



FARKLI TİPTE KURUTUCULARIN KARŞILAŞTIRILMALI ARAŞTIRILMASI

Khandan ROSHANAËİ

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**FARKLI TİPTE KURUTUCULARIN KARŞILAŞTIRILMALI
ARAŞTIRILMASI**

Khandan ROSHANAËİ

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Khandan ROSHANA EI tarafından hazırlanan “FARKLI TİPTE KURUTUCULARIN KARŞILAŞTIRILMALI ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK
Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)

Üye : Doç. Dr. Bahadır ACAR (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Khandan ROSHANAËÏ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TİPTE KURUTUCULARIN KARŞILAŞTIRILMALI ARAŞTIRILMASI

Khandan ROSHANAËİ

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği**

**Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK
Ocak 2022, 45 sayfa**

Bu çalışmada, kurutma teknikleri araştırılarak dondurarak ve vakumlu kurutma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem de son yıllarda kullanılan kurutma yöntemi olup, dondurarak kurutma yöntemi, ürünlerin raf ömrünü uzatması ve içeriğindeki faydalı aromaları koruması nedeniyle en sağlıklı kurutma yöntemi olarak gösterilmiştir. Çalışmada safran gibi çok pahalı tarım ürünlerinde dondurarak kurutmanın daha verimli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, dondurarak kurutma tekniği, vakumlu kurutma yöntemiyle kapasite karşılaştırmasında daha iyi sonuçlar vermiştir. En iyi sonuç almak adına vakumlu kurutma ile dondurarak kurutma yöntemlerini hibrit şekilde kullanabiliriz.

Anahtar Sözcükler : Dondurarak kurutma, vakumla kurutma, kapasite, enerji tüketimi, verimlilik.

Bilim Kodu : 92808

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

COMPARATIVE RESEARCH OF DIFFERENT TYPES OF DRYERS

Khandan ROSHANAËİ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Energy Systems Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

January 2022, 45 pages

In this study, drying techniques were investigated and freeze drying and vacuum drying methods as drying methods were compared. Both methods are the drying method that has been used in recent years also freeze drying method has been illustrated as the healthiest drying way, as it extends the shelf life of the products and preserves the beneficial aromas in its content. In the study, it was determined that freeze-drying is more efficient in much expensive agricultural products such as saffron. Moreover, freeze-drying technique has depicted better results in order the capacity comparison with vacuum drying method. In order to get the best results, we can use a hybrid of vacuum drying and freeze drying methods.

Key Word : Freeze drying, vacuum drying, capacity, energy consumption, Efficiency.

Science Code : 92808

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yűrűtűlmesinde ve oluőumunda ilgi ve desteęini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandıęım, yűnlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mehmet ŐZKAYMAK'a sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
DONDURARAK KURUTMA	2
2.2. GELENEKSEL DONDURMA KURUTMA DENEYSSEL AŞAMALARI ...	7
2.3. DONDURARAK KURUTMA TEKNİĞİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	13
2.3.1. Avantajlar	13
2.3.3. Hurmaların Korunmasında Dondurarak Kurutma Yöntemlerinin Diğer Teknolojilere Yönelik Has Avantajı.....	15
2.3.5. Safran	16
2.3.6. Dezavantajları	17
BÖLÜM 3	18
VAKUM KURUTUCU	18
3.1. VAKUMLU KURUTUCULAR ÇEŞİTLERİ	20
3.1.1. Karıştırılmış Tava Kurutucular	20
3.1.2. Çift Koni Kurutucu	21
3.1.3. Vakum Bantlı Kurutucular	21
3.1.4. Vakum Raf Kurutucular	21

	<u>Sayfa</u>
3.2. VAKUM KURUTMADA EN ÖNEMLİ FAKTÖRLER	21
3.3. VAKUMLU KURUTMALARIN KURUTMA İLKELERİ.....	22
3.4. VAKUMLU KURUTUCULARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	23
3.4.1. Avantajlar	23
3.4.2. Dezavantajları	25
3.5. HİBRİT SİSTEMLER.....	27
BÖLÜM 4	31
SONUÇLAR	31
KAYNAKLAR	32
RESUME	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Konvansiyonel dondurarak kurutma kurulumu	6
Şekil 2.2. Deneysel ve Ampirik ürünler olarak çileklerin kuruma süresi, nem oranı ve hatta kalınlıkları arasındaki ilişkiyi göstermektedir.	7
Şekil 2.3. Dondurarak kurutma tekniğinin prensibinin basitleştirilmiş grafiği	8
Şekil 2.4. Farklı havuç örneklerinin 5 mm ve 7 mm kalınlıklarda kurutulmasında kuruma süresi ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi göstermektedir	9
Şekil 2.5. Dondurarak kurutma tekniği altında safran bitkisinin sıcaklık profile	9
Şekil 2.6. Trabzon Hurması (Diospyros Kaki) dilimlerinin dondurarak kurutma tekniği ile kurutulması sırasındaki sıcaklık değerleri	10
Şekil 3.1. Farklı laboratuvar türlerinde ve hatta çeşitli pilot ölçekli çalışmalarda yaygın olan çoklu tepsili vakumlu kurutucu.....	19
Şekil 3.2. Vakumlu kurutucularda enerji tüketimi	20
Şekil 3.3. Vakumlu kurutucuda tüketilen enerji miktarında sıcaklığın reaksiyonu ...	22

