmuştur. En iyi koşul, en yüksek sıcaklıkta kurutma ve ön işlem uygulanması olup, en kısa kuruma süresi ile en yüksek D_{eff} ve DR değerlerine ulaşılmıştır.

Lee vd., 2013 çalışmalarında farklı bağıl nem (RH) seviyelerinde depolama sırasında sprey kurutulmuş kırmızı (*Hylocereus polyrhizus*) ve beyaz (*Hylocereus undatus*) ejder meyvesi tozunun fiziksel stabilitesini ve antioksidan özelliklerini araştırmışlardır. Sprey kurutma koşulları olarak, kırmızı ejder meyvesi için 120°C ve beyaz ejder meyvesi için 110°C giriş hava sıcaklıkları ile %30 (a/h) maltodekstrin konsantrasyonu seçilmiştir. Elde edilen toz, 3 ila 7 µm arasında değişen parçacık boyutuna ve küresel morfolojiye sahiptir. Sprey kurutma öncesindeki kontrol örnekleriyle karşılaştırıldığında, tozun antioksidan içeriği ve antioksidan aktivitesi daha düşük bulunmuştur. 25°C'de 43%, 54% veya 75% RH'de 25 gün boyunca depolama, cam geçiş sıcaklıklarının depolama sıcaklığının altına düşmesiyle ilişkili yapısal değişikliklere yol açmıştır. Ancak, %33 RH'de görünür yapısal değişiklikler gözlenmemiştir. Çalışılan bağıl nem seviyelerinde 25 günlük depolama sonrası tozun antioksidan özelliklerinde herhangi bir değişiklik tespit edilmemiştir.

Amira Touil, Saber Chemkhi, ve Fethi Zagrouba (2013), çalışmalarında dikenli incir (*Opuntia ficus-indica*) yastıkları ve meyvelerinin kuruma davranışını, bir kızılötesi kurutucu kullanılarak incelenmiştir. Ürünlerin hacim büzülmesi hesaplanmış ve ürünün büzülmesinin nem içeriğine karşı deneysel değişimini tanımlamak için doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Nem transferinin etkin difüzyon katsayısı, Fick yasası kullanılarak üç farklı kurutma sıcaklığında (40°C, 50°C ve 60 °C) belirlenmiştir. Etkin difüzyon katsayısının belirlenmesi için büzülme de

difüzyon modeline dahil edilmiştir. Elde edilen etkin nem difüzyon katsayısı sonuçları, yastık ve meyve için sırasıyla $1{,}77\times10^{-10}$, $5{,}07\times10^{-10,}$ $1{,}77\times10^{-10}$, $5{,}07\times10^{-10}$ $1{,}77\times10^{-10}$ $5{,}07\times10^{-10}$ m²/s ve $2{,}53\times10^{-10}$, $7{,}6\times10^{-10}$, $2{,}53\times10^{-10}$, $7{,}6\times10^{-10}$ $2{,}53\times10^{-10}$, $7{,}6\times10^{-10}$ m²/s aralığında değerlendirilmiştir. Yastık ve meyve için aktivasyon enerjisi değerleri sırasıyla 45,39 ve 47,79 kJ/mol olarak tahmin edilmiştir. Ancak, bu nem difüzyon katsayısı değerleri, kurutma işlemi sırasında nem içeriğinin değişimi bağımsız olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, nem difüzyon katsayısını nem içeriği ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade eden tam kuadratik bir denklem geliştirilmiştir. Parametreler, çoklu doğrusal regresyon yöntemiyle elde edilmiştir. Bu denklemin, nem içeriği ve sıcaklığa bağlı difüzyon değişimini tanımlamada tatmin edici olduğu ve korelasyon katsayılarının sırasıyla %91,5 ve %95 olduğu bulunmuştur.

Gouws vd., 2019 çalışamalarında Avustralya dikenli incirinin fitokimyasal bileşenlerini incelemek amacıyla farklı kurutma yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır. Beyaz, turuncu ve mor meyveler, dondurarak kurutma, mikrodalga kurutma, hava sirkülasyonlu fırın kurutma ve farklı sıcaklıklarda (35°C, 55°C ve 75°C) kurutucu kullanılarak kurutulmuştur. Metanolik ekstraktlar (kabuk/et kısmı) üzerinden Toplam Fenolik İçerik (TPC), Toplam Flavonol İçerik (TFC), Toplam Betalain İçerik (TBC), Betasianin (BE) ve Betaksantin (IE) ile antioksidan özellikler, Bakır İyonu Antioksidan İndirgeme Kapasitesi (CUPRAC) ve Demir İyonu İndirgeme Antioksidan Gücü (FRAP) belirlenmiştir. Çalışmada kurutma yöntemleri arasında anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir .Dondurarak kurutma ile karşılaştırıldığında, bazı durumlarda mikrodalga kurutmanın en yüksek içeriği sağladığı gözlemlenmiştir.

Anabel Rodriguez, Marta Sofía Gozzi, Ana María Sancho, Yanina Barrio, Pablo Rosito (2019) çalışmalarında hint inciri yastıklarında sıcak hava ile kurutma (HAD) öncesinde bir ön işlem olarak osmotik dehidrasyonu (OD) optimize etmektir. Fizikokimyasal, renk ve mekanik özellikler açısından OD koşullarını optimize etmek için Box–Behnken deneysel tasarımı kullanılmıştır. Çalışılan faktörler; üç farklı sükroz konsantrasyonu (30°Brix, 40°Brix ve 50°Brix), kalsiyum laktat oranı (1, 2 ve 3%) ve daldırma süresi (1.5, 2.5 ve 3.5 saat) olmuştur. Sonuçlar, sükroz konsantrasyonu ve daldırma süresinin en etkili değişkenler olduğunu göstermiştir. Daha önce bahsedilen kalite özellikleri ve kurutulmuş örneklerin (60°C'de 48 saat)

son mineral içeriği analiz edilmiştir. Kombine kurutma (OD + HAD), yalnızca HAD yöntemine kıyasla nem içeriğini %23 ila %30 oranında azaltmıştır. OD'nin optimizasyonunun kalite özelliklerini korumaya yardımcı olduğu ve kurutulmuş *Nopal* yastıklarına katma değer sağlamak için iyi bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Tablo 1.1'de literatürde bulunan yaygın kurutma modellerine ait veriler paylaşılmıştır.

Tablo 1.1 Literatürde bulunan bazı kurutma modelleri

No	Model Adı (Türkçe)	Model Denklemi	Referans
1	Newton/Lewis Modeli	$\mathrm{MR} = \exp(-\mathrm{kt})$	(Westerman vd., n.d.)
2	Page Modeli	$MR = exp(-kt^{n})$	(Simal vd., 2005)
3	Modified Page Modeli	$MR = exp[-(kt)^{n}]$	(Yaldiz vd., 2001)
4	Modified Page II Modeli	$MR = exp[-(t/k)^{n}]$	(Midilli ve Küçük, 2002)
5	Modified Page III Modeli	$MR = exp[-(kt)^{n}]$	(Praveen Kumar vd., 2006)
6	Henderson ve Pabis Modeli	$MR = a \cdot exp(-kt)$	(Kipcak, 2017)
7	Logaritmik Model	$MR = a \cdot exp(-kt) + c$	(Yaldiz vd., 2001)

Tablo 1.1 Literatürde bulunan bazı kurutma modelleri (devamı)

No	Model Adı (Türkçe)	Model Denklemi	Referans
8	İki Terimli Üstel Model	$MR = a \cdot exp(-kt) + (1 - a) \cdot exp(-kat)$	(Yaldiz vd., 2001)
9	Wang ve Singh Modeli	$MR = 1 + at + bt^2$	(Özdemir & Devres, 1999)
10	Yayınım Yaklaşımı (Yaklaşık)	$MR = a \cdot exp(-t^n) + (1 - a) \cdot exp(-kt)$	(Yaldiz & Ertekin, 2001)
11	Verma vd. Modeli	$MR = a \cdot exp(-kt) + (1 - a) \cdot exp(-gt)$	(MENGEŞ & ERTEKİN, 2007)
12	Aghbashlo Modeli	$MR = exp[-(t/k)^n]$	(Kipcak, 2017)
13	Weibull Modeli	$MR = \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^a\right]$	(Kipcak, 2017)
14	Midilli ve KüçükModeli	$MR = a \cdot exp(-kt^n) + bt$	(Midilli ve Küçük, 2002)
15	Geometrik Model	$MR = a^t$	(Chandra, 2017)
16	Kombine İki Terimli ve Page Modeli	$MR = a \cdot exp(-(kt)^n) + b \cdot exp(-kt)$	(Hii vd., 2008)

Tablo 1.1 Literatürde bulunan bazı kurutma modelleri (devamı)

Sıra No	Model Adı (Türkçe)	Model Denklemi	Referans
17	Balbay ve Şahin Modeli	$MR = (1 - a) \cdot exp(-kt) + b$	(Balbay & Şahin, 2012)
18	Hasibuan ve Daud Modeli	$MR = 1 - a \cdot exp(-kt)$	(Ertekin & Heybeli, 2014)
19	Vega-Lemus Modeli	$MR = (a + kt)^2$	(João Barroca & Guiné, n.d.)
20	Basitleştirilmiş Fick Difüzyonu	$MR = a \cdot exp(-kt) + c \cdot exp(-k_1 t)$	(Celma vd., 2007)
21	Hii vd. Modeli	$MR = a \cdot exp(-k_1 \cdot t^n) + b \cdot exp(-k_2 \cdot t^n)$	(Kumar vd., 2012)
22	Diamante vd. Modeli	$ln(-ln(MR)) = a + b \cdot (ln(t)) + c \cdot (ln(t))^2$	(Diamante vd., 2010)
23	Parabolik Model	$MR = a + bt + ct^2$	(Sharma & Prasad, 2004)
24	Demir vd. Modeli	$MR = a \cdot exp(-kt) + b$	(Demir vd., 2007)

1.2 Tezin Amacı

Dehidrasyon, gıda maddelerinin uzun süre saklanmasını sağlayan iyi bilinen bir süreçtir. Ancak tüm kurutma yöntemleri, taze ürünün besin özelliklerini kuru halde

koruyamaz, çünkü kalite, kurutma sürecinin süresine ve yoğunluğuna bağlıdır. Meyve ve sebzelerde bulunan besin bileşiklerinin çoğu ısıya duyarlıdır (termolabil) ve oksijene karşı hassastır (Quintero Ruiz vd., 2014).

Birçok tarım ülkesinde, gıda ürünleri raf ömrünü uzatmak, ambalaj maliyetlerini azaltmak, nakliye ağırlığını düşürmek, görünümü iyileştirmek, orijinal aromayı kapsüllemek ve besin değerini korumak amacıyla büyük miktarlarda kurutulmaktadır. Okos, Narsimhan, Singh ve Weitnauer (1992)'a göre, gıda endüstrisinde kurutma süreci araştırmalarının ekonomik anlamda fayda, çevresel kaygıların minimize edilmesi ve ürün kalitesinin arttırılması gibi temel amaçlar vardır.

Ejder meyvesi (pitaya), kırmızı etli kısmında ve kabuğunda bulunan betalainler ve askorbik asit gibi antioksidan bileşikler sayesinde tatlı ve ekşi bir lezzete sahip olup çeşitli fonksiyonel ve besinsel özellikler sunar (Macedo vd., 2021).

Opuntia ficus-indica, yaygın adıyla dikenli incir, kserofit özelliklere sahip sulu bir bitkidir (Touil vd., 2014).

Dondurarak kurutma (liyofilizasyon), çözücünün (genellikle su) veya süspansiyon ortamının düşük sıcaklıkta kristalleştirildiği ve ardından doğrudan katı halden buhar fazına süblime olduğu bir kurutma işlemidir (Ciurzyńska & Lenart, 2011).

İnfrared (IR) kurutma ise, meyve kurutma süreçlerinde verimliliği artıran ve kaliteyi koruyan yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla doğrudan ısı transferi sağlayarak suyun hızlı bir şekilde buharlaşmasını teşvik eder.

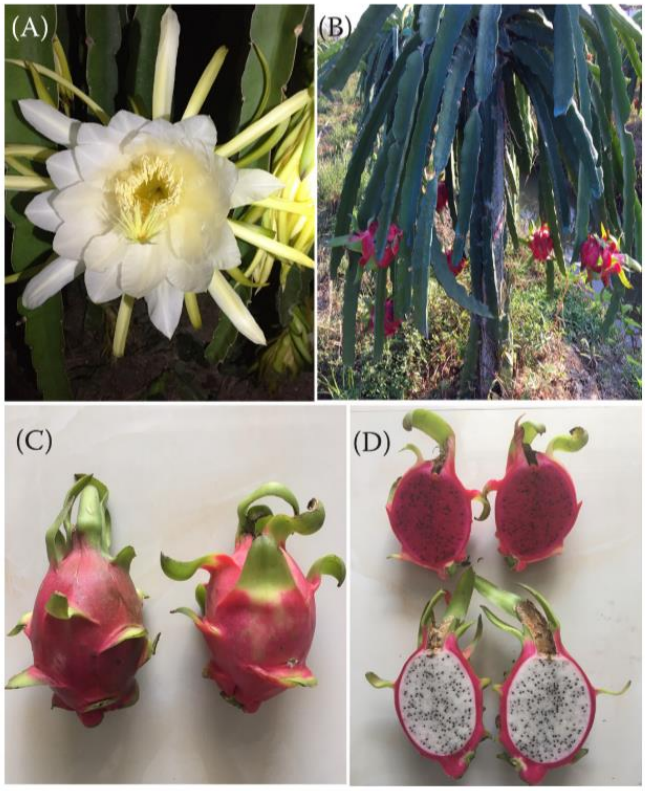
Literatürde ejder meyvesi ve hint incirinin kurutulması üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmakta olup, bu meyvelere kurutma öncesi askorbik asit ve elma suyu ön işlemlerinin uygulanmasına yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez kapsamında, ejder meyvesi ve hint inciri, askorbik asit ve elma suyu ön işlemleri uygulanarak infrared ve dondurarak kurutma yöntemleri ile kurutulmuş, kurutma süreçlerinin matematiksel modellemeleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, farklı kurutma yöntemleri ve ön işlemlerin ürün kalitesi üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

2
EGZOTİK MEYVELER

2.1 Ejder Meyvesi *(Hylocereus undatus)*

Ejderha meyvesi veya pitaya (*Hylocereus undatus*), Meksika ve Orta / Güney Amerika'ya özgü tropikal / subtropikal bir meyvedir. *Pitaya roja* (İspanyolca), *la pitahaya rouge* (Fransızca) ve çilekli armut, *thang loy* (Vietnamca) olarak da bilinen ejderha meyvesi, kaktüslere tırmanarak yetişir. Orta Amerika'da ekimi 13. yüzyıla dayanmaktadır. Fransızlar tarafından tanıtılmasının ardından 100 yılı aşkın bir süredir Asya Vietnam'da da yetiştirilmektedir. Pitaya, *Cactaceae* familyasının bir üyesidir; korkuluk kladod sapları (yaprak görevi görecek şekilde değiştirilmiş) ile karakterize edilir ve yıl boyunca oval meyveler taşır. Mevcut üretim ülkeleri arasında Endonezya (özellikle batı Java), Tayvan, Vietnam, Tayland, Filipinler, Sri Lanka, Malezya, Bangladeş, Japonya (Okinawa), güney Çin, kuzey Avustralya ve ABD (Hawaii) bulunmaktadır (Ghorai, 2023; Siddiq & Nasir, 2012)

Pitaya göz alıcı görünümü ve alışılmadık derecede tatlı tadıyla övülen bir tropikal meyvedir. Optimum olgunlukta ejder meyvesi parlak kırmızı/pembe bir renge sahiptir ve çeşitliliğe bağlı olarak değişen bir meyve eti rengine (beyaz, koyu kırmızı veya soluk sarı) sahiptir. Meyve eti rengine bakılmaksızın, küçük siyah tohumlar meyve etine dağılmıştır. Günümüzde ejderha meyvesinin, kırmızı veya pembe derisi, beyaz veya kırmızı eti ve minik siyah tohumlarının yanı sıra olası beslenme ve sağlık yararları nedeniyle popülaritesi artmıştır. Bu sebeple diyetisyenlerin, araştırmacıların ve sağlık meraklılarının da ilgisini çekmiştir. Organik ve bitki bazlı diyetlere artan ilgi, ejderha meyvesi gibi egzotik meyvelere olan talebi artırarak potansiyel olarak yetiştiriciler ve üreticiler için yeni pazarlar açmıştır (Ghorai, 2023). Pitayanın çiçekleri, sapları ve meyvelerine ait görseller Şekil 2.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.1 Hylocereus cinsine ait pitayanın çiçekleri (A), sapları (B) ve meyveleri (C, D)

Ejder meyvesi, Asya ülkelerinde halk tıbbında kullanılan tıbbi bir bitki olarak da kabul edilir. Hastalıkları önlemek ve tedavi etmek için geleneksel tıp uygulamalarında bitkisel ilaçlar kullanmaktadır. Pitaya meyvesinin posası ve kabukları yüksek su içeriğine sahiptir, lif açısından zengindir ve yine yüksek miktarda mineral, vitamin ve antioksidanlar da dahil olmak üzere birçok besin öğesi içerir. Son yıllarda ejder meyvesinin biyolojik aktivitesi çok çeşitli çalışmalarda incelenmiş ve kanıtlanmıştır (Luu vd., 2021).

Ejder meyvesinin 100 g yenilebilir porsiyonu başına yenilikçi besin özellikleri arasında nem oranı (ortalama %85,3), protein (1,1 g), yağ (0,57 g), ham lif (1,34 g), enerji (67,7 kcal), kül (0,56 g), karbonhidrat (11,2 g), glikoz (5,7 g), fruktoz (3,2 g) ve sukroz, sorbitol (0,33 g), C vitamini (3,0 g) ile Mg, K, Na, Zn ve P gibi önemli mineraller bulunmaktadır. Ejder meyvesi çekirdeklerinin yağ asidi profili, linolenik asit ve palmitik asit (%17,5), oleik asit (%22,7) ve cis-vakenik asit (%3,0) gibi diğer önemli bileşenleri kapsamaktadır. Birçok araştırma, kırmızı ejder meyvesi kabuğunun stearik asit, pentenoik asit, dokosanoik asit, propanoik asit ve bütanoik

asit gibi önemli miktarda lipit içerdiğini göstermiştir (Jiang vd., 2021; Luu vd., 2021).

Ejder meyvesindeki karbonhidratların çoğu fruktoz, glikoz ve bir kaç oligosakkaritten oluşmaktadır. Özellikle meyvenin kabuğu, makrobesinlerin en yüksek konsantrasyonuna sahiptir ve pektin ile diyet lifleri açısından zengindir. Pitaya kabuğunun pektin miktarı içeriği birçok araştırmanın konusu olmuştur. Ejder meyvesi kabuğundaki pektinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kolesterol üzerinde güçlü emilim özelliklerine sahiptir ve bu, kan kolesterolü üzerindeki etkileri azaltmaya yardımcı olur. Ejder meyvesinin posasında B1 vitamini, B2 vitamini, B3 vitamini, E vitamini, C vitamini ve A vitamini bulunur. Ayrıca çinko, kalsiyum, fosfor, demir ve magnezyum gibi hayati elementleri de içermektedir (Jiang vd., 2021).