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Kuruma eğrilerine uygulanan matematiksel modeller.....	12
Çizelge 3.1. Dolaylı kurutucuların alınmasının standart ve norm seçenekleri	24
Çizelge 3.2. Enerji verimliliği açısından bazı hibrit kurutma sistemlerinin karşılaştırılması.....	28
Çizelge 3.3. Ana kurutucunun VD (Vakumlu Kurutucu) olduğu farklı hibrit sistemlerde enerji verimliliği miktarı.	29

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Q	: Isı (Btu/hr)
U	: Toplam ısı transfer katsayısı ($W/(m^2 \cdot K)$, Btu/(ft ² h°F))
A	: Isı transfer alanı (m ² , ft ²)
ΔT	: Vakumlu kurutucuda buharlaşma sıcaklığı ile ısıtma ortamının sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı (°C, °F)
MR	: Nem oranı (boyutsuz)
DR	: Kuruma hızı (gr su/gr kuru madde)
MC	: Nem içeriği (gr su/gr kuru madde)
M0	: Başlangıç nem oranı (gr su/gr kuru madde)
Mt	: T anındaki nem oranı (gr su/gr kuru madde)
Md	: Denge nemi (gr su/gr kuru madde)
N	: Gözlem sayısı
RMSE	: Tahmini standart hata
X ²	: Khi-kare
R ²	: Modelleme yeterliliği
MR _{den.}	: Deneysel verilerle belirlenen nem oranı
MR _{tah}	: Tahmini nem oranı
Deff	: Efektif yayılım (m ² /s)
Z	: Kullanılan modeldeki katsayı sayısı
K	: Model sabiti
k, k0, k1	: Kurutma hızı sabitleri (dk ⁻¹)
n	: Model sabiti
a, b, c	: Model sabiti
t	: Zaman(dakika)
L	: Numunelerin yarı kalınlığı (m)
G	: Gram

Mbar : Mega bar
η : Enerji verimliliği

KISALTMALAR

FD : Dondurarak kurutma- Freeze drying
VD : Vakumlu kurutma- Vacuum drying
MHH : Mannitol hemihidrat
ADC : Antikor-ilaç konjugatları
ESF : Electrical Strenght Field - Elektriksel kuvvet alanında
EPT : End Point Temperature treatment-son nokta sıcaklık işlemleri
CPI : Chemical Process Industry - Kimyasal Proses Endüstri

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yüksek solunum nedeniyle hasattan sonra bitkiler bozulmaya oldukça yaygındır. Bu nedenden dolayı gıda endüstrisi prosesleri, bozulabilir ürünleri yüksek stabiliteye sahip ürünlere dönüştürmek için kullanılabilir [1]. Kurutma, tarımsal ürünlerin gıdalar, otlar, tahıllar ve sebzeler gibi ürünlerini bozulmaya karşı korumak için kullanılan en eski ve en önemli dönüşüm işlemlerinden biridir. Bu işlem mikrobiyal ve enzim aktivitelerini azaltır ve kimyasal reaksiyonların hızlarını yavaşlatır; dolayısıyla ürünün ağırlığını ve hacmini azaltırken ömrünü uzatabilir, dolayısıyla nakliyesini ve depolanmasını kolaylaştırır [2]. Kurutma, ürünlerin ısı uygulanmasıyla suyun uzaklaştırıldığı ve nihai sonucun katı olduğu bir birim işlemidir. Nihai ürün, tabakalar, pullar, film, toz veya granüller formunda olabilir [3].

Bir birim işlem olarak kurutma prosedürünün amacı hala geçerli ve önemlidir, günümüz tüketicileri sağlığı geliştirici biyoaktif bileşiklerin çoğunun korunduğu daha besleyici ürünleri tercih etmektedir. Bu talebe yanıt olarak, gıda kurutucularının tasarımındaki son geliştirme faaliyetleri, kurutucu performansının ana kriteri olarak ürün kalitesini içermektedir. Bu çalışmada farklı yaygın kurutucu tiplerinin özellikleri, performansları ve güçlü yönleri ayrıca olumsuz yönleri ve araştırıp ve kıyaslandı. Son olarak nasıl farklı kurutuculardan en iyi verimi elde edebiliriz farklı sistem tavsiyesinde bulunduk.