Doğal bir renk pigmenti olan betasiyanin, antiobezite, antikanser, antioksidan ve antibakteriyel gibi çok çeşitli biyolojik aktiviteler sergiler. Bu aktiviteler, kalp krizlerini önlemeye ve oksidatif karaciğer hasarını azaltmaya katkıda bulunur Betasiyaninler, dondurma, bisküvi ve yoğurt gibi ürünlerde doğal renk maddesi olarak kullanılır. Kurutulmuş ejder meyvesi etine kıyasla ejder meyvesi kabuğu daha fazla betasiyanin üretir ve bu, doğal renklendirici veya gıda ürünlerinde faydalı bir bileşen olarak kullanılır (Jiang vd., 2021).

Dünya genelinde en fazla ölüm oranına neden olan gruplardan biri diyabet hastalarıdır. Diyabetes mellitus, doğal ve bitkisel tedavilerle tedavi edilebilen metabolik bir hastalıktır. Raporlara göre, ejder meyvesi fosfodiesteraz inhibitör aktiviteye sahiptir, bu da kan şekeri seviyelerini düşürür. Çalışmalar, flavonoidlerin varlığının, fosfodiesterazı inhibe ederek ve oksidatif stresi azaltarak insülin tutulumunu artırdığını göstermiştir. Ejder meyvesi kabuğunda kolin, amin, N-benzilmetilen izometilamin, dopamin hidroklorür ve amarantin, içeren alkaloidler izole edilmiştir. Kabukda en yaygın alkaloidler kolin ve N-benzilmetilen izometilamindir. Ancak kırmızı ejder meyvesi, yeşil ejder meyvesine göre daha fazla alkaloid biriktirir (Kim vd., 2006).

Tablo 2.1'de farklı bölgelerden elde edilen ejder meyvesi türlerinin kimyasal bileşimler paylaşılmıştır.

Tablo 2.2 Farklı bölgelerden elde edilen ejder meyvesi türlerinin kimyasal bileşimleri

Bileşenler (g/100 g kuru ağırlık)	***Hylocereus undatus* (Hindistan)**	***Hylocereus polyrhizus* (Malezya)**	***Hylocereus spp.* (Nikaragua)**	***Hylocereus polyrhizus* (Brezilya)**	***Hylocereus undatus* (Çin)**
Kül	4,48 ± 0.31	1,30 ± 0.03	12,34 ± 0,30	17,56 ± 0,29	–
Lipitler	2,34 ± 0,18	0,10 ± 0,01	<0,53	1,31 ± 0,16	1,34
Proteinler	10,36 ± 0.23	0,90 ± 0,03	5,85 ± 0,75	6,30 ± 0,18	6,72
Karbonhidrat	–	8,10 ± 0,09	81,38 ± 2,26	8,92 ± 1,15	8,43
Toplam Diyet LİFi	56,91 ± 0,51	–	60,11 ± 0,75	65,59 ± 1,65	79,37 ± 1,80
Çözünmez Diyet Lifi	49,22 ± 0,84	–	–	41,63 ± 2,97	43,59 ± 1,09
Çözünebilir Diyet Lifi	7,69 ± 0,56	–	–	23,96 ± 1,32	33,07 ± 1,21

2.2 Hint İnciri *(Opuntia ficus-indica)*

Opuntia ficus-indica, yaygın olarak "dikenli armut" veya "kaktüs meyvesi" olarak bilinir ve *Cactaceae* familyasına aittir. Coğrafi dağılımı ağırlıklı olarak Meksika ve Latin Amerika'yı kapsasa da, bu bitki kurak ve yarı kurak iklimlerde yetişebilir ve bu nedenle Güney Afrika ve Akdeniz ülkelerinde de gelişim gösterebilir. İspanya'da

dikenli armut özellikle Akdeniz kıyılarında, Endülüs, Murcia, Balear ve Kanarya Adaları'nda yaygındır ve genellikle güneşli yamaçlarda, yol kenarlarında, terk edilmiş tarlalarda ve bozulmuş çalılıklarda bulunur (Medina-Torres vd., 2011; Lahsasni vd., 2004).

Meksika'da çok çeşitli ekolojik koşullarda büyüyen bu bitki, yaklaşık 3×10^7 hektarlık bir alanı kaplamaktadır. Nopalın oblong (uzunlamasına) şekilli yaprakları 30–60 cm uzunluğunda, 20–40 cm genişliğinde ve 1,9–2,8 cm kalınlığındadır. Nopal, mat yeşil bir renge sahiptir ve genç yapraklarda çoğu zaman diken bulunmaz; bulunduğunda ise sayıları az ve boyutları küçüktür (Medina-Torres vd., 2011).

Son yıllarda, taze yapraklarında bulunan yüksek düzeyde biyoaktif bileşikler nedeniyle, kurutulmuş nopal ile gıda formülasyonu yapılmasına olan ilgi artmıştır. Nopalın diyet lifi, flavonoidler, flavonoller, karotenler, askorbik asit, fitosteroller ve klorofil gibi biyoaktif bileşikleri içerdiği kanıtlanmıştır. Birçok kronik hastalık (kanser, hipertansiyon, obezite, kardiyovasküler hastalıklar) günlük beslenme alışkanlıklarıyla ilişkilidir ve bilimsel kanıtlar, diyet içerisindeki biyoaktif bileşiklerin önemini göstermektedir (Gallegos-Infante vd., 2009).

Bu nedenlerden dolayı, kurutulmuş nopal, birçok ilaç şirketi tarafından kilo düzenleyici, kan şekerini düşürücü ve diyet lifi (özellikle polisakkaritler) kaynağı olarak satılmaktadır. Bu polisakkaritler, büyük ölçüde kurutulmuş nopalın sulu çözeltilerindeki viskoziteden sorumludur ve dehidrasyon işlemi sırasında bazı özellikleri değiştirilebilir. Hint incirinin insan bağırsaklarındaki fizyolojik fonksiyonu ile viskozite arasında bir ilişki bulunduğundan, dehidrasyon işlemi parametrelerinin kurutulmuş nopal sulu çözeltilerinin kayma viskozitesine etkisini ve biyoaktif bileşiklerin korunmasıyla ilişkisini belirlemek önemlidir. Çünkü viskozite dehidrasyon işlemi sonrasında korunmuş olsa bile, bu durum biyoaktif bileşiklerin de korunduğunu garanti etmek için yeterli değildir. Bu nedenle hem viskozitenin hem de biyoaktif bileşiklerin korunması, dehidrasyon işleminin başarılı olduğunu gösterebilmektedir. (Medina-Torres vd., 2011).

Bu bitki dört ana kısma ayrılabilir: kladotlar (yaprak benzeri gövdeler), çiçek, meyve ve tohumlar. (Şekil 2.2) Meyve posa, kabuk ve tohumlardan oluşur ve bu parçaların ağırlık oranları sırasıyla %28-58, %37-67 ve %2-10'dur. Kladotlar ise lif,

mineraller, flavonoidler, fenoller ve diğer besin maddeleri gibi biyoaktif bileşikleri içerir. Meyvenin posası glikoz, fruktoz ve pektin açısından zengindir. Meyve ayrıca askorbik asit, flavonoidler, betalainler ve fenoller gibi besin maddelerini içerir. Bazı çalışmalar, fenolik bileşiklerin konsantrasyonunun meyvenin çeşidi ve rengi ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Lahsasni vd., 2004; Andreu vd., 2018).



Şekil 2.2 Hint inciri meyvesi meyve, yaprak ve kök

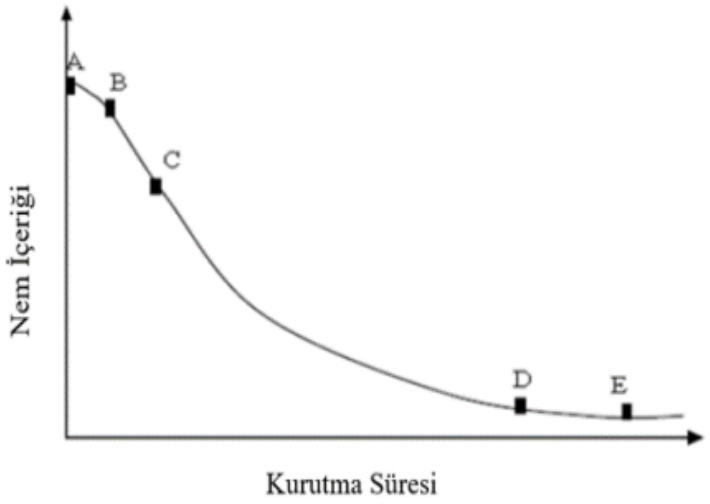
3
KURUTMA TEKNOLOJİSİ

3.1 Kurutma Yöntemleri

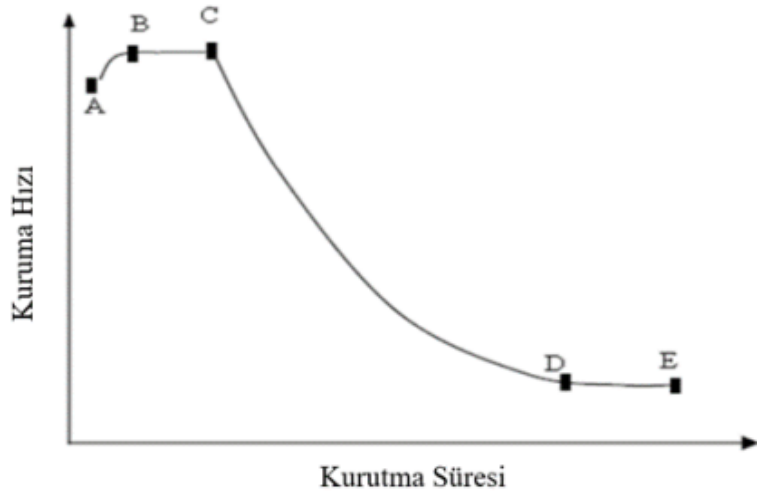
Kurutma, genellikle makromoleküler bir matristen oluşan bir malzemeden sıvının uzaklaştırılması işlemidir ve binlerce yıldır ahşap, kömür, kâğıt, biyokütle, atıklar ve gıdalar gibi çeşitli malzemelerde kullanılan en önemli ve en eski birim işlemlerden biridir (Michailidis & Krokida, 2015). Kurutma işlemi, gıdanın içindeki suyun uzaklaştırılması amacıyla ısı ve kütle transferinin eşzamanlı olarak yürütüldüğü bir prosestir.

Kurutulan maddelerin nem düzeyi ile kuruma kinetikleri arasındaki ilişki Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilen kuruma eğrileri ile belirlenebilir:

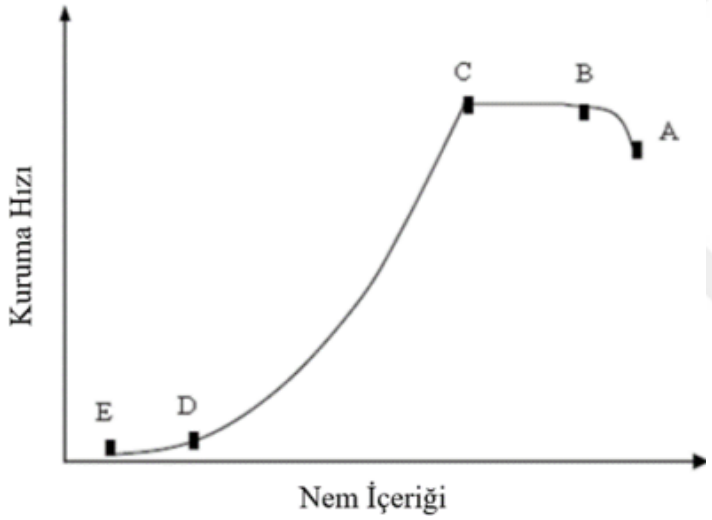
A - B Bölgesi: Bu evre, gıda maddesinin yüzey özelliklerinin ortam sıcaklığı ile dengeye gelmesini ifade eder. Genellikle kuruma hızında bir artış gözlemlense de, bu aşama tüm kurutma sürecinin çok küçük bir bölümünü oluşturduğu için çoğu zaman ihmal edilebilir.



Şekil 3.1 Ürün nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimi (Gençcelep, 2024)



Şekil 3.2 Kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi (Gençcelep, 2024)



Şekil 3.3 Kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Gençcelep, 2024)

B- C Bölgesi: Bu kısım, kurutma işleminin "sabit hız dönemi" olarak tanımlanır. Bu süreçte gıdanın yüzeyi su ile tamamen doygun haldedir. Çünkü maddenin iç kısmından yüzeye doğru difüzyon ve kapiler kuvvetlerle taşınan su miktarı, yüzeyden buharlaşma yoluyla uzaklaştırılandan daha fazladır. Başka bir ifadeyle, buharlaşma hızının difüzyon hızına göre daha düşük olması nedeniyle kuruma hızı, yüzeyin ısı transferine bağlıdır. Bu evrede ısı ve kütle transferi dengede olup, yüzey sıcaklığı sabit kalır. Kuruma işlemini yönlendiren temel unsur, gıda yüzeyindeki su buharı basıncı ile çevredeki hava akımı arasındaki buhar basıncı farkıdır. Kuruma süresi, özellikle sıcaklık ve nem farkı gibi üç ana etmen tarafından belirlenmektedir.

C- D Bölgesi: Gıdanın yüzeyindeki su tamamen buharlaştığında, yani kuruma hızı, iç kısımlardan yüzeye ulaşan suyun difüzyon hızını geçtiğinde, kuruma hızı

düşmeye başlar. Bu noktada oluşan nem seviyesine "kritik nem" denir. Her gıda maddesi için farklılık gösteren bu değer, ürünün bileşimine bağlıdır. Genel bir ifade ile, kritik nem genellikle gıdanın %50-60 bağıl nemde dengeye ulaştığı andaki su içeriğidir. Bu aşamadan sonra yüzey sıcaklığı artar ve giderek kuru termometre sıcaklığına yaklaşır. Bu evrede kuruma, iki aşamalı "azalan hız periyoduna ayrılır: birinci (C- E bölgesi) ve ikinci (E- D bölgesi) periyot.

Birinci azalan hız döneminde, gıdanın yüzeyi kurumaya başlar ve kuruma hızı düşer. Çünkü buharlaşma yüzeyi, ıslak alanın küçülmesiyle orantılı olarak azalır. Bu dönem sonunda yüzey tamamen kuruduğunda, buharlaşma artık gıdanın iç kısmında gerçekleşir. Bu durumda su, içeriden yüzeye doğru hareket eder ve oradan hava akımına karışır. Azalan hız periyotlarında kuruma hızı büyük ölçüde nemin içerideki hareketine bağlıdır. Özellikle ikinci azalan hız periyodunda, hava hızı gibi dış faktörlerin etkisi daha azdır. Bu süreçlerde ortamdan uzaklaştırılan nem miktarı az olsa da geçen süre oldukça uzundur. Bu nedenle azalan hız dönemleri, genel kuruma sürecinde belirleyici bir rol oynar. Kritik nem değeri; kuruma hızına, ürün boyutlarına ve gıda içerisindeki nemin hareketine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Gençcelep, 2024).

Kurutma kuvvetle muhtemel gıda endüstrisindeki en eski koruma yöntemidir (Waghmare vd., 2020). Gıda maddeleri söz konusu olduğunda, kurutma işleminin uygulanması, ürünün kütlesini ve genellikle hacmini azaltmayı amaçlar; bu da taşınmasını, depolanmasını ve paketlenmesini daha kolay ve ekonomik hale getirir. Meyve ve sebzeler, %80'in üzerinde yüksek bir nem içeriğine sahiptir, bu da onları bozulmaya neden olan bakterilere karşı son derece hassas hale getirir. Kurutma, su aktivitesini azaltarak gıdaları kararlı ve güvenli bir durumda muhafaza eder ve taze ürünlere kıyasla raf ömrünü önemli ölçüde uzatır (Rasane, n.d.). Bu, özellikle mevsimsel gıdalar için önemlidir, çünkü kurutma işlemi sonrasında bu gıdalar çok daha uzun bir süre boyunca kullanılabilir hale gelir (Michailidis & Krokida, 2015).

Kurutma yöntemleri genel olarak geleneksel ve yapay kurutma yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel kurutma yöntemi, gıdadaki nem içeriğini uzaklaştırmak için güneş enerjisini kullanır, ancak hava koşullarına bağımlılık ve düşük operasyonel performans gibi dezavantajlara sahiptir (Rasane, n.d.). Ayrıca, geleneksel kurutma sırasında besinlerin bozulması meydana gelir ve bu da gıda

ürünlerinin kalite kaybına neden olur. Bu sebeple, yeni kurutma ekipmanları ve kurutma teknikleri tasarlamak ve incelemek çok önemlidir (Waghmare vd., 2020).

Yapay kurutma yöntemleri, doğal kurutma yöntemine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajların bazıları Şekil 3.4'de paylaşılmıştır. Yapay yöntemler büyük miktarda nemi verimli bir şekilde uzaklaştırma kapasitesine sahiptir. Bunun yanı sıra, sıcaklık, kurutma havası akışı ve kurutma süresi gibi çeşitli faktörleri kontrol etmek de mümkündür. Yapay kurutma, mekanik veya elektrikli ekipman yardımıyla gerçekleştirilir (Rasane, n.d.).



Şekil 3.4 Yeni kurutma yöntemlerinin avantajları

Geleneksel yöntemler ısı transferi için iletim ve konveksiyon yöntemlerine dayanır, ancak bu yöntemler yüksek kontaminasyon olasılığına ve nihai ürünün düşük kalitede olmasına neden olabilir. Bu durum, patlayıcı puf kurutma, mikrodalga-vakum kombinasyonu kurutma, infrared kurutma ve ultrasonik dondurarak kurutma gibi daha verimli ve güvenilir kurutma tekniklerine sahip kurutucuların geliştirilmesine yol açmıştır. Örneğin vakumlu kurutma, havayı uzaklaştırır ve kurutulmuş ürünlerin doku, renk, tat ve aroma gibi özelliklerini korur. Vakum ortamında, meyve ve sebzelerdeki su atmosferik sıcaklığa kıyasla daha düşük bir sıcaklıkta ve hızlı bir şekilde buharlaşır, bu da gıdaların yüksek sıcaklığa maruz kalmaması ve oksidasyon reaksiyonunun oluşmaması nedeniyle daha az zarar

görmesiyle sonuçlanır. Bu nedenle, bu tür teknikler kurutulmuş gıdaların istenen özelliklerini korumak için kullanılabilir (Rasane, n.d.).

Güneş, tükenmez ve ücretsiz bir enerji kaynağı olup, eski çağlardan beri gıdaların kurutulmasında kullanılmaktadır. Güneşle kurutma, doğrudan ve dolaylı kurutma yöntemi olarak sınıflandırılabilir (Rasane, n.d.).

Hava ile kurutma, kabin tipi kurutucu, akışkan yataklı kurutucu gibi çeşitli kurutucular kullanılarak gerçekleştirilen geleneksel bir gıda kurutma yöntemidir. Ancak son araştırmalar, hava ile kurutmanın mikrodalga (MW) ısıtma ile birleştirildiğinde suyun uzaklaştırılmasında daha etkili olduğunu ortaya koymuştur (Yousefi vd., 2013).

Yüksek ısı ve kütle transfer katsayıları nedeniyle, akışkan yataklı kurutma, kimya, ilaç ve gıda işleme sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikrodalga ile birleştirilmiş akışkan yataklı bir kurutucu üzerine yapılan ilk çalışma Smith tarafından 1970 yılında sunulmuştur (Rasane, n.d.).

Mevcut kurutma yöntemleri arasında dondurarak kurutma (liyofilizasyon), gıda ürünlerinin muhafazasında öne çıkan en etkili işlemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, üründe bulunan çözücünün süblimleşmesi prensibine dayanmaktadır. Süblimleşen çözücü genellikle su olmakla birlikte, bazı durumlarda organik çözücüler de kullanılabilir; bu maddeler düşük sıcaklıklarda katı hale geçtikten sonra doğrudan gaz fazına dönüşür. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu işlem, ürünün kalite özelliklerini büyük ölçüde korurken, ısıya duyarlı bileşenlerin bozulma riskini de en aza indirir. (Martínez-Navarrete vd., 2019). Bu nedenle, dondurarak kurutmanın temel amacı, su ile yeniden yapılandırıldığında gıdanın kalitesini değiştirmeden uzun raf ömrüne sahip bir ürün elde etmektir.

Mikrodalga destekli dondurarak kurutma, daha kısa kurutma süreleri ve yüksek ürün kalitesi açısından umut verici bir teknolojidir. Ancak, korona deşarjları, erime veya aşırı ısınma gibi teknik zorluklar nedeniyle endüstriyel uygulanabilirliğinin sınırlı olduğu belirtilmiştir (Ratti, n.d.).

Adsorpsiyonlu dondurarak kurutma veya akışkan yataklı atmosferik dondurarak kurutma gibi diğer teknolojiler, kurutma süresi ve maliyet azaltımı açısından umut vadetmektedir. Ancak, bu yöntemlerde ürün kalitesi olumsuz etkilenebilir (Chou & Chua, n.d.).

Son yıllarda, kızılötesi radyasyon, gerekli ekipmanın çok yönlülüğü ve basitliği, hızlı ısıtma ve kurutma tepkisi, kolay kurulum ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle pratik bir alternatif kurutma teknolojisi haline gelmiştir. Kızılötesi radyasyon, malzemenin (örneğin meyve ve sebzelerin) içine nüfuz ederek radyasyon enerjisini ısıya dönüştürür ve kurutma sürecini hızlandırır.

Sıcaklık ve nemin aynı doğrultuda iletilmesiyle çalışan iki önemli kurutma tekniği olan mikrodalga kurutma ve kızılötesi radyasyon (IR), sebze ve meyvelerin kurutulması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, IR'nin homojen ısıtma sağlaması ve nihai ürün kalitesinin yüksek olması gibi avantajları bulunmaktadır (Rashid vd., 2019).

3.1.1 Dondurarak Kurutma

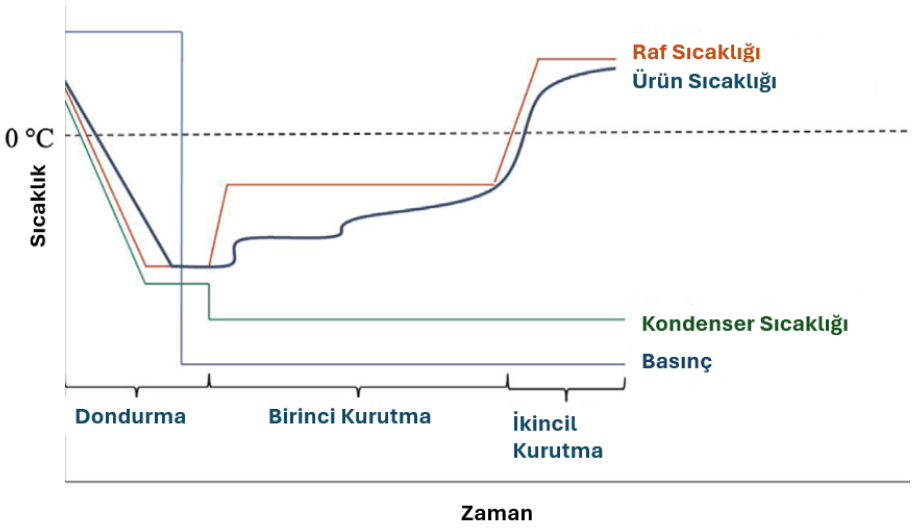
Gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak amacıyla uygulanan kurutma yöntemleri arasında, dondurarak kurutma (liyofilizasyon) öne çıkan yöntemlerden biridir. Bu teknik, ürün içerisinde bulunan çözücünün (genellikle su veya bazı durumlarda organik bir çözücü) süblimleşme yoluyla ortamdan uzaklaştırılmasına dayanır. Süblimleşme işlemi, çözücünün önce düşük sıcaklıklarda donması, ardından doğrudan katı fazdan gaz fazına geçmesi şeklinde gerçekleşir. Liyofilizasyonun düşük sıcaklıklarda uygulanması, özellikle ısıya duyarlı bileşiklerin yapısal bütünlüğünü korurken, ürünün besin değerleri ve fiziksel özelliklerinin de büyük ölçüde muhafaza edilmesine olanak tanır. (Martínez-Navarrete vd., 2019).

Bu nedenle, dondurarak kurutmanın temel amacı, su ile yeniden yapılandırıldığında gıda kalitesinin bozulmadan korunduğu ve raf ömrünün uzatıldığı bir ürün elde etmektir. Geleneksel kurutma teknolojisine kıyasla dondurarak kurutma birçok avantaj sunar. Başlıca avantajları arasında morfolojik, biyokimyasal ve orijinal özelliklerin korunması, uçucu bileşenlerin yüksek oranda geri kazanımı, yapı ve yüzey bütünlüğünün korunması yer alır (Isleroglu vd., 2018). Şekil 3.5'de örnek bir liyafilizatör resmi paylaşılmıştır.



Şekil 3.5 Laboratuvarımızda bulunan dondurarak kurutma cihazı

Dondurarak kurutma, bir sıvı formülasyonundan çözücünün uzaklaştırılması ilkesine dayanan bir koruma yöntemidir. Dondurarak kurutma süreci genel olarak üç temel aşamada incelenir: dondurma, birincil kurutma ve ikincil (veya üçüncül olarak da adlandırılabilen) kurutma evreleri (Şekil 3.6). Bu aşamalar sırasında süreç beş ana işlem adımını içerir: ürünün dondurulması, süblimasyon yoluyla nemin uzaklaştırılması, adsorbe suyun desorpsiyonu, sistemdeki basıncın kontrolü için vakum uygulanması ve oluşan buharın yoğuşturulması (Liu vd., 2008).



Şekil 3.6 Liyafilizasyon

İlk olarak, sıvı formülasyonlar düşük sıcaklıklara soğutulur ve materyalde bulunan su tamamen donmuş hale gelir. Ardından, düşük basınç altında, donmuş çözücü ısıtılır ve katı halden doğrudan buhar fazına geçirilir, yani süblimasyon kurutma süreci (birincil kurutma). Bunu takiben, donmamış çözücünün uzaklaştırılması için bir desorpsiyon işlemi (ikincil kurutma) yapılır. Bu nedenle, dondurma ve kurutma, dondurarak kurutma süreci sırasında gerçekleşen iki eşit derecede önemli ana süreçtir (Waghmare vd., 2020).

Gıda ürünlerinin kurutulmasında tercih edilen başlıca üç dondurarak kurutma yöntemi bulunmaktadır: (1) vakum altında gerçekleştirilen liyofilizasyon, (2) atmosfer basıncında uygulanan dondurarak kurutma ve (3) püskürtmeli dondurarak kurutma yöntemi.

3.1.1.1 Vakumlu Dondurarak Kurutma

Vakumlu dondurarak kurutma 1960'lı yıllardan bu yana gıda endüstrisinde kurutulmuş gıda ürünleri üretmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Son yıllarda, bu teknik meyveler, sebzeler, kahve, süt, et ve diğer yüksek değerli gıda ürünlerini kurutmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında kullanılmakta olup, dondurularak kurutulmuş gıda ürünleri üretmek için en iyi işlem tekniği olarak kabul edilir. Bu yöntem, dokuda, tatta, yeniden hidratasyon yeteneğinde, besinsel ve kimyasal bileşimlerde minimal değişikliklerle yüksek kaliteli kurutulmuş gıda ürünleri elde edilmesini sağlar (Ma et al., 2018).

3.1.1.2 Atmosferik Dondurarak Kurutma

Atmosferik dondurarak kurutma (AFD), dondurarak kurutma ve konvektif kurutmanın birleşimidir. Dondurarak kurutma, dondurulmuş örneklerin süblimasyonunu sağlamak için yüksek vakum uygulandığı için enerji kullanımına ek maliyet getirir. Ancak, dondurulmuş örnekler yüksek vakum sağlamadan doğal olarak kurutulabilir. Bu nedenle, atmosferik dondurarak kurutmanın temel konsepti, enerji tüketimini vakumlu dondurarak kurutmaya kıyasla azaltmak ve aynı zamanda yüksek ürün kalitesini korumaktır. Bu işlem, kurutma odasında su buharının kısmi basıncı, dondurulmuş örneğin su buharı basıncından düşük olduğunda uygulanabilir. Bu durumu elde etmek için soğuk ve kuru gazın dondurulmuş örnek üzerinden dolaşması gerekir (Waghmare vd., 2020).

3.1.1.3 Sprey Dondurarak Kurutma

Sprey dondurarak kurutma (SFD), sprey kurutma ile dondurarak kurutmanın temel avantajlarını bir araya getiren ve toz formda ürün elde etmeyi amaçlayan bir kurutma yöntemidir. Bu yöntem genellikle üç aşamadan oluşur: (1) atomizasyon aşamasında, çözelti veya süspansiyon çok küçük damlacıklara ayrılarak yüzey/kütle oranı artırılır; (2) damlacıkların dondurulması, atomize edilen sıvı, çoğunlukla sıvı azot gibi kriyojenik bir ortamla temas ederek hızlı şekilde donma sürecine girer; (3) dondurarak kurutma aşaması, düşük basınç ve sıcaklık koşullarında donmuş parçacıkların içindeki suyun süblimleşerek uzaklaştırılmasıyla tamamlanır. (Waghmare vd., 2020). Şekil 3.7'de Yıldız Teknik Üniversitesi Genel Gıda Analiz Laboratuvarı altyapısında bulunan sprey dondurarak kurutucu resmi paylaşılmıştır.



Şekil 3.7 Sprey Dondurarak Kurutucu

3.1.1.4 Dondurarak Kurutma Modifikasyonları

Dondurarak kurutmanın eksikliklerini aşmak için, zaman ve maliyet açısından etkili hale getirebilmek için dondurarak kurutma sürecini birleştiren veya modifiye eden yeni teknikler gereklidir.

Kızılötesi (IR) radyasyonu, elektromanyetik dalgalar biçiminde ısıl enerji sağlar ve görünür ışık ve mikrodalgalarla sınır oluşturan elektromanyetik aralığın bir bölümünü çevreler. IR, geleneksel ısıtmaya kıyasla daha yüksek ısıl verimlilik ve hızlı ısınma hızı sağlar. Kızılötesi destekli dondurarak kurutma (IRAFD), kurutma süresini etkili bir şekilde azaltır ve kurutulmuş ürünlerin özelliklerini değiştirir. Dondurarak kurutma süresi, dondurarak kurutma işlemi sırasında gerekli olan zamandır, oysa toplam kurutma süresi IRAFD sürecinin gerektirdiği zamandır. IR kurutma, daha yüksek bir kurutma hızı sağlar ve diğer kurutma tekniklerine kıyasla nihai üründe daha iyi renk korur ve dondurarak kurutma öncesinde bir ön dehidratasyon tekniği olarak kullanılabilir (Krishnamurthy vd., 2008; Ciurzyńska ve Lenart, 2011).

Mikrodalga (MW) kurutma, ürün içinde doğrudan ısı üreten elektromanyetik dalgalara dayanan bir tekniktir (Lenaerts vd., 2018). Mikrodalga radyasyonu, 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır. Mikrodalga, ısıyı gıda ürününün içinde ürettiği için hızlı bir iç ısınma sağlar. Mikrodalga ısınma, dondurarak kurutma (MFD) ile birleştirildiğinde, mikrodalga enerjisi buzu kolayca penetre eder ve bu da geleneksel dondurarak kurutmaya kıyasla kurutma süresini yaklaşık %50–75 oranında azaltır (Fan vd., 2012).

Ultrasonik dalgalar, 2×10^4 ile 1×10^9 Hz arasındaki frekansa sahip ses dalgalarını ifade eder. Ultrasonik mekanizma, kavitasyona dayanır. Kavitasyon, ultrasonik iletimde pozitif ve negatif alternatif bir döngüden kaynaklanır. Bu döngü, bir mikrobalonun oluşumuna ve sıkışmasına neden olur. Mikrobalon, frekansı ultrasonik frekansla eşleştiğinde patlar ve yüksek enerji ve basınç salınımı yapar. Bu, hücre zarını bozar ve mikro yapı hasarına yol açar (Cao vd., 2018).

Pulsed elektrik alanı (PEF) tedavisi, yüksek voltajlı kısa elektrik darbelerinin ürün üzerine uygulanmasına dayanır ve bu ürün iki elektrot arasında yerleştirilir. Polarizasyon, hücre zarının geçirgenleşmesine neden olur ve ısı ve madde transfer süreçlerini hızlandırır. PEF, gıda dokularında istenmeyen değişiklikler yaratmadan mikropların termal olmayan sterilizasyonunu sağlar. Pulsed elektrik alanı (PEF), hücre zarlarının geçirgenliğini artırarak biyolojik hücrelerin termal olmayan sterilizasyonuna neden olur (Toepfl ve Knorr, 2008).

3.1.2 Infrared Kurutma

IR (kızılötesi) radyasyon, kurutma süresini kısaltması, yüksek enerji transfer oranı ve geleneksel sıcak hava kurutma yöntemlerine kıyasla üstün ürün kalitesi sağlaması gibi avantajları nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Kızılötesi (IR) kurutma, enerji verimliliği, yerden tasarruf sağlayan kompakt yapısı ve hijyenik çalışma koşulları ile öne çıkan modern bir kurutma yöntemidir. IR radyasyonu, nem içeren bir malzemenin yüzeyine ulaştığında, belirli bir derinliğe kadar nüfuz eder ve bu enerji, malzeme içerisinde ısıya dönüşerek kurutma sürecini başlatır (Khir ve ark., 2014).

Materyalin iç katmanlarındaki sıcaklık artışı, buhar basıncının yükselmesine neden olur ve bu da nemin yüzeye doğru hareketini ve çevredeki havalandırma havası tarafından uzaklaştırılmasını teşvik eder. IR enerjisi, bir ısıtma elemanından ürüne, çevredeki havayı ısıtmadan aktarılır ve bu da ürünün iç katmanlarında havadan daha yüksek bir sıcaklık oluşmasına yol açar. Kurutma sürecinin ilk döneminde, örnek yüzeyi çok ince bir su tabakasıyla kaplı olduğunda, IR son derece enerji verimli olup kurutma sürecini hızlandırır (Kowalski & Mierzwa, 2011). Kurutma, hem radyasyon hem de konveksiyon fenomenleri yoluyla iç katmanlardan dış katmanlara doğru gerçekleşir. IR, önemli bir nem içeriğine sahip ürünler için özellikle geçerlidir, çünkü uzun dalga boylu radyasyon (3 μm'nin üzerinde) neredeyse tamamen nem tarafından emilir; çünkü suyun emilim bantları ile IR dalga boyları arasında çok iyi bir korelasyon vardır, oysa kuru materyal bu tür radyasyona oldukça geçirgendir (Efremov, 2014).

IR kurutucularının (Şekil 3.8) başlıca avantajları şunlardır:

- Alternatif bir enerji kaynağı kullanırlar ve daha yüksek ısıtma hızına sahiptirler.
- Elektrikli IR için elektrik enerjisinin ısıya dönüşüm verimliliği yüksektir.
- Sadece nesneyi ısıtırlar, çevreyi ısıtmazlar; seçici ısıtma mümkündür; ve yüzeydeki ıslak ürünü homojen şekilde ısıtmak için kolayca alt bölgelere ayrılabilirler.
- İşlem koşullarındaki değişimlere çok hızlı yanıt verirler ve hızlı başlatma ve kapama prosedürlerine sahiptirler.

• Daha küçük boyutları sayesinde yerden tasarruf sağlarlar; ayrıca kolayca kontrol edilebilirler ve daha düşük sermaye ve kurulum maliyetlerine sahiptirler.

IR kurutucularının potansiyel sınırlamaları ise şunlardır:

• Sıcaklık hassasiyeti olan malzemelerle çalışmak zordur.

• Düşük penetrasyon derinliklerine sahiptirler ve bazı kaplamalarda deri oluşumu ve kabarcıklanmalara yol açabilirler.

• IR, temelde bir yüzey olayı olduğundan, daha kalın kaplamaların kurutulması zordur.

• Genellikle doğrudan ölçeklendirilemezler; herhangi bir tasarım değişikliği onaylanmadan önce laboratuvar ve pilot denemeleri gereklidir (Efremov, 2014).



Şekil 3.8 Infrared kurutucu

3.1.2.1 Radyatör Türleri

600–2500K yüzey sıcaklıkları aralığında kızılötesi (IR) ışıma ısı kaynakları; elektrikle ısıtılan metal kılıflı çubuklar, kuvars tüpler ve kuvars lambalar ile seramik kaplı gaz brülörleri ve katalitik IR brülörlerdir. Kızılötesi ısıtıcılar, geniş bir uygulama yelpazesi için uygundur ve büyük miktarda enerjiyi hızlı ve yüksek

verimlilikle iletmek için tasarlanmıştır. IR radyasyonunun belirli dalga boyu, ısıtma sürecinin etkinliği üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Isıtılacak malzemeye en iyi şekilde uyum sağlayan IR ısıtıcıları, diğer teknolojilere göre %50'ye kadar enerji tasarrufu sağlayabilir. Doğru ışınım kaynağı seçildiğinde, kurutma için gereken IR enerji ihtiyacı %50'ye kadar azaltılabilir (Efremov, 2014).

IR yayıcılar farklı dalga boylarında belirgin şekilde farklı ışınımlar yayar. Ürün için doğru yayıcının seçilmesi önemlidir, çünkü dalga boyu ısıtma sürecini önemli ölçüde etkiler (Efremov, 2014).

- Kısa dalga boyu ışınım, bazı katı malzemelerin derinliklerine nüfuz edebilir ve homojen bir ısıtma sağlayabilir.
- Orta dalga boyu ışınım ise çoğunlukla dış yüzey tarafından emilir ve yüzeyi ısıtır.
- Orta dalga boyu ışınım, birçok plastik, cam ve özellikle su tarafından iyi bir şekilde emilir ve doğrudan ısıya dönüştürülür.

- **Elektrikli Radyatörler**

Elektrikli IR radyatörler, tüm IR uygulama aralığında kurutma işlemlerinde en sık kullanılanlardır. Geniş bir güç çıkışı aralığına sahiptirler ve geniş bir yüzey alanı (çalışma genişliği) boyunca eşit bir yayılım gösterirler. Ayrıca, elektrikli IR radyatörler basit tasarıma ve temiz bir kurulum avantajına sahiptir. Kısa dalga boyu yayıcılar, tek veya çift tüplü ısıtıcılar olup, yüksek sıcaklıklarda hızlı başlatma ve kapatma gerektiren işlemler için uygundur. Tam işletim verimliliğine saniyeler içinde ulaşabilirler (Efremov, 2014).

IR kaynağının hangi işlem için en uygun olduğu sorusu, suyun spektral emilimine göre belirlenmelidir. Düşük sıcaklıklarda yayıcı kırmızı renkte görünürken, sıcaklık arttıkça sarı ve beyaz renklere dönüşmektedir (Efremov, 2014).