BÖLÜM 2

DONDURARAK KURUTMA

Meyve ve sebzeler çoğunlukla su içermektedir. Küçük kısım olarak ta vitaminler, karbonhidratlar, proteinler ve lipitleri içemekteler [4]. Meyve ve sebzeler gibi ısıya hassas ürünlerin kurutulmasında, bozulma, oksidasyon ve hatta esmerleşmeye bağlı olarak ürün bozulmasını önlemek için özel teknikler gerekmektedir [5]. Basit şekilde görüldüğü gibi, aroma, renk, şekil ve kalite, gıda ürünlerinde tüketicinin memnuniyetini etkileyen başlıca faktörlerdir. Ayrıca farklı kurutma teknikleri ile kurutma işlemi sırasında, özellikle kurutulmuş gıdalardaki sebze, meyve ve gıda ürünlerindeki su içeriğine bağlı olarak ürünlerin hayati kalite faktörleri kaybolabilmektedir [6]. Binlerce yıldan beri insan, gıdaların veya sebzelerin kalitesini daha uzun süre korumak için kurutulmasının önemini, akademik görüş olarak ta yaklaşık 1966 yılında tanımlamıştır. Hatta 1966 yılında White ve Cakebread adlı iki bilim adamı, ürünlerin sıcaklığı arttırırken toz halinde çökmesine ilişkin ürünlerin stabilitesini belirleyerek gıda maddelerinin korunmasını vurgulamışlardır [7]. Cam geçişin temel uygulamalarından sonra, muazzam bilimsel literatürlerde kenarları olduğu soyutlanmaktadır [8–11]. Cam geçiş tipik olarak amorf malzemelerin dielektrik (dielektrik sabiti), mekanik (modül, viskozite) ve termodinamik (entalpi, serbest hacim, ısı kapasitesi, termal genleşme katsayısı) özelliklerindeki değişiklikleri gözlemleyerek tespit edilmektedir.

Ayrıca, çoklu ürünlerin ısı ile ilgili faz değişimleri pirinç, balık derisi jelatini, hurma eti, sarımsak ve nar kabuğu gibi ürünlerin ekstresi durum ısı diyagramları araştırılmış ve yayınlanmıştır [12–17]. Cam geçişi koşuyla ilişkin ve uygun, özellikle hassas ve değerli ürünlerde etkili ve kullanışlı kurutma tekniklerinden biri olan dondurarak kurutma teknolojisi de bilinen teknikler tüm dünyada kurulmuş ve geliştirilmiş olup, birçok araştırmacı bu teknoloji üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

Dondurarak kurutma tekniğinin felsefesinin bir açıklaması olarak, geçmişte insanların her zaman her mevsim yenebilecek ürünü, hatta kaliteli olmasını talep ettikleri için not edilmektedir. Ondandır, farklı kurutma teknikleri geliştirilmiştir. Ayrıca dondurarak kurutmanın en büyük olumlu yönlerinden biri, diğer kurutmalara göre daha kaliteli olmasının yanı sıra gıda ürünleri üzerindeki en düşük çevresel etkisinin olduğu dur, bu nedenle dondurarak kurutma tekniği, gıda zincirinin sadece işleme ve dağıtım olan iki aşamasına odaklanmaktadır. Açıkça görüldüğü gibi, sebzeler ve gıda ürünleri büyük ölçüde su içerir ve daha sonra faz değiştirme süreci, tüm proses enerji ihtiyacının temel katkısını yapan katılaşma, süblimleşme ve yoğunlaşmadan oluşan dondurarak kurutmada gerçekleşmektedir [18]. Dondurarak kurutmanın enerji tüketimi diğer tekniklerden daha fazladır, hatta enerji talebi miktarını azaltmak için optimal proses tasarımı veya hibrit kurutma teknikleri faydalı olabilmektedir [19–22]. Dondurularak kurutulmuş mikro yapının, ürünlerin kalitesi ve şekli üzerindeki temellerini anlamak için, rehidrasyon ve kurutma kinetiğinin karakterizasyonunu anlamak önemli bir rol oynamaktadır [23].

Rehidrasyon kinetiği için bir açıklama olarak, bu araştırmada çalışmalarının ana konsantrasyon noktasının tipik olarak önceki kurutma işlemlerinin ve rehidrasyon ortamının (su) sıcaklığının gıda maddesinin geri verme kapasitesi üzerindeki etkisine odaklandığı belirtilmektedir. Hem ampirik veya deneysel, hem de teorik modeller genellikle su alma kinetiğini göstermek için kullanılmaktadır [24–26]. Spesifik çalışmada, dondurularak kurutulmuş domatesin birinci dereceden kinetik yasa kullanılarak rehidrasyon kinetiği, Peleg'in modelinin kullanıldığı diğer çalışmalarda da belirtilmektedir [24–26].