- **Gazla Isıtılan Kızılötesi (IR) Radyatörler**

Gazla ısıtılan IR radyatörler genellikle orta ve uzun dalga boyu IR aralıklarında kullanılır, ancak kısa dalga boyları için de uygulanabilirler. Göreceli olarak küçük bireysel brülörler kullanılarak gazla ısıtılan radyatör tasarımında yüksek esneklik sağlanabilir. Bu, değişken çalışma genişliklerine uygunluk sağlar. Tipik gazla ısıtılan radyatörler, delikli bir plaka (metal veya seramik) içerir (Mujumdar, 2007).

3.1.2.2 Kızılötesi Kurutmanın Diğer Kurutma Türleri ile Birleşimi

Kızılötesi (IR) ışınım neredeyse her zaman ısı transferi süreçlerinde bulunur ve diğer ışınım teknolojilerine benzer şekilde bir yüzey işlemi olarak düşünülebilir. Genellikle IR kaynağı yüksek sıcaklıktadır (500–3000°C) ve konveksiyon yoluyla ısı transferi de gerçekleşir. Ancak, IR ışınımının nüfuz etme yeteneği zayıftır, bu nedenle ısı etkisi esas olarak cismin yüzeyinde meydana gelir ve ısı iletimi gövde boyunca iletim (konduksiyon) veya konveksiyon yoluyla ilerler.

IR ve konvektif kurutma, IR ve sıcak hava ile yapılan konvektif kurutma en yaygın kombinasyonlardan biridir. Bu kombinasyon, bitkiler (Paakkonen vd., 1999), kağıt, meyve derisi ve polivinil alkol filmi (Putranto vd., 2010) gibi malzemelerin kurutma kapasitesini artırmak için kullanılır.

IR ve mikrodalga kurutma kombinasyonunda Baysal ve ark. (2003), mikrodalga ve IR kurutmanın havuç ve sarımsak üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu yöntemlerin konvansiyonel sıcak hava kurutmasına göre daha hızlı kuruma sağladığını belirtmiştir.

IR ve dondurarak kurutma kombinasyonunda Shih ve ark. (2008), IR ve dondurarak kurutma (SIRFD) yöntemini kullanarak çilek dilimlerinin kurutulmasını incelemiş ve IR ön kurutmasının renk, büzülme ve gevreklik açısından daha iyi sonuçlar verdiğini bulmuştur.

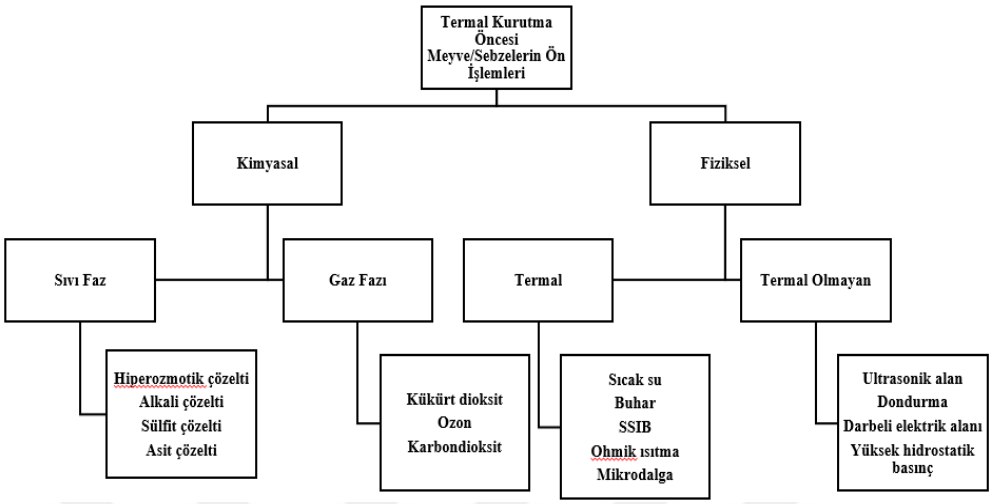
Pan ve ark. (2008b), muz dilimlerinin IR ile ön kurutulduğunda daha hızlı kuruduğunu ve IR'nin sıcaklık arttıkça kurutma hızını önemli ölçüde artırdığını belirlemiştir.

Bu yönetemlerle birlikte IR ve vakum kurutma, IR ve akışkan yatak kurutma, IR ve ısı pompası kurutma, IR ve titreşimli turutma, IR ve aşırı ısıtılmış buhar kurutma, IR, mikrodalga ve sıcak hava kurutma gibi çalışmalarda mevcuttur.

3.2 Kurutma Çalışmalarında Ön İşlem Kullanımı

Meyve ve sebzeler, kurutma öncesinde genellikle fiziksel veya kimyasal ön işlemlere tabi tutulur. Bu ön işlemler, kurutma süresini kısaltır, enerji tüketimini azaltır ve ürün kalitesini korur. Kurutma hızı ve ürün kalitesi büyük ölçüde kurutma öncesinde yapılan ön işlemlerle ilişkilidir. Genel olarak, tarımsal ürünlerin kurutulması zaman ve enerji açısından maliyetli bir süreçtir ve ön işlemler bu süreci

daha verimli hale getirmektedir (Deng vd., 2019). Literatürde sıkca geçen meyve ve sebzelerde kullanılan ön işleme yöntemleri Şekil 3.9'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.9 Meyve veya sebzelerin ön işleme yöntemleri

3.2.1 Boyut Küçültme ve Püre Haline Getirme

Gıda kurutmadan önce uygulanan en eski ön işlem yöntemlerinden biri boyut küçültmedir. Bu işlem, dondurarak kurutma prosesi öncesinde gıdanın küçük parçalara kesilmesini veya püre haline getirilmesini içerir. Bu tür işlemler, kurutulacak malzemenin yüzey alanını artırarak kurutma hızını hızlandırır ve aynı zamanda kurutulmuş ürünlerin özelliklerini değiştirir (Dziki, 2020).

3.2.2 Blanşlama

Blanşlama, sebze ve meyvelerin işlenmesinden önce sıklıkla uygulanan temel bir ön işlem tekniğidir. Bu yöntemin başlıca amaçları; enzimatik faaliyetleri durdurarak bozulmayı önlemek, kurutma süresini azaltmak ve elde edilen kurutulmuş ürünün kalite özelliklerini iyileştirmektir. Ayrıca, blanşlama, gıda maddelerindeki pestisit kalıntılarını ve toksik maddeleri ortadan kaldırmaya yardımcı olur ve mikrobiyolojik saflığı artırır. Birçok blanşlama yöntemi mevcuttur, örneğin sıcak su blanşlaması, buhar blanşlaması, süper ısınmış buhar impinge blanşlaması, mikrodalga blanşlaması, ohmik blanşlama, kızılötesi blanşlama ve vakumlu buhar puls blanşlaması. Sıcak su blanşlaması, gıda işleme sırasında uygulanan en basit ve en yaygın yöntemdir (Dziki, 2020).

3.2.3 Osmotik Dehidrasyon

Osmotik dehidrasyon, meyve ve sebzelerin yoğunlaştırılmasında etkili bir yöntem olup, yüksek ozmotik basınca sahip şeker veya tuz çözeltilerine bütün ya da parçalara ayrılmış katı gıdaların daldırılmasıyla uygulanır. Bu süreçte, iki yönlü bir kütle transferi meydana gelir: gıdadaki suyun çözeltinin içine geçişi ve çözeltideki çözünmüş maddelerin gıda dokusuna difüzyonu. Bu karşılıklı geçişler, su ve çözünmüş madde aktiviteleri arasındaki gradyanlar nedeniyle hücre zarları boyunca gerçekleşir. İdeal bir osmotik durumda, yarı geçirgen bir zar yalnızca çözücü moleküller tarafından geçilebilir olurken, çözünmüş madde moleküllerini geçirmez. Meyve ve sebzelerde ise hücre duvarı zarları, büyüme ve hücre içindeki turgor basıncının etkisiyle esneyip genişleyebilen biyolojik birimlerdir. Başlıca parankima hücrelerinden oluşan bu zarlar, çözücü moleküllerinin serbestçe geçmesine izin verir; ancak çözünmüş madde moleküllerinin de belirli bir oranda geçmesine olanak tanır. Bu tür zarlar, yarı geçirgen yerine farklı derecede geçirgen olarak sınıflandırılabilir (Torreggiani, 1993).

Doğal gıda sistemlerinde, zar boyunca az da olsa çözünmüş madde (şekerler, organik asitler, mineraller, tuzlar vb.) sızıntısı meydana gelir. Miktar olarak önemsiz olsa da organoleptik (duyusal) veya besinsel kalite açısından önemli olabilir. Bu nedenle, yalnızca kurutma işlemlerine kıyasla, osmotik dehidrasyon gıdada iki yönlü bir dönüşüm gerçekleştirir: su içeriğinin azalması ve çözünmüş madde emilimi. Bu durum, gıdanın ağırlığında bir azalmaya neden olabilir (Torreggiani, 1993).

3.2.4 Alkali Çözelti

Alkali daldırma ön işlemi, genellikle dış kabuğu hidrofobik balmumu ile kaplı olan bütün meyveler için kullanılır. Bu balmumu tabakası büyük ölçüde oleanolik asitten oluşur ve kurutma sırasında nemin buharlaşma hızının düşük olmasına neden olarak kurutma sürecine engel teşkil eder. Meyvelerin etil veya metil esterler, sodyum hidroksit ve potasyum karbonat içeren alkali emülsiyonlara birkaç dakika süreyle daldırılması, balmumu tabakasını çözebilir veya epikütiküler balmumu tabakasındaki mikro yapıyı bozabilir. Bu işlem, kabuğun nem geçirgenliğini artırarak nemin yayılımını kolaylaştırır ve dehidrasyon hızını yükseltir (Deng vd., 2019).

3.2.5 Sülfürleme

Sülfürleme (veya sülfürizasyon), kurutma işlemleri sırasında renk değişimlerini azaltmak ve hem işleme hem de depolama sürecinde kalite kayıplarını önlemek amacıyla gıda endüstrisinde yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir (Miranda ve ark., 2009). Bu işlemde genellikle kükürt dioksit (SO_2) gazı ya da suda çözünebilen potasyum metabisülfit ($K_2S_2O_5$), sodyum metabisülfit ($Na_2S_2O_5$) ve sodyum hidrojen sülfit gibi sülfür bileşikleri tercih edilir. SO_2 meyve dokusu tarafından absorbe edildiğinde, başlıca bisülfit iyonlarına dönüşerek etkin hale gelir. Düşük düzeyde kullanılan bu sülfür bileşikleri, hem enzimatik hem de enzimatik olmayan kararmayı ve mikrobiyal gelişimi büyük ölçüde sınırlandırır. Sülfür, sülfür iyonları ile kinonlar arasındaki reaksiyon yoluyla PPO'yu inaktive eder ve böylece PPO aktivitesini engeller ve oksijeni tükenmesini sağlar. Ayrıca, işlem sırasında askorbik asidin kaybını önleyerek ve lipitleri, esansiyel yağları ve karotenoidleri oksidatif bozulmadan koruyarak antioksidan olarak görev yapar ve renk, bozulmayı engelleme ve belirli besin öğelerinin korunması gibi avantajlara sahiptir (Deng vd., 2019).

3.2.6 Pulsed Electric Field (PEF)

Pulsatör elektrik alanı (PEF) teknolojisi, gıda yapısına kısa süreli ve yüksek voltajlı elektrik darbelerinin uygulanmasını içerir. Temel etkisi elektroporasyon olup, bu süreçte hücre zarında kalıcı veya geçici gözenekler oluşarak kütle transferini kolaylaştırır. PEF, bileşiklerin ekstraksiyonunun artırılması, ısısız pastörizasyonun gerçekleştirilmesi ve kurutma verimliliğinin iyileştirilmesi gibi çeşitli alanlarda incelenmiştir. Elektroporasyonun derecesini ölçmek için sıklıkla hücre parçalanma indeksi (Z-indeksi) kullanılır; bu indeks, uygulanan tedavi yoğunluğu, darbe sayısı ve yapısal özelliklere bağlı olarak değişir. Ayrıca PEF, osmotik dehidrasyon, vakumlu kurutma, konvektif kurutma ve dondurarak kurutma gibi farklı kurutma yöntemlerinde ön işlem olarak uygulanmıştır (Llavata vd., 2020).

3.2.7 Ultrason

Ultrasonun kurutma sürecindeki uygulaması, meyve, sebze, et ve balıkların kuruma hızını artırabilir. Kuruma süresini azaltır ve ürün kalitesini koruyarak ısı ve kütle transfer hızını artırır. Ultrasonikasyon, geleneksel kurutma sürecine etkili bir alternatif olarak kanıtlanmıştır. Su, "sünger etkisi" fenomeni ile kolayca

uzaklaştırılır, bu da suyun iç kısmından yüzeye doğru difüzyonunu geliştirir. Hücre içi ve hücre dışı kavitasyon nedeniyle yeni mikrokanallar oluşur. Ayrıca, ultrason, ürün yüzeyi ile hava arasındaki arayüzde hava turbulansı yaratarak nemi yüzeyden uzaklaştırır. Kurutmada ultrason uygulaması üzerine yapılan araştırmalar, düşük hava hızı ve düşük sıcaklıklarda kuruma süresinin yaklaşık %20–30 oranında azaldığını göstermektedir. Konvektif kurutmanın yanı sıra, ultrason, geleneksel yöntemlere göre kuruma hızını artırmak için dondurularak kurutma ve vakumla kurutma için de uygulanabilir. Ultrason uygulaması, 0 ile 200 W arasında 15–30 dakika süreyle uygulandığında, hücre yapıları içinde mikrokanallar oluşturabilir, bu da doku hasarına yol açar (Bhargava vd., 2021).

3.2.8 Yüksek Hidrostatik Basınç

Yüksek hidrostatik basınç (HHP) uygulaması, gıda koruma için termal olmayan bir yöntemdir. Bu süreçte, su basınç ortamı olarak kullanılır ve basınç 100–1000 MPa aralığındadır. HHP ile yapılan gıda işleme, mikroorganizmaların inaktive olmasına ve enzim aktivitesinin değişmesine yol açar. Ayrıca, bu süreç gıdanın şeklini korur ve kimyasal katkı maddelerinin kullanımını gerektirmez. HHP, gıdanın raf ömrünü de artırır ve ısıya duyarlı ürünler için önerilir. HHP ön tedavisi sırasında, malzemedeki hücreler yok edilir ve hücrelerin bakımında kritik öneme sahip metabolik reaksiyonlar engellenir. Bu değişiklikler ayrıca kuruma hızını ve kurutulmuş ürünlerin özelliklerini etkiler. HHP uygulaması, hücre zarının geçirgenliğini artırır, difüzyonu geliştirir ve kuruma sırasında kütle transferini artırır. Şu ana kadar, yalnızca birkaç çalışma, HHP'nin FD (donmuş kurutma) sürecine olan etkisini analiz etmiştir (Dziki, 2020).

3.2.9 Asidik Ön İşlem

Asidik ön tedavi, enzimlerin inaktive edilmesi, pigment stabilitesinin artırılması ve tarım ürünlerinin dokusunun değiştirilmesi yoluyla ürün kalitesini iyileştirmek için sıklıkla kullanılır. Polifenol oksidazının optimum pH değeri 6.0–7.0 aralığındadır, bu nedenle ortam pH'ı 3.0'a düşürüldüğünde polifenol oksidaz aktivitesi inhibe edilebilir ve bunun sonucunda enzimatik kahverengileşme oranı azalır (Langdon, 1987). Ayrıca, betalainler ve antosiyaninler gibi pigmentlerin stabilitesi asidik koşullarda artırılabilir (Ngamwonglumlert vd., 2016) ve ürünün dokusu, asidik

çözeltiler kullanılarak korunabilir, çünkü bu çözeltiler bağlama özelliklerine sahiptir (Hiranvarachat vd., 2011).

3.2.10 Etanol

Ethanol uygulaması, basit ama verimli bir ön işlem tekniğidir ve kuruma yoğunlaştırılması amacıyla da araştırılmıştır. Etanol ön tedavisinin etkisi, hücre duvarı bileşenlerini çözme yeteneğine dayanır, bu da yapısal değişikliklere neden olur ve geçirgenliğini artırır Ayrıca, etanol ile gıda maddesinin su içeriği arasındaki yüzey gerilmesi gradyanı ile ilgili olan Marangoni etkisi, su taşımayı önemli ölçüde artırabilir.

Mikro yapısal analizler, etanol ile ön tedavi edilen örneklerin daha kompakt, ince duvarlı hücrelere sahip olduğunu ve hücre içi hava kaybı olduğunu göstermiştir. Bu yapısal değişiklikler, gıda matrisindeki suyun daha fazla çıkmasına olanak sağlar. Etanol ile ön tedavi edilen örneklerde kuruma hızındaki artış, etanolün su ile etkileşimi sonucu daha yüksek buhar basınca sahip bir karışım oluşmasıyla açıklanabilir (Llavata vd., 2020).

3.2.11 Ozon

Ozon (O_3), yüksek oksidasyon gücü (2.07 mV) sayesinde etkili bir dezenfektan olarak kullanılır ve genellikle dezenfeksiyon sonrası oksijene dönüşerek kalıntı bırakmaz. Düşük konsantrasyonlarda ve kısa temas sürelerinde uygulandığında, ozon Gram-pozitif ve Gram-negatif bakteriler, sporlar, mantarlar ve virüslerin kapsidleri gibi çeşitli mikroorganizmaların hücre zarlarını etkili bir şekilde inaktive eder (Deng vd., 2019).

4
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Hammadde Temini ve Örnek Hazırlanması

Hint inciri Eylül 2024'te ve ejder meyvesi Ekim 2024' te Türkiye/İstanbul'daki bir zincir marketten temin edilmiştir. Deney setlerinin sayısının fazla olması sebebiyle meyveler her çalışmadan önce yeniden alınmış ve her seferinde nem tayini yapılarak veriler kaydedilmiştir. Numuneler taze olarak temin edildiği için dolapta bekletilmemiştir. Her iki meyvenin dış kabuğu çalışmalara başlamadan önce soyulmuş ve meyveler yarım ay şeklinde dilimlenerek Radwag AS 220.R2 dijital hassas terazi (Radwag, Radom, Polonya) ile tartılmıştır. Beyaz ejder meyvesi numuneleri infrared kurtuma için 5,00 ± 0,5 gr, dondurarak kurutma işlemi için 6,00 ± 0,5 gr; hint inciri meyvesi infrared için 6,00 ± 1,00 gr dondurarak kurutma işlemi için 6,00 ± 0,5 gr ağırlığında olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar için hazırlanan ejder meyvesi ve hint inciri örnekleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.1 Deneysel çalışmalar için hazırlanan ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri

4.2 Ön İşlem Uygulamaları ve Nem Tayini

Kurutma deneyleri numune nem oranları %10 altına düşene dek sürdürülmüştür. Bu sebeple deneyler öncesinde, tüm numuneler nem tayinine tabi tutulmuştur. Nem

tayini işlemi KH-45 sıcak hava etüvü (Kenton, Guangzhou, Çin) kullanılarak 105°C'de 4 saatte gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi sırasında meydana gelen renk ve doku değişiklikleri gibi istenmeyen değişiklikleri engelleyerek kurutma süresini azaltmaya yardımcı olan bazı yenilikçi ön işlemler, kurutulmuş ürünlerin kalitesini artırabilir (Rashid vd., 2019). Bu çalışamada ejder meyvesi için %1'lik askorbik asit ile blanşlama ve hint inciri meyvesi için elma suyu konstantresi ile 30 sn balanşlama ön işlemi uygulanmıştır. Blanşlama için, örnekler oda sıcaklığındaki 100 mL askorbik asit ve 100 mL elma suyu konsantresi içeren beherlere daldırılarak 30 saniye (30 sn) süreyle işlem görmüştür. Dondurarak kurutma prosesinde kullanılan ön işlemli numune örnekleri Şekil 4.2'de ve İnfrared kurutma prosesinde kullanılan ön işlem uygulanmış numune örnekleri Şekil 4.3'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.2 Dondurarak kurutma öncesi ön işlem uygulanmış ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri



(a) (b)

Şekil 4.3 IR öncesi ön işlem uygulanmış ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri

4.3 Kurutma İşlemleri

Dondurarak kurutma işlemi Labart LFD-10N (ART Laborteknik, İstanbul, Türkiye) model dondurarak kurutma cihazında gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi

sırasında her saat düzenli olarak tartım yapılmış ve elde edilen veriler doğrultusunda kurutma eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.5'te dondurarak kurutma işleminde kullanılan ön işlem uygulanmamış hint inciri ve ejder meyvesi numunelerinin fotoğrafları verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.4 Ön işlemsiz ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri

Kızılötesi kurutma (IR) işlemlerinde MA 50.R (Radwag, Radom, Polonya) nem analiz cihazı kullanılmıştır. Kurutma işlemleri 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Numune ağırlıkları her 15 dakikada bir kayıt altına alınmıştır. Hint inciri meyvesinin temini zor olduğu için 60°C ve 50°C ön işlemli IR çalışmaları tamamlanamamıştır.

Şekil 4.5'de infrared kurutma çalışmalarında kullanılacak olan ön işlemsiz hint inciri ve ejder meyvesi numunelerinin fotoğrafları verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.5 Ön işlemsiz ejder meyvesi (a) ve hint inciri (b) örnekleri

4.4 Kurutma Kinetiği Hesaplamaları

İnce tabaka kurutma işleminde nem transferi temel olarak difüzyon mekanizmalarına dayanır ve bu süreç Fick'in ikinci difüzyon yasası ile modellenebilir. Kurutma işlemi sırasında numunenin nem içeriğinde belirgin bir

azalma gözlemlenir. Bu değişimi analiz etmek ve kurutma kinetiğini belirlemek için aşağıdaki denklemler (4.1), (4.2) ve (4.3) kullanılarak nem oranı ve kuruma hızı hesaplanmıştır (Doymaz, 2017; Akpınar ve Bicer, 2008).

$$N = m_{su} / m_{km} \tag{4.1}$$

$$KH = (N_{t+dt} - N_t) / d_t \tag{4.2}$$

$$NO = (N_t - N_e)/(N_i - N_e) \tag{4.3}$$

4.5 Matematiksel Modelleme ve İstatistiksel Veri Analizi

Egzotik meyvelerin kurutulmasıyla elde edilen veriler, Statistica 8.0 (StatSoft, Tulsa, OK, ABD) programı kullanılarak regresyon analiziyle değerlendirilmiştir. Kullanılan modellerin uygunluğunu belirlemek için öncelikli olarak regresyon katsayısı (R^2) dikkate alınmaktadır. Regresyon katsayısı, yani determinasyon katsayısı (R^2), bir modelin bağımlı değişkeni ne kadar iyi açıkladığını gösteren istatistiksel bir ölçüttür. R^2 değeri, modelin bağımsız değişkenleri kullanarak bağımlı değişken üzerindeki değişimleri ne kadar iyi tahmin ettiğini belirler. R^2 değeri, modelin deneysel verilere ne kadar uyum sağladığını gösteren önemli bir kriterdir. Bu değer 1'e ne kadar yakınsa modelin o kadar uygun olduğu kabul edilir. R^2 değeri, aşağıdaki denklem (4.4) ile hesaplanmaktadır:

$R^2 = 1 \rightarrow$ Model, bağımlı değişkeni %100 açıklıyor.

$R^2 = 0 \rightarrow$ Model, bağımlı değişkenle hiçbir ilişki kuramıyor.

$0 < R^2 < 1 \rightarrow$ Model, bağımlı değişkeni kısmen açıklıyor. R^2 değeri 1'e ne kadar yakınsa model o kadar güvenilir kabul edilir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(NO_{deneysel,i} - NO_{hesaplanan,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(NO_{deneysel,i} - (1/n)\sum_{i=1}^{N} NO_{hesaplanan,i})^2} \tag{4.4}$$

Burada:

$NO_{deneysel,i}$ deneysel olarak ölçülen nem oranı,

$NO_{hesaplanan,i}$ model tarafından hesaplanan nem oranı,

$NO_{deneysel}$ deneysel nem oranlarının ortalaması,

N: Toplam gözlem sayısıdır.

Ayrıca, modelin uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Ki-kare (χ^2) ve hata kareleri ortalaması karekökü (RMSE) değerleri de hesaplanmaktadır Ki-kare (χ^2) testi, deneysel ve tahmin edilen (model tarafından hesaplanan) değerler arasındaki farkı ölçen istatistiksel bir yöntemdir. Kurutma kinetiği analizlerinde, deneysel nem oranı ile model tarafından hesaplanan nem oranı arasındaki farkı değerlendirmek için kullanılır.Ki-kare değeri, modelin deneysel verilere ne kadar iyi uyum sağladığını belirlemek için hesaplanır. Düşük bir χ^2 değeri, modelin deneysel verilere daha iyi uyum sağladığını gösterir (4.5).

Bunun yanı sıra, RMSE (hata kareleri ortalaması karekökü), modelin tahmin ettiği değerler ile deneysel veriler arasındaki hata miktarını belirlemek için kullanılan bir başka önemli ölçüttür. Uygun bir model için RMSE değerinin de mümkün olduğunca düşük olması gereklidir. RMSE değeri, denklem (4.6) ile hesaplanmaktadır

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(NO(deneysel,_i) - NO(hesaplanan,_i)\right)^2}{(N-z)} \quad (4.5)$$

$$HKOK = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(NO_{hesaplanan,i} - NO_{deneysel,i}\right)^2\right)^{1/2} \quad (4.6)$$

4.6 Efektif nem difüzyon katsayısı *(D_{eff})*

Efektif nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) bir ürünün içindeki nemin difüzyonla hareketini tanımlayan bir parametredir ve kurutma işlemlerinde kütle transfer mekanizmasını anlamak için kullanılır. D_{eff}, özellikle gözenekli malzemelerde (meyve, sebze, gıda ürünleri vb.) suyun iç difüzyonla nasıl taşındığını belirlemede kritik bir rol oynar.

Nem taşınımı sürecine dair bilgi, gıda kurutma sürecinin anlaşılması ve doğru şekilde modellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Efektif nem difüzyon katsayısı, kurutma sürecinde içsel nem transfer mekanizmalarının karakterizasyonu için en önemli parametrelerden biridir. Fick denklemi, özellikle kurutmanın azalan hız evresinde, nem difüzyonunu kuruma hızlarıyla açıkça ilişkilendirebilir. Önceki çalışmalar, sabit nem difüzyon katsayısı varsayımı altında, farklı gıda

materyallerinin ortalama efektif nem difüzyon katsayılarını belirlemek için Fick modeli ve eğim yöntemiyle başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Chen vd., 2020).

Eğer kurutulan malzeme levha (slab) geometrisine sahipse, aşağıdaki denklem kullanılır (Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 Defft}{4L^2}\right) \quad (4.7)$$

Burada:

- MR: Boyutsuz nem oranı (Moisture Ratio),
- D_{eff}: Efektif nem difüzyon katsayısı (m^2/s),
- t: Kurutma süresi (saniye),
- L: Levha kalınlığının yarısı (metre).

Başka bir yöntem eğim yöntemi ile hesaplamadır. ln(MR) zamanla doğrusal hale getirilerek eğim yöntemiyle D_{eff} hesaplanabilir:

$$k = \frac{\pi^2 Deff}{4L^2} \quad (4.8)$$

Bu yöntemde deneysel verilerden ln(MR) vs. t grafiği çizilir ve eğim (k) hesaplanarak D_{eff} değeri bulunur (Tunde-Akintunde & Ogunlakin, 2011).

5
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Ön İşlem Uygulamaları ve Nem Tayini Sonuçları

Ejder meyvesi için kontrol numunelerinde başlangıç nem yüzdesi IR ve dondurarak kurutma için sırasıyla %84,59, %86,28 olarak belirlenmiştir. Blanşlama için, ejder meyvesi örnekleri oda sıcaklığındaki 100 mL askorbik asit içeren beherlere daldırılarak 30 saniye (30 sn) süreyle işlem görmüştür. 30 sn askorbik asit ön işlemli numuneler için IR kurutmada farklı sıcaklıklarda farklı numuneler kullanılmış ve 50 °C, 60 °C, 70 °C sıcaklıkları için nem yüzdeleri %84,91, %87,70, %84,08 olarak belirlenmiştir. Dondurarak kurutma prosesinde kullanılan ön işlemli ejder meyvesi numunesi için nem yüzdesi %85,26 olarak belirlenmiştir.

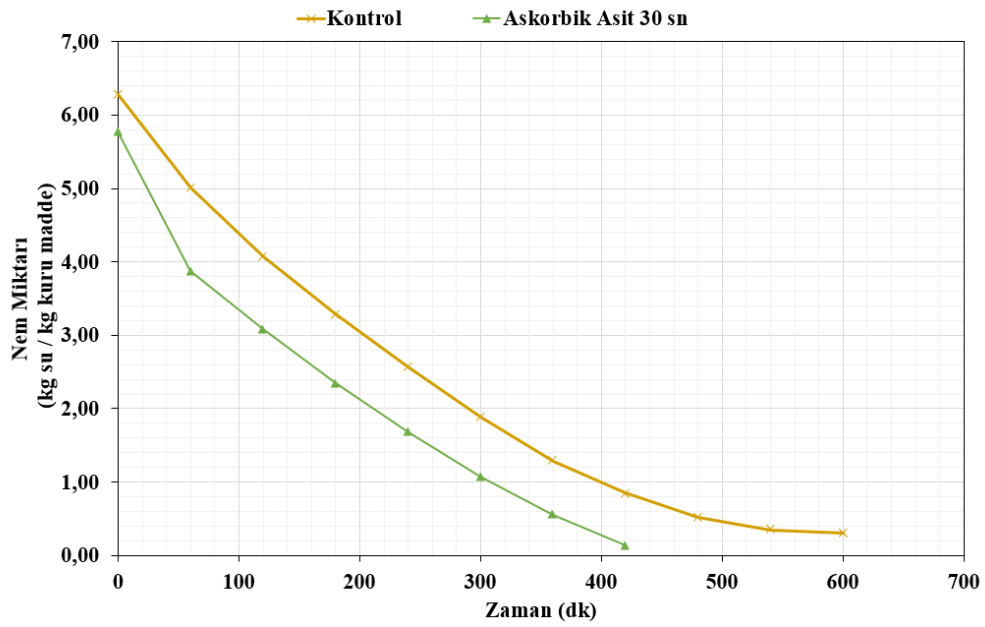
Hint inciri için kontrol numunelerinde başlangıç nem yüzdesi IR ve dondurarak kurutma için sırasıyla %74,10, %84,18 olarak belirlenmiştir. Blanşlama için, hint inciri örnekleri oda sıcaklığındaki 100 mL elma suyu konsantresi içeren beherlere daldırılarak 30 saniye (30 sn) süreyle işlem görmüştür. 30 sn elma suyu ön işlemli numuneler için IR kurutmada 70°C sıcaklık için nem yüzdesi %79,21 ve dondurarak kurutma çalışması için ise %83,14 olarak belirlenmiştir. Deneyler öncesinde gerçekleştirilen nem tayini sonuçları Tablo 5.1 ’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Farklı bölgelerden elde edilen ejder meyvesi türlerinin kimyasal bileşimleri

Kurutma Tipi	Ön İşlem	Başlangıç Nem Yüzdesi (%)	
		Ejder Meyvesi	Hint İnciri
IR 50 °C	-	84,59	74,10
	Askorbik Asit 30 sn	84,91	-
IR 60 °C	-	84,59	74,10
	Askorbik Asit 30 sn	87,70	-
IR 70 °C	-	84,59	74,10
	Askorbik Asit 30 sn	84,08	-
	Elma Suyu 30 sn	-	79,21
Liyazfilizatör	-	86,28	84,18
	Askorbik Asit 30 sn	85,26	-
	Elma Suyu 30 sn	-	83,14

5.2 Ejder Meyvesi Dondurarak Kurutma Sonuçları

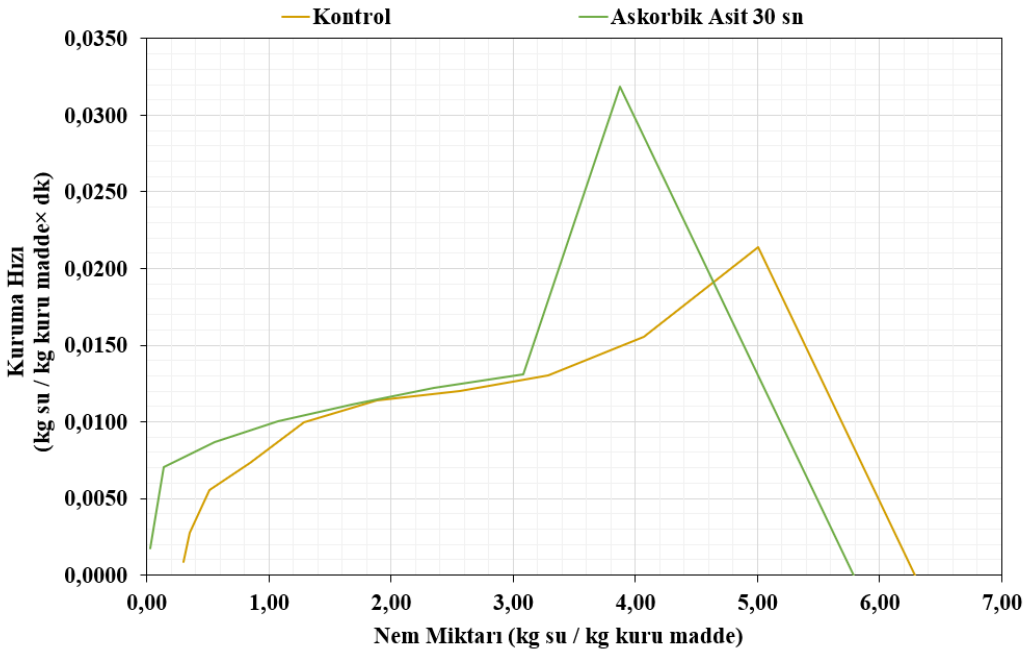
Kontrol ejder meyvesi numunesi liyafilizatörde 10 saatte ve 30 sn askorbik asit ön işlemli ejder meyvesi numuneleri 8 saatte kurutulmuştur. Bir saatlik periyot ile alınan numune ağırlıkları kaydedilmiş Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde ön işlemli ejder meyvesi numunelerinin kontrol numunelerine oranla daha hızlı kuruduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.1 Ejder Meyvesi numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği

Şekil 5.2 'te ejder meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği verilmiştir. Kurutma sürecinin başında tüm numuneler için hızla artan kurutma hızları gözlemlenmiştir. Bu artış periyodunun sonunda kontrol ejder meyvesi numunesi için en yüksek 0,021 kg su / kg kuru madde, 30 sn askorbik asit ön işlem uygulanmış numune için ise en yüksek 0,032 kg su / kg kuru madde olarak gözlemlenmiştir.

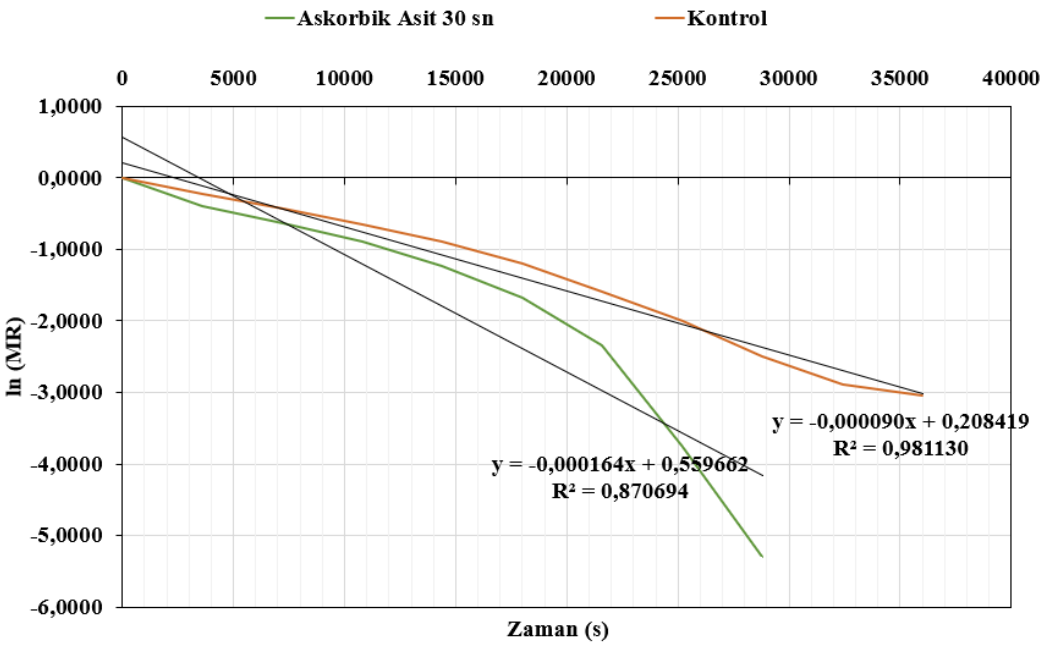
Kurutma hızları, maksimum seviyeye ulaştıktan sonra hızla düşmeye başlamıştır. Bu kurutma hızları sırasıyla 0,0008 kg su/ kg kuru madde ve 0,0018 kg su/ kg kuru madde değerlerine kadar düşmüştür. 30 sn askorbik asit ön işlemli numune, kurutma sürecinin belirli bir noktasına kadar daha yüksek bir kurutma hızına sahip olup, belirli bir nem içeriğinden sonra hızla azalmıştır. Kontrol numunesi ise daha dengeli bir düşüş göstermiştir. Sonuçlar, ön işlem uygulanmasının ejder meyvesinin kuruma hızını artırdığını ve kurutma sürecini hızlandırdığını göstermektedir. Özellikle belirli bir nem miktarında ön işlem uygulanmış numunenin daha yüksek bir kurutma hızı gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.2 Ejder meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği

Efektif nem difüzyon katsayısının hesaplanmasında Fick'in ikinci difüzyon yasası kullanılmıştır. Bu doğrultuda, Şekil 5.3'te kurutma sürelerine karşılık gelen nem miktarlarının logaritmaları alınarak grafik oluşturulmuştur**.** Elde edilen grafiklerdeki eğim değerleri, denklemde yerine konularak efektif nem difüzyon katsayıları hesaplanmıştır.