2.1. ÖZELLİKLER

Hiçbir çökme veya çatlama belirtisi olmayan zarif bir ürün ayrıca ara ürün homojenliği, ana ürün kalite gereksinimleridir [27]. Bunlar sırasıyla, maksimum su uzaklaştırma, sulandırma kolaylığı ve daha kısa dondurarak kurutma döngüleri gibi diğer önemli ürün ve süreç kalitesi yönleriyle ilişkilendirilebilir. Çökmeyen, sağlıklı olan ve homojen bir ürün yapısının, su süblimasyonuna ürün direncini azaltan, birincil kurutma sırasında su kütlesi transferini kolaylaştıran, su uzaklaştırma

işlemini en üst düzeye çıkarmak ve dondurarak kurutma döngüsünü optimize etmek için faydalı olacak, birbirine iyi bağlanmış gözenekli kanallara sahip olması beklenilmektedir [28,29] .

Gözenek boyutu oluşumu, iki fazlı bir buzul ve çözünen donma konsantresi sistemi oluştuğunda donma sırasında meydana gelir ve buz süblimasyonundan sonra donma konsantresini geride bırakır. Buz kristallerinin ilk büyümesinde, soğutma hızı tarafından yönlendirilir. Hızlı soğutma, çoklu buz kristali oluşumuyla sonuçlanan daha kapsamlı bir aşırı soğumaya neden olur halbuki, yavaş soğutma daha az kristal çekirdek oluşumu ve daha uzun buz kristali büyümesi ile daha yavaş dondurmaya izin vermektedir [30]. Bazen kristal büyümesini desteklemek için ikinci bir dondurma adımı uygulanır. Bu adımda, hedef donma sıcaklığı, malzeme taşınmasını ve kristal büyümesini kolaylaştıran donma konsantresinin yumuşatılmasına izin vermek için donma konsantresinin Tg' nin üzerine ve erime noktasının altına yükseltilmektedir. Bu adım sertleştirme olarak (annealing) olarak bilinir ve buz ve hacim arttırıcı maddeler gibi kristal yapıların büyümesini desteklemektedir. Stabilizörler gibi diğer çözünenler, kristalin mannitol yapısı ile birlikte dağılan camı bir matrisin konformasyonu ile proteini hareketsizleştirmek ve korumak için formülasyonlarda mevcuttur [31].

Dondurarak kurutmanın özelliğinden bahsedilebilir ki bu teknik, depolama sırasında kimyasal ve mikrobiyolojik stabiliteyi geliştirmek için değişen ve stabil olmayan bir sıvı formülasyonu katı bir forma aktarmaktır [32,33]. Dondurularak kurutulmuş ürünler tipik olarak, ilacın intravenöz veya oral uygulamasından önce sulandırma sırasında hızlı çözünme gösterirler. Bu faydalara atıfta bulunarak, biyolojik, örnek olarak antikor-ilaç konjugatları (ADC'ler) ve küçük moleküller cam şişelerde dondurularak kurutulur ve sulandırıldıktan sonra tipik olarak tek kullanımlık bir dozaj formunda kullanım için hazırlanır. Dondurarak kurutma işlemi, intravenöz uygulama gerekiyorsa, katı aseptik koşulları karşılamalıdır. Bir yandan, ürün kontaminasyondan, kirletilmeden veya zehirlenmesinden korunmalıdır. Öte yandan, üretim süreci, yalnızca dondurarak kurutucunun kendisi için değil, aynı zamanda personel veya diğer işlenmiş partiler (çapraz kontaminasyon) için Aktif İlaç Bileşenleri veya basitçe API tarafından kontaminasyon riski taşır. Dondurarak

kurutucunun kirlenmesine örnek olarak kurutulmuş ürünün patlamasından sebep olmaktadır [34].