Kontrol ejder meyvesi örnekleri için D_{eff} değeri $3{,}65\times10^{-9}$ m^2/s olarak ve 30 sn askorbik asit ön işlemli ejder meyvesi numunesi için $1{,}66\times10^{-8}$ m^2/s olarak bulunmuştur.

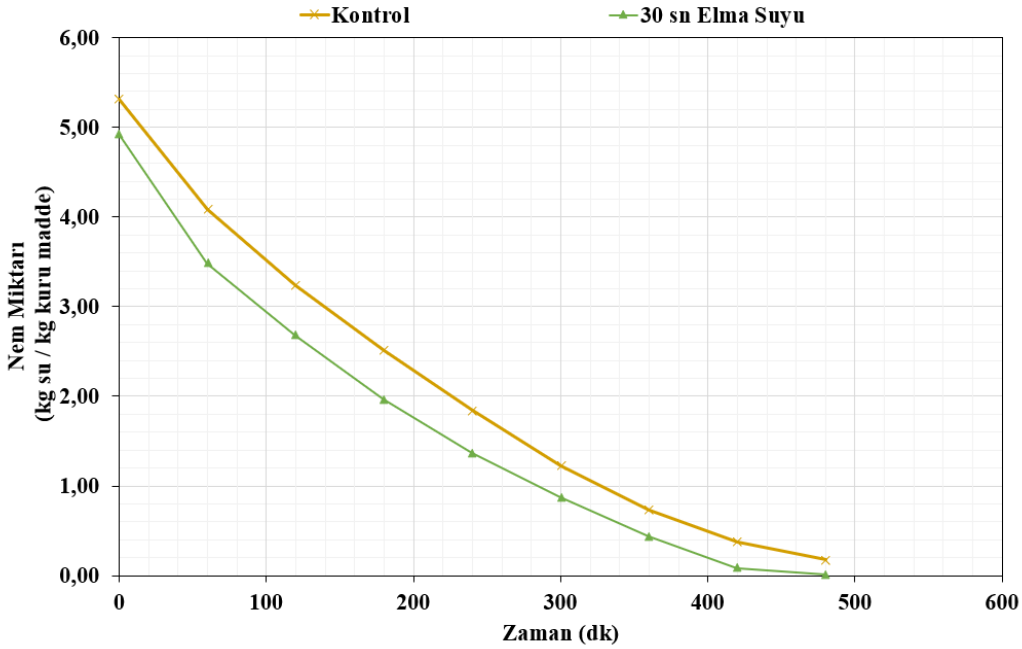


Şekil 5.3 Ejder meyvesi numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri

5.3 Hint İnciri Meyvesi Dondurarak Kurutma Sonuçları

Kontrol hint inciri meyvesi ve 30 sn elma suyu ön işlemli hint inciri numuneleri liyafilizatörde 8 saatte kurutulmuştur. Bir saatlik periyot ile alınan numune ağırlıkları kaydedilmiş ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

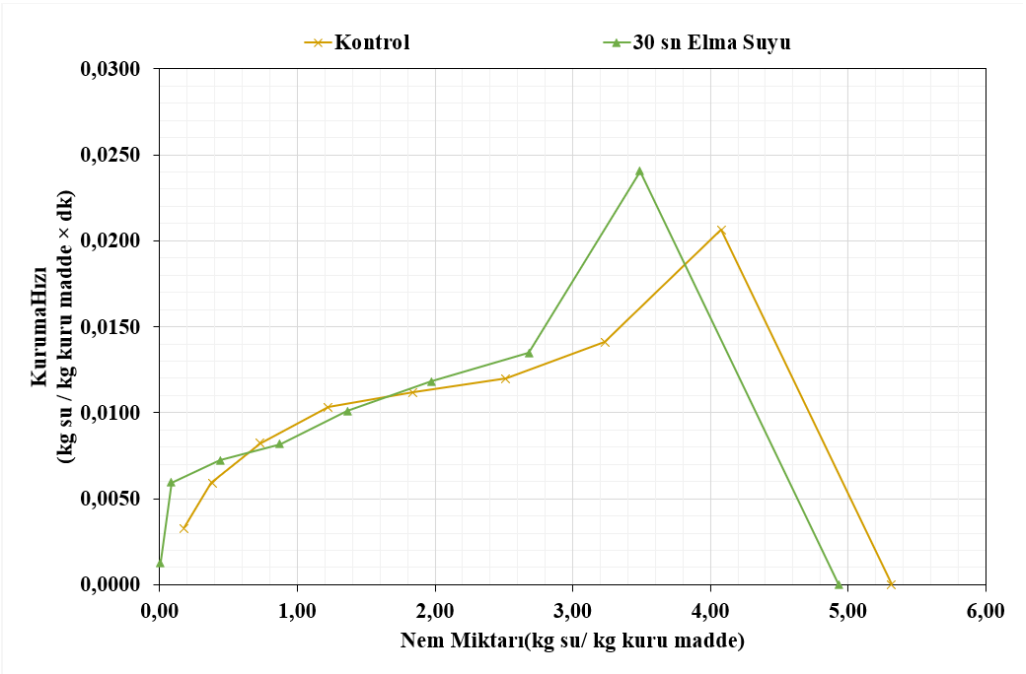
Şekil 5.5 'te hint inciri meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği verilmiştir. Kurutma sürecinin başında tüm numuneler için artan kurutma hızları gözlemlenmiştir. Bu artış periyodunun sonunda kontrol hint inciri numunesi için en yüksek 0,0206 kg su / kg kuru madde, 30 sn elma suyu ön işlem uygulanmış numune için ise en yüksek 0,0241 kg su / kg kuru madde olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4 Hint İnciri numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği

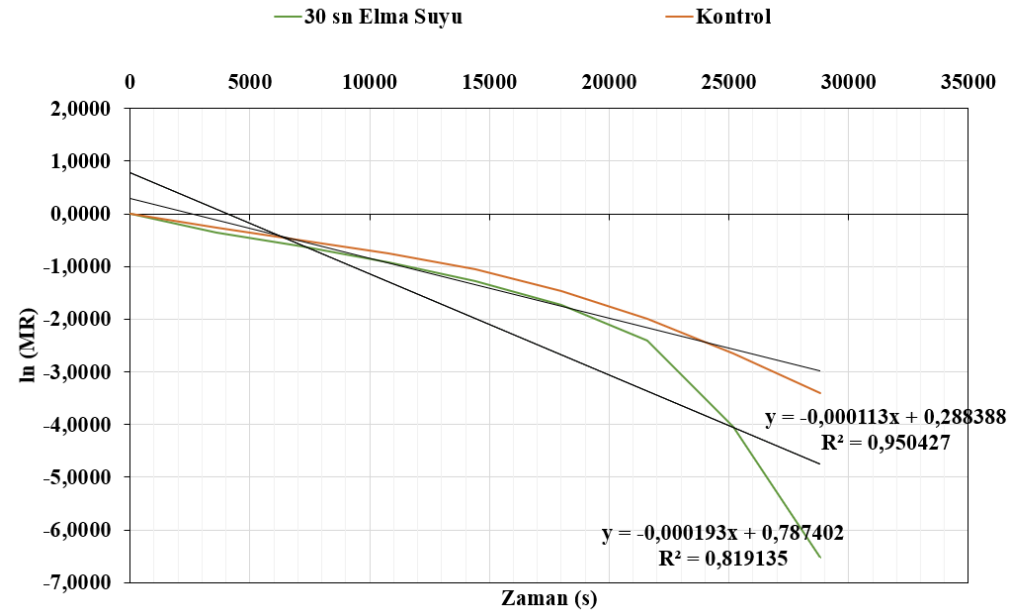
Kurutma hızları, maksimum seviyeye ulaştıktan sonra düşmeye başlamıştır. Bu kurutma hızları sırasıyla 0,0033 kg su/ kg kuru madde ve 0,0013 kg su/ kg kuru madde değerlerine kadar düşmüştür. 30 sn elma suyu ön işlem uygulanmış numune, kurutma sürecinin belirli bir noktasına kadar daha yüksek bir kurutma hızına sahip olup, belirli bir nem içeriğinden sonra hızla azalmıştır. Kontrol numunesi ise belirli bir nem içeriğine kadar daha dengeli bir düşüş göstermiş, belirli bir süre sabit sayılabilecek bir kurutma hızında kalıp devamında hızlıca düşmüştür.

Efektif nem difüzyon katsayısının hesaplanmasında Fick'in ikinci difüzyon yasası kullanılmıştır. Bu doğrultuda, Şekil 5.6 grafiğinde kurutma sürelerine karşılık gelen nem miktarlarının logaritmaları alınarak grafik oluşturulmuştur. Elde edilen grafiklerdeki eğim değerleri, denklemde yerine konularak efektif nem difüzyon katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 5.5 Hint İnciri numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği

Kontrol hint inciri örnekleri için D_{eff} değeri $5{,}03\times10^{-9}$ m^2/s olarak ve 30 sn elma suyu ön işlemli numune için $1{,}95\times10^{-9}$ m^2/s olarak bulunmuştur.

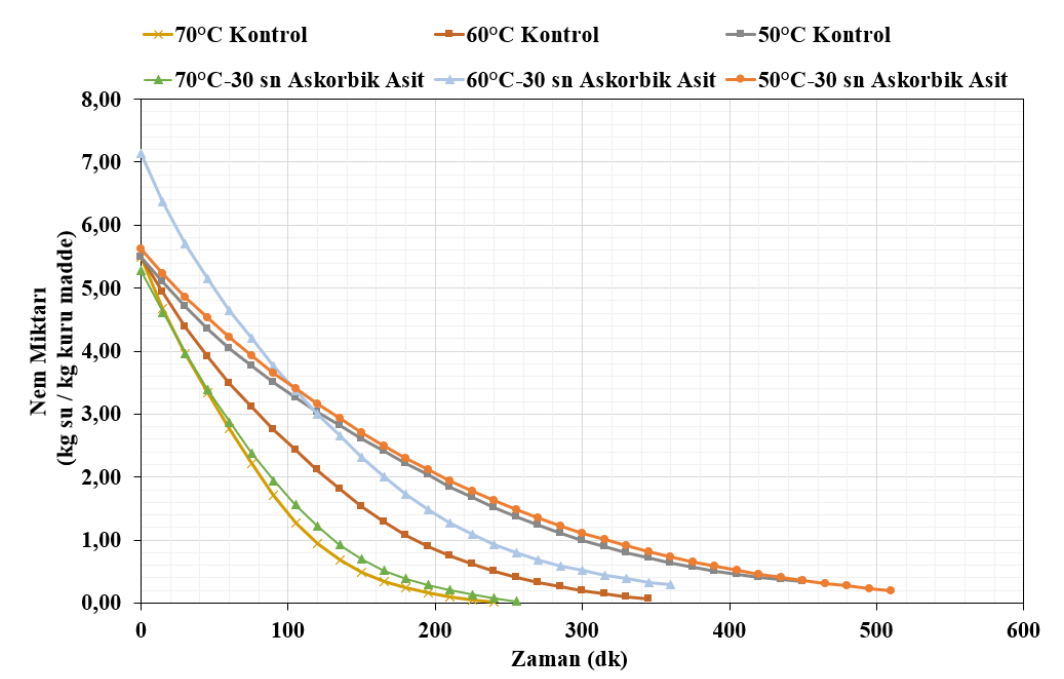


Şekil 5.6 Hint İnciri numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri

5.4 Ejder Meyvesi IR kurutma Sonuçları

Ejder meyvesi kontrol numuneleri IR kurutucuda 50°C, 60°C ve 70°C için 450, 345 ve 240 dakikada kurutulmuştur. 30 sn askorbik asit ön işlemli ejder meyvesi numuneleri 50°C, 60°C ve 70°C ise sırasıyla 510, 360 ve 255 dakikada kurutulmuştur. 15 dakikalık periyotlar ile alınan numune ağırlıkları kaydedilmiş ve Şekil 5.7'te gösterilmiştir.

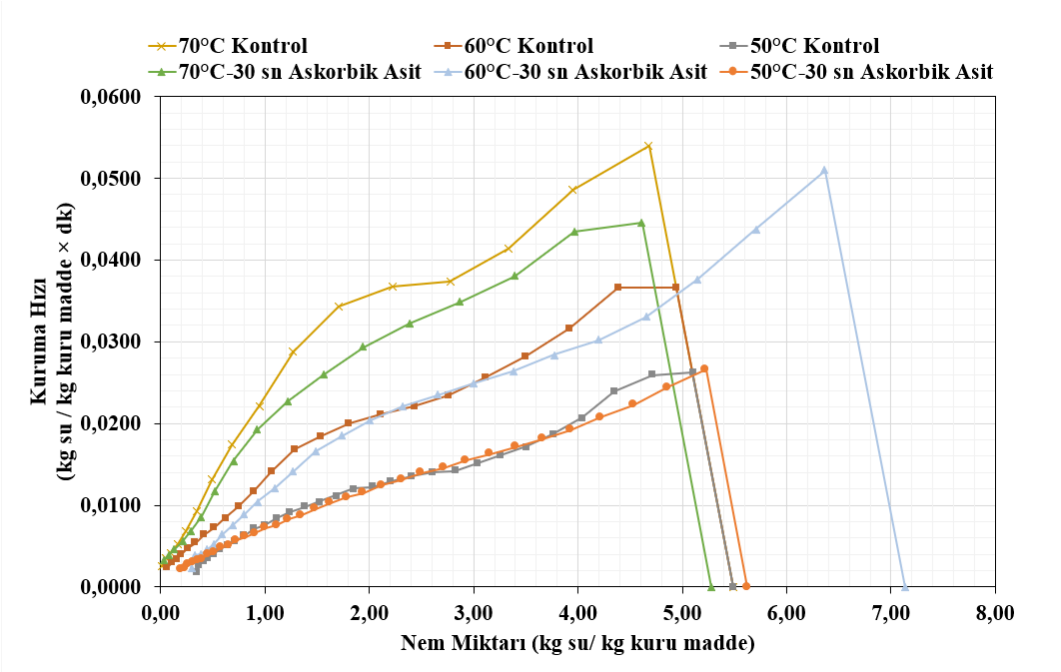
Şekil 5.8 'te ejder meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği verilmiştir. Kurutma sürecinin başında tüm numuneler için hızla artan kurutma hızları gözlemlenmiştir. Bu artış periyodunun sonunda kontrol numuneleri için en yüksek kuruma hızı 70°C için 0,0540 kg su / kg kuru madde, 60°C için 0,0367 kg su / kg kuru madde ve 50°C için 0,0263 kg su / kg kuru madde olacak şekilde gözlemlenmiştir. 30 sn askorbik asit ön işlemli ejder meyvesi numuneleri için kuruma hızları 70°C için 0,0446 kg su / kg kuru madde, 60°C için 0,0510 kg su / kg kuru madde ve 50°C için 0,0266 kg su / kg kuru madde olacak şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 5.7 Ejder Meyvesi numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği

Bu kurutma hızları sırasıyla kontrol numunleri için 0,0026 kg su/ kg kuru madde, 0,0024 kg su/ kg kuru madde, 0,0023 kg su/ kg kuru madde ve 30 sn askorbik asit

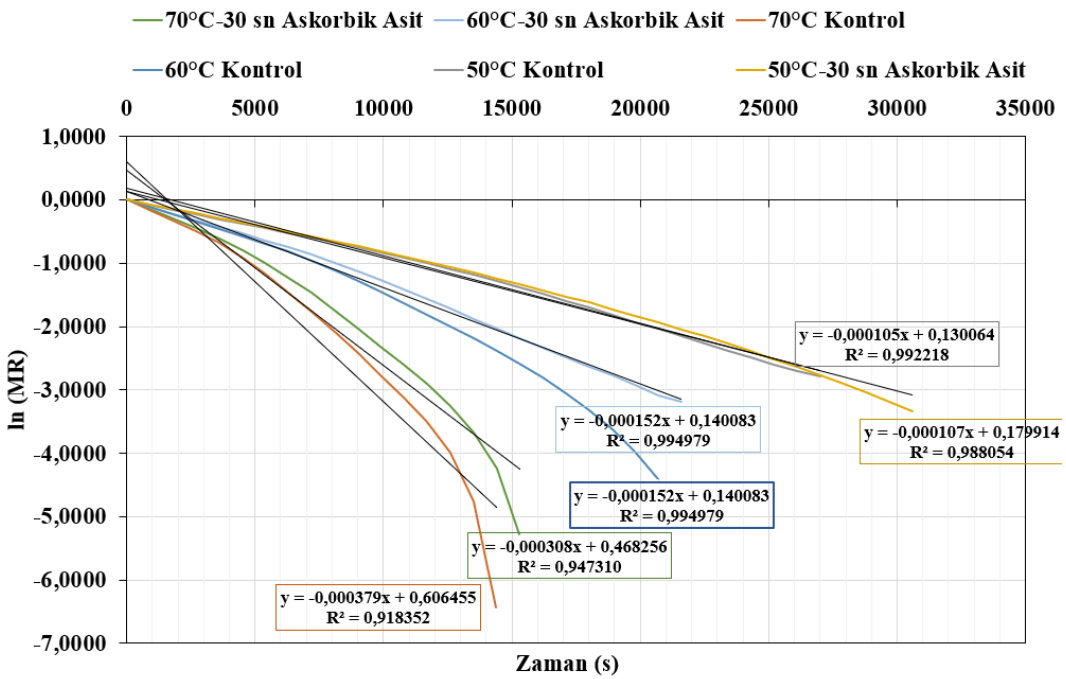
ön işlemli numuneler için 0,0033 kg su/ kg kuru madde, 0,0023 kg su/ kg kuru madde ve 0,0022 kg su/ kg kuru madde değerlerine kadar düşmüştür.



Şekil 5.8 Ejder meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği

Efektif nem difüzyon katsayısının hesaplanmasında Fick'in ikinci difüzyon yasası kullanılmıştır. Bu doğrultuda, Şekil 5.9'da kurutma sürelerine karşılık gelen nem miktarlarının logaritmaları alınarak grafik oluşturulmuştur. Elde edilen grafiklerdeki eğim değerleri, denklemde yerine konularak efektif nem difüzyon katsayıları hesaplanmıştır.

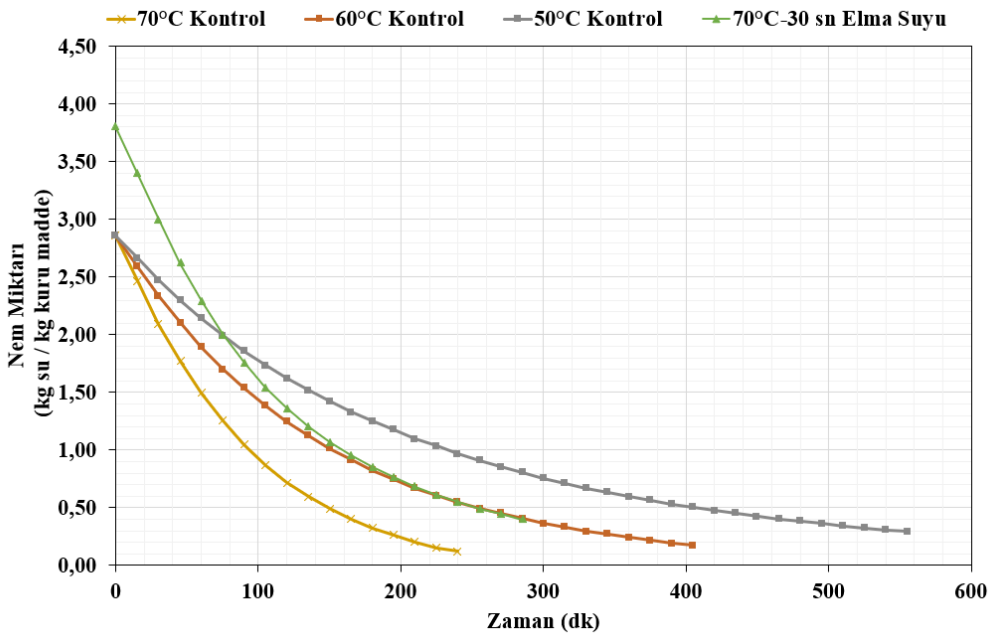
Ejder meyvesi kontrl örnekleri için D_{eff} değerleri 70°C, 60°C, 50°C için sırasıyla $3{,}84\times10^{-9}$ m^2/s, $2{,}03\times10^{-9}$ m^2/s, $2{,}65 \times 10^{-10}$ m^2/s olarak bulunmuştur. 30 sn askorbik asit ön işlemli örnekler için D_{eff} değerleri 70°C, 60°C, 50°C için sırasıyla $7{,}81 \times 10^{-10}$ m^2/s, $3{,}85 \times 10^{-10}$ m^2/s ve $2{,}70 \times 10^{-10}$ m^2/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9 Ejder meyvesi numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri

5.5 Hint İnciri Meyvesi IR kurutma Sonuçları

Hint inciri kontrol numuneleri IR kurutucuda 50°C, 60°C ve 70°C için 555, 405 ve 240 dakikada kurutulmuştur. 30 sn elma suyu işlemli örnek 70°C sıcaklıkta 315 dakikada kurutulmuştur. 15 dakikalık periyot ile alınan numune ağırlıkları kaydedilmiş ve aşağıdaki grafikte 5.10'da gösterilmiştir.



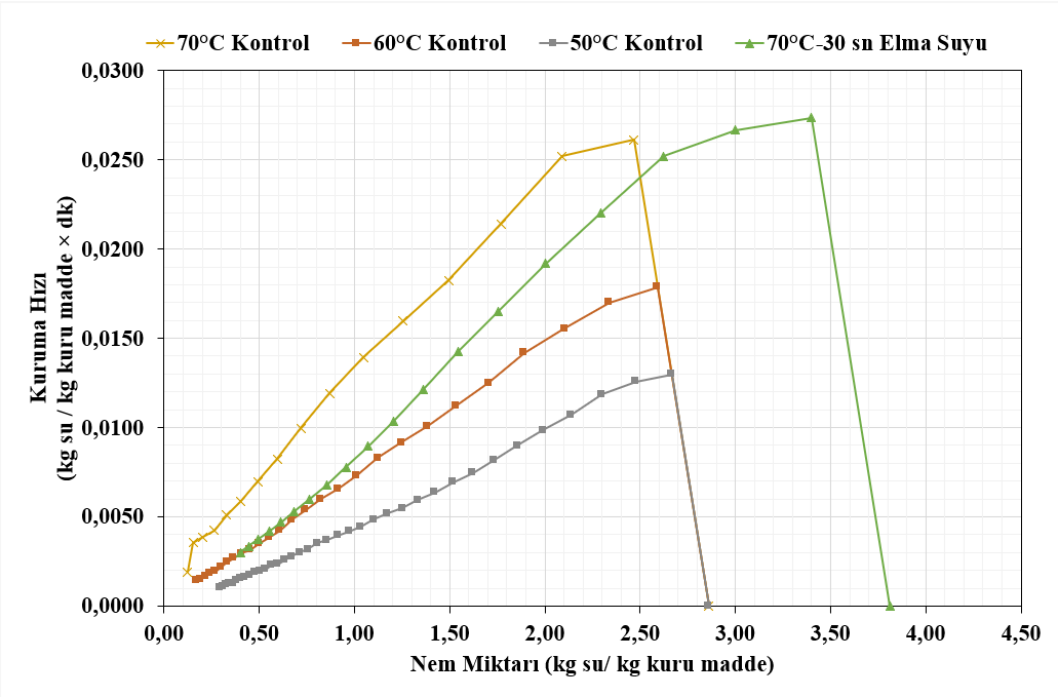
Şekil 5.10 Hint İnciri numuneleri için zamana bağlı nem miktarı grafiği

Şekil 5.11 'te hint inciri meyvesi numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği verilmiştir. Kurutma sürecinin başında tüm numuneler için hızla artan kurutma hızları gözlemlenmiştir.

Bu artış periyodunun sonunda hint inciri meyvesi kontrol numuneleri için en yüksek kuruma hızı 70°C için 0,0261 kg su / kg kuru madde, 60°C için 0,0179 kg su / kg kuru madde ve 50°C için 0,0130 kg su / kg kuru madde olacak şekilde gözlemlenmiştir. 30 sn elma suyu ön işlemli hint inciri meyvesi numuneleri için kuruma hızları 70°C için 0,0273 kg su / kg kuru madde olacak şekilde gözlemlenmiştir.

Bu kurutma hızları sırasıyla kontrol numunleri için 0,0019 kg su/ kg kuru madde, 0,0014 kg su/ kg kuru madde, 0,0010 kg su/ kg kuru madde ve30 sn elma suyu ön işlemli numuneler için 0,0020 kg su/ kg kuru madde değerlerine kadar düşmüştür.

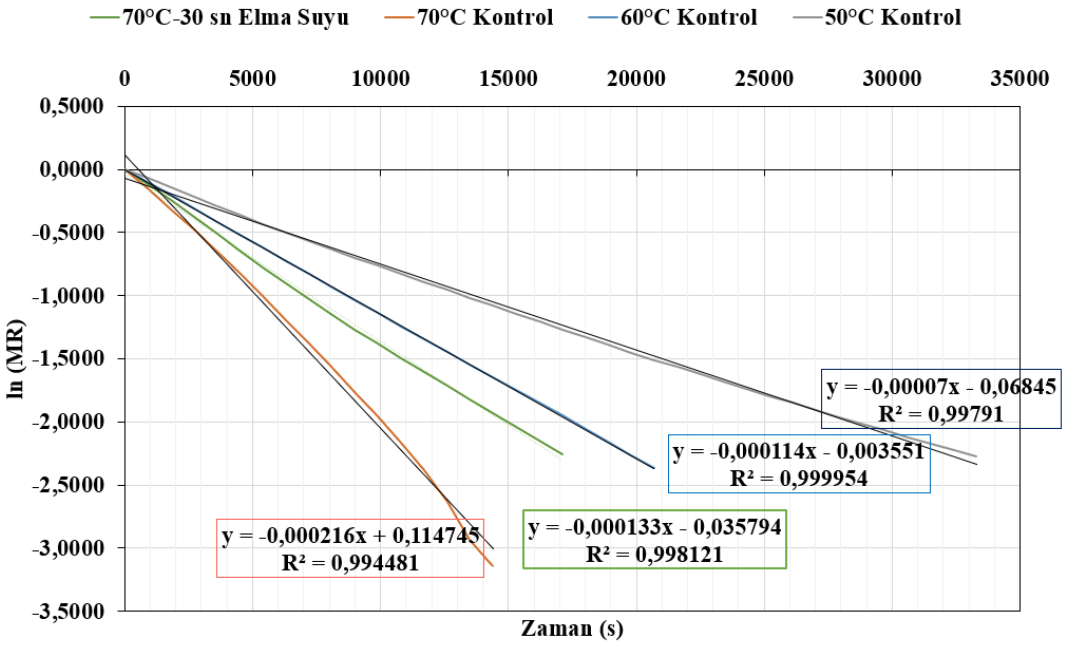
Kurutma hızları, maksimum seviyeye ulaştıktan sonra hızla düşmeye başlamıştır. Ön işlem uygulanmış numune, kurutma sürecinin belirli bir noktasına kadar daha yüksek bir kurutma hızına sahip olup, belirli bir nem içeriğinden sonra hızla azalmıştır. Kontrol numunesi ise daha dengeli bir düşüş göstermiştir.



Şekil 5.11 Hint İnciri numuneleri için nem miktarı – kuruma hızı grafiği

Efektif nem difüzyon katsayısının hesaplanmasında Fick'in ikinci difüzyon yasası kullanılmıştır. Bu doğrultuda, Şekil 5.12'te kurutma sürelerine karşılık gelen nem miktarlarının logaritmaları alınarak grafik oluşturulmuştur**.** Elde edilen grafiklerdeki eğim değerleri, denklemde yerine konularak efektif nem difüzyon katsayıları hesaplanmıştır.

Hint inciri control numuneleri için D_{eff} değerleri 70°C, 60°C, 50°C için sırasıyla $5{,}48 \times 10^{-10}$ m²/s, $2{,}90 \times 10^{-10}$ m²/s, $2{,}56 \times 10^{-10}$ m²/s olarak bulunmuştur. 70°C -30 sn elma suyu işlemli örnek için D_{eff} değeri $3{,}28 \times 10^{-10}$ m²/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.12 Hint İnciri numunelerine ait efektif nem difüzyon eğrileri

5.6 Dondurarak Kurutma Modelleri ve Veri Analizi Sonuçları

Farklı matematiksel modeller kullanılarak yapılan analizler sonucunda, ejder meyvesinin kontrol ve 30 sn askorbik asit ön işlemli numuneleri için en uygun kurutma modelleri belirlenmiştir. İki terimli üstel, Henderson, Jena ve Das, Lewis, Aghbashlo, Logaritmik, Midilli ve Küçük, Page, Peleg, Verma, Wang, Weibull ve Alibas modelleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen R^2, χ^2 ve RMSE değerleri karşılaştırılmıştır.

Liyafilizatörde kurutulan ejder meyvesi kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında İki terimli üstel, Jena ve Das, Aghbashlo, modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri İki terimli üstel modeli için 0,996510 / 0,000524 / 0,018263, Jena ve Das modeli için 0,992920 / 0,001063 / 0,026013 ve Aghbashlo, modeli için 0,998687 / 0,000153 / 0,011201 olarak bulunmuştur.

30 sn askorbik asit ön işlemli numuneler için uygulanan modeller arasında Jena ve Das, Weibull ve Aghbashlo, modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Jena ve Das modeli için 0,982983 / 0,002999 / 0,040818, Weibull

modeli için 0,984091 / 0,002003 / 0,039466 ve Aghbashlo, modeli için 0,988441 / 0,001455 / 0,033642 olarak bulunmuştur.

Liyafilizatörde kurutulan hint inciri kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında Weibull, İki terimli üstel ve Aghbashlo modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Weibull modeli için 0,993313 / 0,000847 / 0,025661, İki terimli üstel modeli için 0,993853 / 0,001090 / 0,024603 ve Aghbashlo modeli için 0,998122 / 0,000238 / 0,013598 olarak bulunmuştur.

30 sn elma suyu ön işlemli numune için uygulanan modeller arasında İki terimli üstel, Jena ve Das ve Aghbashlo, modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri İki terimli üstel modeli için 0,990911 / 0,001681 / 0,030556, Jena ve Das modeli için 0,987521 / 0,002308 / 0,035805 ve Aghbashlo modeli için 0,994959 / 0,000666 / 0,022755 olarak bulunmuştur.

Liyafilizatörde kurutulan numunelerine ait matematiksel modeller ve ilgili veriler Tablo 5.2'da verilmiştir.

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**	
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**	**Elma Suyu 30 sn**
İki Terimli Üstel	a	-37,4659		-53,4081	-44,8817
	b	-0,0001		-0,0001	-0,0002
	k_0	38,4526		54,3953	45,8681
	k_1	-0,0001		-0,0001	-0,0002

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**	
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**	**Elma Suyu 30 sn**
	R^2	0,996510		0,993853	0,990911
	χ^2	0,000524		0,001090	0,001681
	RMSE	0,018263		0,024603	0,030556
Henderson	a	1,033110	1,000386	1,030737	1,017928
	k	0,000072	0,000095	0,000082	0,000097
	R^2	0,987689	0,982554	0,983568	0,984631
	χ^2	0,001438	0,002196	0,002081	0,002030
	RMSE	0,034303	0,041329	0,040228	0,039735
Jena ve Das	a	1,121526	0,631952	1,289779	0,536390
	k	0,000089	0,000102	0,000104	0,000116
	b	0,002526	0,000843	0,002858	0,002263
	c	-0,124956	0,449414	-0,263349	0,614997
	R^2	0,992920	0,982983	0,989624	0,987521

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**	
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**	**Elma Suyu 30 sn**
Lewis	χ^2	0,001063	0,002999	0,001839	0,002308
	RMSE	0,026013	0,040818	0,031966	0,035805
	k	0,000069	0,000095	0,000080	0,000095
	R^2	0,986046	0,982554	0,982021	0,984159
	χ^2	0,001467	0,001922	0,001992	0,001831
	RMSE	0,036519	0,041330	0,042079	0,040340
Aghbashlo	k_1	0,000054	0,000079	0,000059	0,000074
	k_2	-0,000012	-0,000012	-0,000016	-0,000015
	R^2	0,998687	0,988441	0,998122	0,994959
	χ^2	0,000153	0,001455	0,000238	0,000666
	RMSE	0,011201	0,033642	0,013598	0,022755
Midilli ve Küçük	a		1,005513		
	k		0,005457		

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
	n		0,505176		
	b		-0,000014		
	R^2		0,996041		
	χ^2		0,000698		
	RMSE		0,019687		
Page	k	0,000009	0,000044	0,000009	
	n	1,212032	1,081620	1,233176	
	R^2	0,995871	0,984091	0,993313	
	χ^2	0,000482	0,002003	0,000847	
	RMSE	0,019865	0,039466	0,025661	
Verma	a	-6,20843	-0,001477	-1,13176	
	k	0,00012	0,100000	0,00002	
	g	0,00011	0,000095	0,00004	

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**	**Elma Suyu 30 sn**
	R^2	0,996309	0,982555	0,998885	
	χ^2	0,000485	0,002562	0,000165	
	RMSE	0,018782	0,041329	0,010476	
Weibull	b	14789,75	10668,49	12824,70	
	a	1,21	1,08	1,23	
	R^2	0,995871	0,984091	0,993313	
	χ^2	0,000482	0,002003	0,000847	
	RMSE	0,019865	0,039466	0,025661	
Alibas	a	0,213646	0,282389	6,24571	0,262756
	k	1,000000	1,000000	0,00003	1,000000
	n	1,000000	1,000000	0,95696	1,000000
	b	-0,000024	-0,000027	0,00005	-0,000028
	g	0,786354	0,717611	-5,24916	0,737244

Tablo 5.2 Dondurarak kurutma için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
	R^2	0,964243	0,986291	0,99925	0,979146
	χ^2	0,006266	0,003020	0,000166	0,004820
	RMSE	0,058460	0,036636	0,008594	0,046285

5.7 IR Kurutma Modelleri ve Veri Analizi Sonuçları

IR kurutucuda 70°C kurutulan ejder meyvesi kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında Aghbashlo, İki terimli üstel ve Verma modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Aghbashlo modeli için 0,999655 / 0,000038 / 0,005806, İki terimli üstel modeli için 0,997371 / 0,000336 / 0,016033 ve Verma modeli için 0,996876 / 0,000371 / 0,017478 olarak bulunmuştur.

30 sn askorbik asit ön işlemli numune için uygulanan modeller arasında Aghbashlo, İki terimli üstel ve Verma modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Aghbashlo modeli için 0,999852 / 0,000016 / 0,003770, İki terimli üstel modeli için 0,998277 / 0,000213 / 0,012869, ve Verma modeli için 0,997796 / 0,000254 / 0,014552 olarak bulunmuştur.

IR 70°C'de kurutulan hint inciri kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında Midilli ve Küçük, Aghbashlo, ve Jena ve Das modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Midilli ve Küçük modeli için 0,999983 / 0,000002 / 0,001189, Aghbashlo modeli için 0,999935 / 0,000006 / 0,002332, ve İki terimli üstel modeli 0,999415 / 0,000064 / 0,007015 olarak bulunmuştur.

30 sn elma suyu ön işlemli numune için uygulanan modeller arasında Verma, Aghbashlo ve Jena ve Das modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Verma modeli için 0,999657 / 0,000028 / 0,004986, Aghbashlo modeli için 0,999528 / 0,000037 / 0,005853, ve Jena ve Das modeli için 0,999080 / 0,000080 / 0,008172 olarak bulunmuştur.

İnfrared kurutucuda 70°C kurutulan numunelere ait matematiksel modeller ve ilgili veriler Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**	
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**	**Elma Suyu 30 sn**
İki Terimli Üstel	a	-27,8681	4,04177	-42,1673	-13,8100
	b	-0,0001	-0,00011	-0,0003	-0,0001
	k_0	28,8898	-3,02034	43,1666	14,8078
	k_1	-0,0001	-0,00009	-0,0003	-0,0001
	R^2	0,997371	0,998277	0,999880	0,998917
	χ^2	0,000336	0,000213	0,000013	0,000094
	RMSE	0,016033	0,012869	0,003164	0,008869
Henderson	a	1,056483	1,058343	1,024501	0,997816
	k	0,000236	0,000210	0,000195	0,000138

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
	R^2	0,986833	0,988018	0,998067	0,998917
	χ^2	0,001459	0,001296	0,000184	0,000086
	RMSE	0,035885	0,033937	0,012751	0,008869
Jena ve Das	a	0,889693	0,975030	0,278291	0,532908
	k	0,000309	0,000272	0,000219	0,000132
	b	0,006167	0,005649	0,002201	-0,000667
	c	0,100709	0,008587	1,274321	0,639084
	R^2	0,994448	0,995301	0,999415	0,999080
	χ^2	0,000710	0,000581	0,000064	0,000080
	RMSE	0,023302	0,021253	0,007015	0,008172
Lewis	k	0,000225	0,000199	0,000190	0,000138
	R^2	0,983300	0,984124	0,997236	0,998910
	χ^2	0,001735	0,001616	0,000247	0,000083

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
	RMSE	0,040415	0,039065	0,015245	0,008896
Aghbashlo	k_1	0,000166	0,000149	0,000170	0,000145
	k_2	-0,000042	-0,000036	-0,000015	0,000005
	R^2	0,999655	0,999852	0,999935	0,999528
	χ^2	0,000038	0,000016	0,000006	0,000037
	RMSE	0,005806	0,003770	0,002332	0,005853
Logaritmik	A		1,137330		0,982047
	k		0,000161		0,000150
	c		-0,112610		0,027992
	R^2		0,997603		0,999765
	χ^2		0,000276		0,000019
	RMSE		0,015177		0,004128
Midilli ve Küçük	a	1,054275	1,049422	1,000247	1,006153

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
Midilli ve Küçük	k	0,000831	0,000551	0,000110	0,000132
	n	0,823597	0,863268	1,058804	1,011456
	b	-0,000010	-0,000009	-0,000001	0,000001
	R^2	0,986596	0,992350	0,999983	0,999759
	χ^2	0,001714	0,000945	0,000002	0,000021
	RMSE	0,036207	0,027117	0,001189	0,004180
Page	k	0,000021	0,000020		0,000829
	n	1,275531	1,262629		0,800766
	R^2	0,998027	0,998502		0,986045
	χ^2	0,000219	0,000162		0,001106
	RMSE	0,013888	0,011998		0,031838
Verma	a	-4,09135	-3,52246	-0,050516	0,012329
	k	0,00011	0,00009	1,000000	-0,000029

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
Verma	g	0,00012	0,00011	0,000200	0,000145
	R^2	0,996876	0,997796	0,998929	0,999657
	χ^2	0,000371	0,000254	0,000109	0,000028
	RMSE	0,017478	0,014552	0,009490	0,004986
Weibull	b	4647,012	5226,535	5327,071	7191,779
	a	1,276	1,263	1,094	0,972
	R^2	0,998027	0,998502	0,999778	0,999192
	χ^2	0,000219	0,000162	0,000021	0,000064
	RMSE	0,013888	0,011998	0,004318	0,007658
Alibas	a	0,276329	0,250105	0,252566	0,290291
	k	1,000000	0,100000	0,100000	0,100000
	n	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	b	-0,000060	-0,000058	-0,000057	-0,000037

Tablo 5.3 IR 70°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri	
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol	Elma Suyu 30 sn
	g	0,723671	0,749895	0,747434	0,709709
	R^2	0,913971	0,923760	0,935699	0,901963
	χ^2	0,011920	0,010147	0,007662	0,008996
	RMSE	0,091730	0,085607	0,073543	0,084389

İnfrared kurutucuda 60°C derecede kurutulan ejder meyvesi kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında Aghbashlo, İki terimli üstel ve Weibull modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri logarithmic modeli için Aghbashlo modeli için 0,999829 / 0,000017 / 0,003892, İki terimli üstel modeli için 0,999185 / 0,000087 / 0,008497, Weibull modeli için 0,998121 / 0,000182 / 0,012906 olarak bulunmuştur.