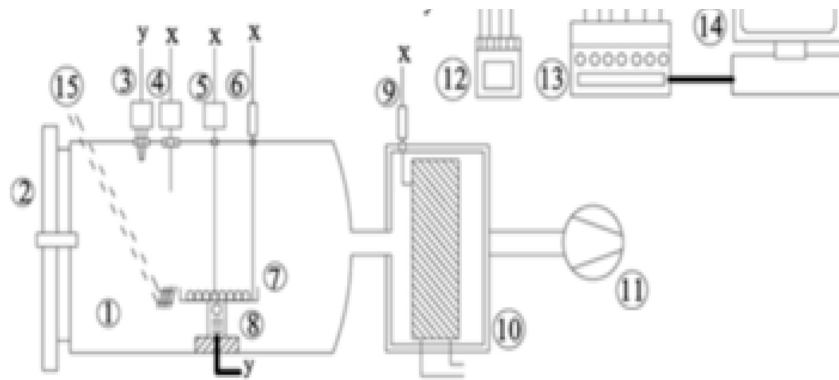
Dondurucu konsantre içindeki tüm formülasyon bileşenlerinin yakınlığı nedeniyle, etkileşimlerinin kapsamı, kristal oluşumunu ve kristallerin büyümesini bağıl oran etkileyen nispi oranlarından etkilenmektedir [35]. Isı transferinin düzgün bir oranda gerçekleşmediği göz önüne alındığında şişelerin geometrisi ve ısıtma rafı ile temas göz önüne alındığında, çözelti boyunca, ek olarak ta buz kristali oluşumunun stokastik doğasına göre, ürün içindeki ve şişeler arasındaki yapısal özelliklerde farklılıklar gösterebilir. Bu olay, ürünlerdeki protein stabilitesine ve ürünün kalitesine zarar veren heterojen yapısal ve malzeme dağılım özellikleriyle sonuçlanabilmektedir [36]. Kalan su miktarındaki ve suyun tutulmasındaki değişiklikler, ısı transfer oranlarına ve formülasyon bileşenlerine bağlıdır. Süblimleşmeden sonra kalan yapısal su genellikle kurutulmuş yapıya emilir veya manitolün yarı kararlı bir hemihidrat polimorfunu oluşturur. Mannitol hemihidrat (MHH) oluşumu, dondurarak kurutma ile ilgili düşük sıcaklıkta meydana gelmesi muhtemel bir olgudur [37]. Dondurarak kurutmada ikincil kurutma, kalan suyu desorbe etmek için daha yüksek sıcaklıklarda (tipik olarak 5–20 °C) gerçekleştirilir. Bununla birlikte, kristal bağılı suyun ortadan kaldırılması zordur ve genelde protein stabilitesini tehlikeye atabilecek 60 °C sıcaklık gerektirmektedir. Öte yandan, (Mannitol hemihidrat) MHH'nin en büyük dezavantajı, depolama sırasında daha kararlı bir kristal polimorfa dönüşme eğiliminde olmasıdır. Kurutulmuş yapıdaki kristal suyu serbest bırakan bu, nihai ürünün stabilitesini tehlikeye atar ve uygunsuz bırakmaktadır [38]. Ek olarak, mevcut suyun artması ürünü yumuşatarak yapıdaki çözünenlerin hareketliliğini ve ilaveten, protein bozunma reaksiyonlarını kolaylaştırmaktadır. MHH (Mannitol hemihidrat) oluşumunda önemli husus ta, proses koşullarına ve formülasyona bağlıdır. Daha önce de tartışılan en belirgin MHH arttırıcı faktörlerden bazıları da, yüksek protein konsantrasyonu, düşük nispi manitol içeriği ve –20 °C'nin altındaki yumuşatma sıcaklıklarıdır [39]. Formülasyondaki manitol ve diğer eksipiyenler arasındaki etkileşimler, her bir bileşenle etkileşimin doğasına bağlı olarak manitol hemihidrat oluşumunu da teşvik etmektedir [40,41].

Dondurarak kurutma yöntemi, farklı literatürlerde bir tür mikro kapsülleme yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca gıda ürünü, ilaç ve hatta içeceklerde muhafaza etmek ve korumak için sıklıkla kullanılan mikrokapsülasyon yöntemi kullanılmaktadır.

Ayrıca sprey kurutma gibi çeşitli kurutma türleri de mikrokapsülasyon yöntemi adı altında sınıflandırılmaktadır.

Dondurarak kurutma, püskürterek kurutma, püskürterek granülasyon ve ek olarak lipozom yakalama tüm koruyucu teknolojiler hedefleri, besin maddelerini veya temel biyoaktif bileşenleri koruyup, ve depolama sırasında renk, lezzet kaybını önlemek ve hepsinden daha önemlisi ürün raf ömrünü uzatmaktadır [42,43].

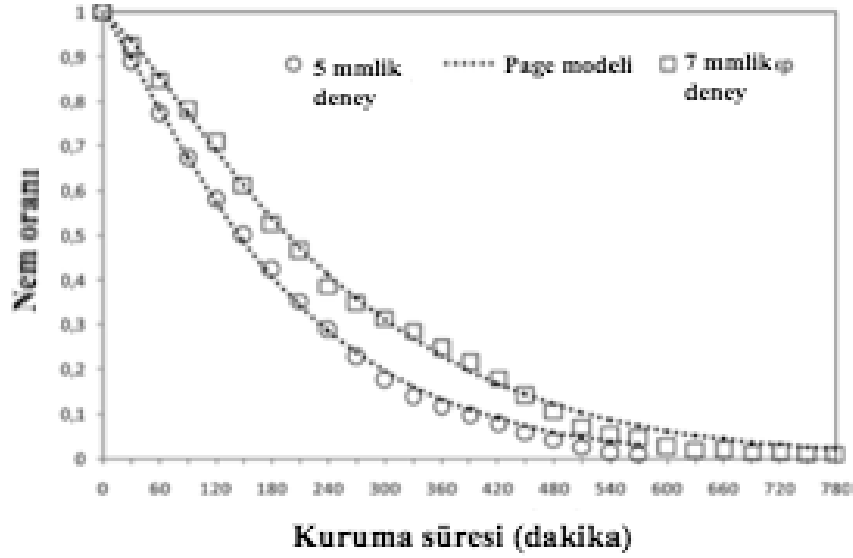
Aşağıda ilk Şekil 1 de olarak Ankara Gazi Üniversitesi'nin teknik eğitim bölümünde yapılmış olan geleneksel dondurarak kurutma deney düzeneklerinden biri ya da kısaca FDES olarak gösterilmektedir [4]. Kolayca anlaşılacağı gibi dondurarak kurutma sistemlerinin ana parçaları, yük hücreli ölçüm ekipmanları, raflı ve tepsili kurutma odaları, yoğunlaştırma ünitesi ve vakum pompası içermektedir.



- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Kurutma odası | 9 Kondansatör yüzeyi için termokupl |
| 2 pleksiglas kapı | 10 Sıkıştırılmalı soğutma ünitesi |
| 3 Aktarıcı | 11 Vakum pompası |
| 4 Kurutma odası için termokupl | 12 Sinyal dönüştürücü /E-700 |
| 5 Çilek içine yerleştirilen termokupl | 13 Veri kaydedici /E-680 |
| 6 Tepsiyeye yerleştirilmiş termokupl | 14 Bilgisayar/Yönetici 5.1 |
| 7 Tepsisi | 15 Elektrikli ısıtıcı |
| 8 Yük hücresi | |

Şekil 2.1. Konvansiyonel dondurarak kurutma kurulumu [4].

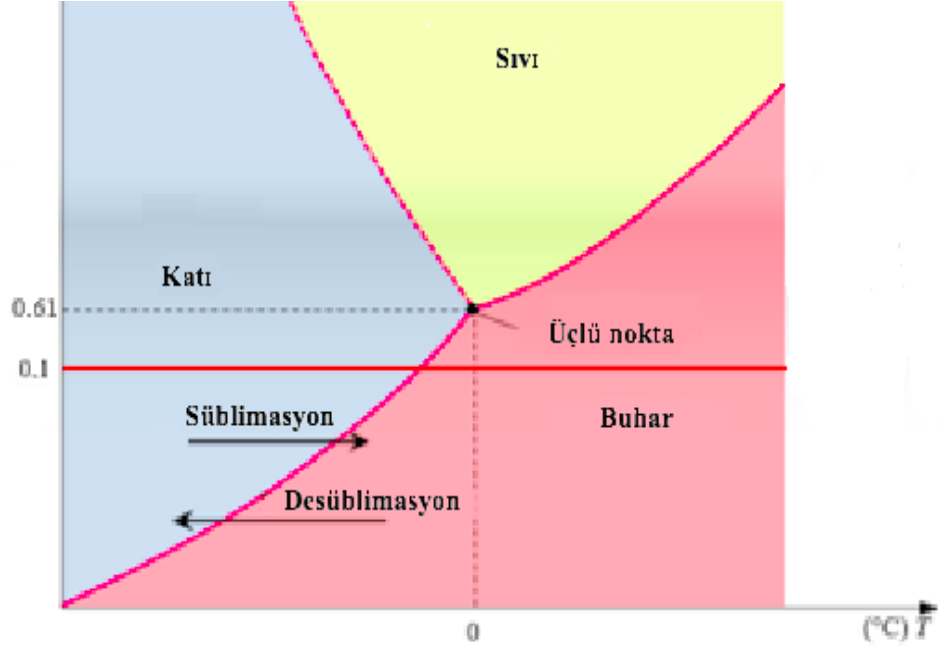
Dondurularak kurutulan farklı ürünlerde kurutma yöntemi, kuruma süresi ile ürün kalınlığı arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bahsedilen ilişkiyi kanıtlamak için farklı araştırma sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Örnek olarak Türkiye'de özel bir çalışmada sadece çilekler üzerinde yapılmıştır ve deney ürünü çilek olarak parçalarının bölündükten sonra, çileklerin et kalınlığı 5mm ve 7mm olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki grafik kalınlıklardan, kuruma süresinden ve nem oranından çıkarılmış ve gösterilmiştir [4].



Şekil 2.2. Deneysel ve Ampirik ürünler olarak çileklerin kuruma süresi, nem oranı ve hatta kalınlıkları arasındaki ilişkiyi göstermektedir [4].