30 sn askorbik asit ön işlemli numune için uygulanan modeller arasında İki terimli üstel, Weibull ve Jena ve Das modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri İki terimli üstel modeli için 0,999177 / 0,000080 / 0,008190, Weibull modeli için 0,998433 / 0,000139 / 0,011300, Jena ve Das modeli için 0,997287 / 0,000263 / 0,014869 olarak bulunmuştur.

İnfrared kurutucuda 60°C kurutulan hint inciri kontrol numuneleri için uygulanan modeller İki terimli üstel, Henderson ve Verma modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri İki terimli üstel modeli için 0,999969 / 0,000003

/ 0,001501, Henderson modeli için 0,999970 / 0,000002 / 0,001502, Verma modeli için 0,999971 / 0,000002 / 0,001445 olarak bulunmuştur.

İnfrared kurutucuda 60°C derecede kurutulan numunelere ait matematiksel modeller ve ilgili veriler Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4 İnfrared kurutucuda 60°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**
İki Terimli Üstel	a	-20,8137	-32,5423	18,555500
	b	-0,0001	-0,0002	-0,000100
	k_0	21,8245	33,5258	-17,553700
	k_1	-0,0001	-0,0002	-0,000100
	R^2	0,999185	0,999177	0,999969
	χ^2	0,000087	0,000080	0,000003
	RMSE	0,008497	0,008190	0,001501
Henderson	a	1,047920	1,026665	1,001744
	k	0,000151	0,000133	0,000115
	R^2	0,991311	0,995340	0,999969
	χ^2	0,000840	0,000413	0,000002

Tablo 5.4 İnfrared kurutucuda 60°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol
	RMSE	0,027754	0,019489	0,001502
Jena ve Das	a	0,560792	0,503637	0,623705
	k	0,000185	0,000153	0,000115
	b	0,003870	0,002367	-0,000022
	c	0,556352	0,666483	0,474279
	R^2	0,995739	0,997287	0,999969
	χ^2	0,000453	0,000263	0,000003
	RMSE	0,019434	0,014869	0,001496
Lewis	k	0,000144	0,000129	0,000115
	R^2	0,988638	0,994416	0,999964
	χ^2	0,001051	0,000474	0,000003
	RMSE	0,031738	0,021334	0,001601
Aghbashlo	k_1	0,000114	0,000111	
	k_2	-0,000021	-0,000013	

Tablo 5.4 İnfrared kurutucuda 60°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol
	R^2	0,999829	0,999511	
	χ^2	0,000017	0,000043	
	RMSE	0,003892	0,006309	
Page	k	0,000386	0,000044	0,000115
	n	0,887327	1,118536	1,000229
	R^2	0,971199	0,998433	0,999964
	χ^2	0,002785	0,000139	0,000003
	RMSE	0,050531	0,011300	0,001600
Verma	a	-0,082055	-0,043276	1,002697
	k	1,000000	0,100000	0,000115
	g	0,000155	0,000135	0,999999
	R^2	0,993152	0,995905	0,999971
	χ^2	0,000694	0,000379	0,000002
	RMSE	0,024639	0,018268	0,001445

Tablo 5.4 İnfrared kurutucuda 60°C kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol
Weibull	b	7157,568	7862,205	8711,610
	a	1,197	1,119	1,000
	R^2	0,998121	0,998433	0,999964
	χ^2	0,000182	0,000139	0,000003
	RMSE	0,012906	0,011300	0,001600
Alibas	a	0,245551	0,242938	0,268912
	k	1,000000	0,100000	0,100000
	n	1,000000	1,000000	1,000000
	b	-0,000043	-0,000039	-0,000033
	g	0,754449	0,757062	0,731088
	R^2	0,925079	0,930337	0,913286
	χ^2	0,008390	0,007098	0,007682
	RMSE	0,081500	0,075355	0,079436

IR 50°C'de kurutulan ejder meyvesi kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında İki terimli üstel, Logaritmik ve Aghbashlo modelleri en yüksek R^2

değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri İki terimli üstel modeli için 0,999564 / 0,000038 / 0,005779, Logaritmik modeli için 0,999468 / 0,000045 / 0,006383, Aghbashlo modeli için 0,999454 / 0,000045 / 0,006470 olarak bulunmuştur.

30 sn askorbik asit ön işlemli numune için uygulanan modeller arasında Aghbashlo, Logaritmik ve Midilli ve Küçük modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Aghbashlo modeli için 0,999861 / 0,000012 / 0,003318, Logaritmik modeli için 0,999861 / 0,000010 / 0,002960, Midilli ve Küçük modeli için 0,999801 / 0,000018 / 0,003970 olarak bulunmuştur.

İnfrared kurutucuda 50°C kurutulan hint inciri kontrol numuneleri için uygulanan modeller arasında Aghbashlo, İki terimli üstel, Weibull modelleri en yüksek R^2 değerlerini ve en düşük χ^2 ile RMSE değerlerine sahip olarak en yakın sonuçları vermişlerdir. Sırasıyla R^2 / χ^2 ile RMSE değerleri Aghbashlo modeli için 0,999976 / 0,000002 / 0,001215, İki terimli üstel modeli 0,999983 / 0,000001 / 0.001051, Weibull modeli için 0,999889 / 0,000015 / 0,003748 olarak bulunmuştur.

IR 50°C'de kurutulan numunelere ait matematiksel modeller ve ilgili veriler Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**
İki Terimli Üstel	a	10,58423	0,512836	0,370987
	b	-0,00005	-0,000090	-0,000127
	k_0	-9,58986	0,519587	0,630300

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	Parametre	Ejder Meyvesi		Hint İnciri
		Kontrol	Askorbik Asit 30 sn	Kontrol
	k_1	-0,00005	-0,000090	-0,000057
	R^2	0,999564	0,995172	0,999983
	χ^2	0,000038	0,000433	0,000001
	RMSE	0,005779	0,019573	0,001051
Henderson	a	1,026209	1,032437	0,976241
	k	0,000092	0,000090	0,000072
	R^2	0,995040	0,995172	0,998415
	χ^2	0,000407	0,000406	0,000106
	RMSE	0,019504	0,019573	0,010021
Jena ve Das ve Das	a	0,549016	0,216604	1,001730
	k	0,000106	0,000106	0,000064
	b	0,001983	0,002251	-0,001317
	c	0,575660	1,502967	0,011956
	R^2	0,996915	0,997415	0,999506

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**
	χ^2	0,000272	0,000232	0,000035
	RMSE	0,015381	0,014324	0,005595
Lewis	k	0,000090	0,000088	0,000074
	R^2	0,994036	0,993805	0,997479
	χ^2	0,000473	0,000506	0,000164
	RMSE	0,021387	0,022173	0,012638
Aghbashlo	k_1	0,000077	0,000075	0,000082
	k_2	-0,000010	-0,000010	0,000006
	R^2	0,999454	0,999861	0,999976
	χ^2	0,000045	0,000012	0,000002
	RMSE	0,006470	0,003318	0,001214
Logaritmik	a	1,104582		0,949527
	k	0,000073		0,000082
	c	-0,107618		0,044564

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**
	R^2	0,999468		0,999861
	χ^2	0,000045		0,000010
	RMSE	0,006383		0,002960
Midilli ve Küçük	a	0,991487	0,994306	
	k	0,000056	0,000050	
	n	1,038823	1,050193	
	b	-0,000002	-0,000002	
	R^2	0,99941	0,999801	
	χ^2	0,000051	0,000018	
	RMSE	0,006673	0,003970	
Page	k		0,000418	0,000527
	n		0,835461	0,793517
	R^2		0,969434	0,989204
	χ^2		0,002573	0,000722

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**
	RMSE		0,049254	0,026156
Verma	a	-1,17366	-1,34993	0,399797
	k	0,00004	0,00004	0,000123
	g	0,00006	0,00006	0,000055
	R^2	0,99952	0,999872	0,999981
	χ^2	0,000040	0,000011	0,000001
	RMSE	0,006037	0,003186	0,001085
Weibull	b	11286,06	11613,83	1351,3900
	a	1,11	1,13	0,930000
	R^2	0,998021	0,998597	0,999889
	χ^2	0,000162	0,000118	0,000015
	RMSE	0,012318	0,010549	0,003748
Alibas	a	0,234016	0,362307	0,895171
	k	1,764113	0,921023	0,000110

Tablo 5.5 IR 50°C'de kurutulan numuneler için elde edilen matematiksel model sabitleri ve istatistiksel parametreler (devamı)

Modeller	**Parametre**	**Ejder Meyvesi**		**Hint İnciri**
		Kontrol	**Askorbik Asit 30 sn**	**Kontrol**
	n	0,000001	0,000011	0,975032
Alibas	b	-0,000032	-0,000029	-0,000002
	g	0,765984	0,637695	0,107244
	R^2	0,949881	0,935518	0,999978
	χ^2	0,004584	0,005971	0,000002
	RMSE	0,062004	0,071539	0,001179

6
SONUÇ

Bu tez çalışmasında, ejder meyvesi (*Hylocereus undatus*) ve hint inciri (*Opuntia ficus-indica*) örneklerinin farklı kurutma yöntemleriyle işlenmesi, kurutma öncesi uygulanan ön işlemlerin etkilerinin incelenmesi ve elde edilen deneysel verilerin matematiksel modellerle uyumunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın genel bulguları, hem literatürdeki güncel çalışmalarla hem de sektör ihtiyaçlarıyla örtüşen önemli çıktılar sunmaktadır.

Öncelikle, ejder meyvesi ve hint incirinin yüksek nem içeriği nedeniyle çabuk bozulmaya yatkın olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle kurutma işlemi, bu tür değerli egzotik meyvelerin raf ömrünü uzatmak, taşınabilirliğini artırmak ve tüketime hazır hale getirilmesini sağlamak açısından kritik bir ön işleme basamağıdır. Tez kapsamında uygulanan infrared (IR) kurutma ve dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemlerinin her ikisi de, geleneksel kurutma tekniklerine kıyasla meyvelerin besin bileşenlerini, renklerini ve aromatik özelliklerini daha iyi koruma potansiyeli sunmaktadır.

Çalışmanın deneysel kısmında, hem ön işlemsiz hem de askorbik asit ve elma suyu ön işlemi uygulanmış numuneler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ön işlem uygulamalarının özellikle IR kurutma için belirgin faydalar sağladığını göstermiştir. Askorbik asit, meyve dokusundaki hücre zarlarını kısmen parçalayarak suyun dışarı difüzyonunu hızlandırmış; elma suyu ise osmolarite farkı yaratarak nem kaybını kolaylaştırmıştır. Bu durum, toplam kuruma süresinin kısalmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir.

Matematiksel modelleme açısından, IR kurutma sonuçlarında Midilli & Küçük ve Aghbashlo modelleri her iki meyve türü için de oldukça yüksek bir uyum göstermiştir. Bu modellerin yüksek R^2, düşük χ^2 ve RMSE değerlerine sahip olması, bu tür kurutma süreçlerinin deneysel verilerini temsil etmede güvenilir olduklarını ortaya koymuştur. Liyofilizasyon yöntemi için ise Aghbashlo ve İki Terimli Üstel modellerinin verileri başarıyla temsil ettiği belirlenmiştir. Bu durum, literatürde farklı tarımsal ürünlerde dondurarak kurutma uygulamaları için önerilen modellerle

uyumludur ve ejder meyvesi ile hint inciri gibi egzotik meyvelerde de benzer bir davranış sergilediğini doğrulamaktadır.

Genel olarak bakıldığında, IR kurutma yöntemi kısa işlem süresi, enerji verimliliği ve proses kontrol kolaylığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak bazı durumlarda, özellikle sıcaklığın yüksek olduğu IR uygulamalarında renk pigmentlerinde ve bazı ısıya hassas besin öğelerinde kısmi kayıplar gözlenebilmektedir. Buna karşılık dondurarak kurutma, raf ömrünü en iyi şekilde uzatan, aromatik bileşen kaybını en aza indiren ve meyvenin özgün dokusunu en iyi koruyan yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Dezavantaj olarak ise, bu yöntemin işlem süresinin uzun olması ve enerji maliyetlerinin yüksek olması gösterilebilir. Bu nedenle, endüstriyel üretimde hangi yöntemin seçileceği, hedeflenen nihai ürünün fonksiyonel özelliklerine ve ekonomik koşullara bağlı olarak belirlenmelidir.

Bu tez çalışması, literatürde bu iki egzotik meyvenin özellikle IR kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleriyle birlikte incelendiği nadir çalışmalardan biridir.

Sonuç olarak bu çalışma, kurutma teknolojilerinin günümüzde geldiği noktada hem bilimsel hem de pratik uygulamalarda ne kadar çeşitlendiğini göstermekte; egzotik meyve işleme alanına önemli bir literatür katkısı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, ilerleyen süreçte hem akademik araştırmalara hem de yerli üreticilerin katma değerli ürün geliştirme girişimlerine yol gösterici niteliktedir.

KAYNAKÇA

Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., & Hernández, F. (2018). Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish Opuntia ficus-indica Mill. cladodes and fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*(4), 1566–1573. https://doi.org/10.1002/jsfa.8628

Balbay, A., & Şahin, Ö. (2012). Microwave Drying Kinetics of a Thin-Layer Liquorice Root. *Drying Technology*, *30*(8), 859–864. https://doi.org/10.1080/07373937.2012.670682

Celma, A. R., Rojas, S., López, F., Montero, I., & Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, *80*(4), 1261–1271. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.09.020

Chandra, P. K. . (2017). *Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers*. CRC Press.

Chen, C., Venkitasamy, C., Zhang, W., Khir, R., Upadhyaya, S., & Pan, Z. (2020). Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *150*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119283

Ciurzyńska, A., & Lenart, A. (2011). Freeze-drying - application in food processing and biotechnology - a review. In *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* (Vol. 61, Issue 3, pp. 165–171). Polish Academy Sciences. https://doi.org/10.2478/v10222-011-0017-5

Demir, V., Gunhan, T., & Yagcioglu, A. K. (2007). Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering*, *98*(1), 47–53. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.06.011

Diamante, L., Durand, M., Savage, G., & Vanhanen, L. (2010).) 1*. In *International Food Research Journal* (Vol. 8015).

Dziki, D. (2020). Recent trends in pretreatment of food before freeze-drying. In *Processes* (Vol. 8, Issue 12, pp. 1–18). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/pr8121661

Efremov, G. (2014). Infrared Drying. *Modern Drying Technology*, 317–355.

Ertekin, C., & Heybeli, N. (2014). Thin-layer infrared drying of mint leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(4), 1480–1490. https://doi.org/10.1111/jfpp.12107

Ghorai, D. (2023). A comprehensive review of dragon fruit (Hylocereus spp.): Botanical attributes, nutritional value, health benefits, and culinary applications. *~ 1578 ~ The Pharma Innovation Journal*, *12*(8), 1578–1584. www.thepharmajournal.com

Gouws, C. A., D'Cunha, N. M., Georgousopoulou, E. N., Mellor, D. D., & Naumovski, N. (2019). The effect of different drying techniques on

phytochemical content and in vitro antioxidant properties of Australian-grown prickly pears (Opuntia ficus indica). *Journal of Food Processing and Preservation*, *43*(3). https://doi.org/10.1111/jfpp.13900

Hii, C. L., Law, C. L., & Cloke, M. (2008). MODELLING OF THIN LAYER DRYING KINETICS OF COCOA BEANS DURING ARTIFICIAL AND NATURAL DRYING. In *Journal of Engineering Science and Technology* (Vol. 3, Issue 1).

João Barroca, M., & Guiné, R. P. F. (n.d.). *Study of Drying Kinetics of Quince*. https://cabidigitallibrary.org

Kipcak, A. S. (2017). Microwave drying kinetics of mussels (Mytilus edulis). *Research on Chemical Intermediates*, *43*(3), 1429–1445. https://doi.org/10.1007/s11164-016-2707-4

Kumar, N., Sarkar, B. C., & Sharma, H. K. (2012). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of Food Science and Technology*, *49*(1), 33–41. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0266-7

Gençcelep, H. (2024, Ocak 2). Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler Ders Notları 11. Hafta [PDF dosyası]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. 22 Ocak 2024 tarihinde https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/hgenccelep/135861/TEMEL%20%C4%B0%C5%9ELEMLER-%2011.%20Hafta.pdf adresinden erişildi.

Luu, T. T. H., Le, T. L., Huynh, N., & Quintela-Alonso, P. (2021). Dragon fruit: A review of health benefits and nutrients and its sustainable development under climate changes in Vietnam. In *Czech Journal of Food Sciences* (Vol. 39, Issue 2, pp. 71–94). Czech Academy of Agricultural Sciences. https://doi.org/10.17221/139/2020-CJFS

MENGEŞ, H. O., & ERTEKİN, C. (2007). VİŞNE KURUTMADA KURUMANIN ÇEŞİTLİ MODELLERLE AÇIKLANMASI. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, *21*(42), 4–10.

Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology*, *20*(7), 1503–1513. https://doi.org/10.1081/DRT-120005864

Özdemir, M., & Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, *42*(4), 225–233.

Praveen Kumar, D. G., Hebbar, H. U., & Ramesh, M. N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT*, *39*(6), 700–705. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.021

Sharma, G. P., & Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, *65*(4), 609–617. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.027

Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, *66*(3), 323–328. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.025

Tunde-Akintunde, T. Y., & Ogunlakin, G. O. (2011). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying

of pretreated and untreated pumpkin. *Energy Conversion and Management*, *52*(2), 1107–1113. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.005

Westerman, P. W., White, G. M., Ross, I. J., & Asae, A. (n.d.). *Relative Humidity Effect on the High-Temperature Drying of Shelled Corn*.

Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. In *Energy* (Vol. 26). www.elsevier.com/locate/energy

Yaldiz, O., & Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, *19*(3–4), 583–597. https://doi.org/10.1081/DRT-100103936

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Kurnaz, K., Özden, Z., & Kıpçak, A. S. (2025, Haziran). *Drying of various exotic fruits using modern methods and investigation of parameters affecting their quality characteristics*. Bildiri sunulmuştur, *EurasianSciEnTech 2025 Konferansı*, İstanbul, Türkiye.