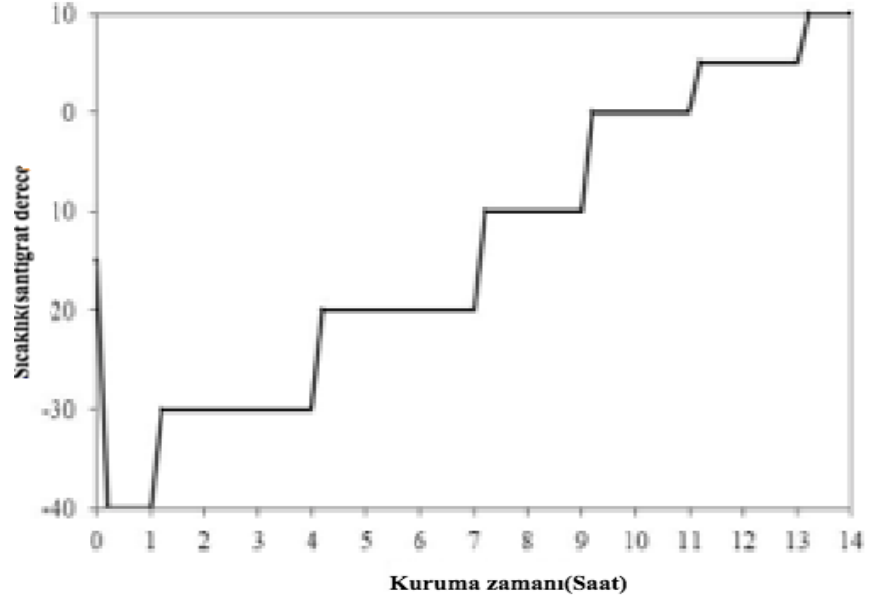
2.2. GELENEKSEL DONDURMA KURUTMA DENEYSEL AŞAMALARI

Dondurularak kurutma teknolojisine odaklanan tüm araştırmalarda öncelikle ürün numuneleri hazırlanır. Örneğin, havuç dilimlerinin kurutulmasına odaklanan özel bir çalışmada, araştırma makalesi yazarları tarafından hazırlanan örneklerin kalınlıkları 5 mm ve 7 mm bulunmaktadır [44]. Dr. Acar tarafından yapılan dondurularak kurutma durumunda safran kurutmada bile çiçek stigmaları olarak 1 g safran çiçeği örneği alınmıştır [45]. Numunenin belirlenmesinden sonraki ikinci adım olarak, hassas tartı tartımı ile bir gün veya 24 saat, buzdolaplarında saklanmaktadır. Sistemi daha iyi tanımak ve anlamak için dondurularak kurutma teknolojisinin temel mantığı aşağıdaki grafikte, grafik no 3te gösterilmiştir.

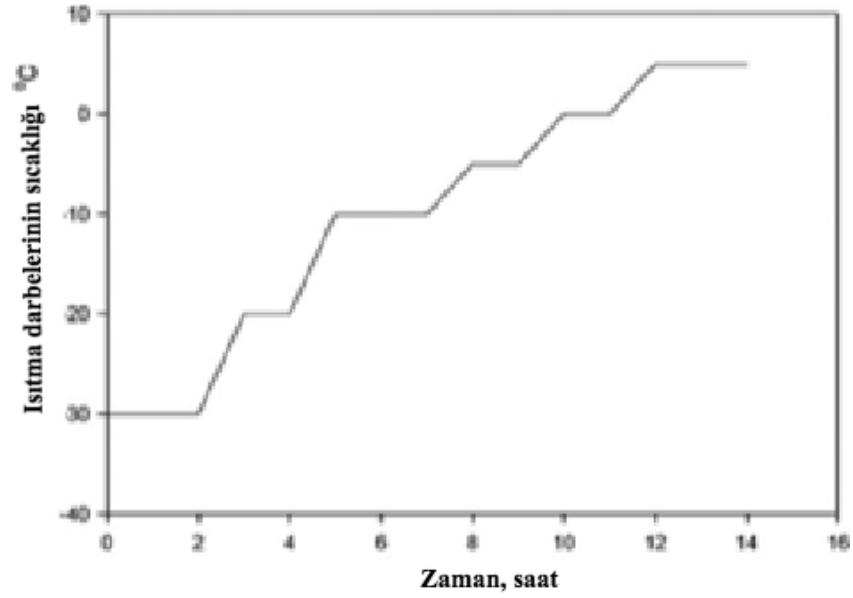


Şekil 2.3. Dondurarak kurutma tekniğinin prensibinin basitleştirilmiş grafiği [46].

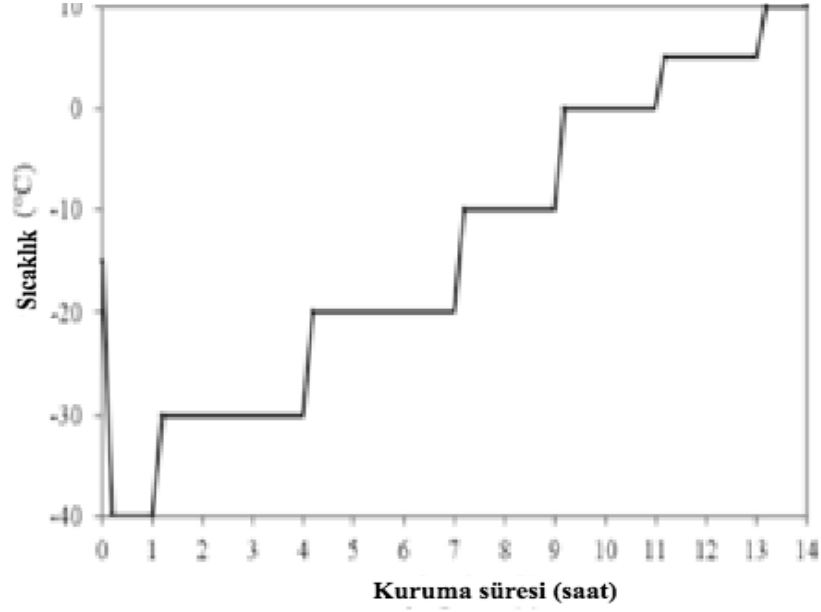
Numuneler buzdolabında bekletildikten sonraki aşamada dondurarak kurutma cihazında muhafaza edilmelidir. Bazı ulusal ve hatta uluslararası yazarlarda, Scanvac Coolsafe'i Labogene markası altında dondurarak kurutma cihazı olarak kullanmışlardır [44,46–50]. Dondurarak kurutmanın buharlaşma periyodundaki çalışma sıcaklığı, ürün cinsine, ısı ilgili hassasiyet ve dokuya bağlı olarak $-470\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ veya ($203.15\text{ }^{\circ}\text{K}$ ile $233.15\text{ }^{\circ}\text{K}$) arasında değişmektedir. Ürünler birkaç saat belirtilen düşük sıcaklıkta beklerken vakum aşamasına geçilir. Ürüne bağlı vakum gücü çoğunlukla 30 Paskal ile 60 Paskal veya (3×10^{-4} mbar ile 6×10^{-4} mbar) aralığında değişmektedir. Mantıksal olarak, birincil kurutma aşaması sırasında süblimleşmeyle sonuçlanan kurutulmuş malzemenin gözeneklerinden su buharı kütle akışını arttırmak için, kurutma odası basıncı numunenin buz buharı basıncının altına ayarlanmalıdır. Dondurarak kurutma tekniği ise donmuş ürünün düşük basınçta sıcaklığını artırarak süblimleştirme işlemine dayanır. Vakum pompası kurutma odasında istenilen basıncı düşürürken, kompresör kabin içindeki sıcaklığı ayarlar. Farklı numunelerin sıcaklık ve kuruma süresi arasındaki ilişki üfleme şekillerinde gösterilmiştir. Şekil 4, 5 ve 6 da, kurutma zamanı ile sıcaklık arasındaki ilişki havuc, safran ve Trabzon Hurması (Diospyros Kaki) nda gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı havuç örneklerinin 5 mm ve 7 mm kalınlıklarda kurutulmasında kuruma süresi ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi göstermektedir [44].



Şekil 2.5. Dondurarak kurutma tekniği altında safran bitkisinin sıcaklık profile [45].



Şekil 2.6. Trabzon Hurması (Diospyros Kaki) dilimlerinin dondurarak kurutma tekniği ile kurutulması sırasındaki sıcaklık değerleri [46].

Safran'ın dondurularak kurutulması çalışmasında ulusal araştırmacılar tarafından yapılmış ve kurutma süresini iki aşamaya ayırmışlardır. İlk kurutma kısmı kütle transferi sınırlı proses olduğundan ve hatta bahsedilen dondurarak kurutmanın ikinci adımı bile ısı transfer prosesidir. Safran araştırma makaleleri yazarlarının raporuna göre [45–47], ikinci prosedür gerçekleşirken, kurutulmuş tabakanın katı fazından suyun dehidrasyonu veya uzaklaştırılması, orta derecede yüksek oda basıncı kullanan matris ile kurutulmuş tabakanın ısı transfer kapasitesini artırarak artırılabilir. Normalde çoğu dondurarak kurutma araştırma makalelerinde, ayrıntılı ölçüm ve ağırlıklandırmaya sahip olmak için her saat veya iki saatte bir ölçüm yapılmış [44–47,51]. Belirli zaman aralıklarındaki dehidrasyondan sonrası, dondurarak kurutma tekniğinde belirlenen ısı ve basınçta numunelerin belirli bir etüvde 100 °C'den fazla sıcaklıkta birkaç saat bekletilmeden önce yapılması gereken çok hassas terazi ile tartılmasıdır. Bu vesileyle ürün dokusuna göre farklılık gösteren ve basıncın atmosfer basıncına göre ayarlanması ve son olarak bu yöntemle ürünler sabit bir ağırlığa ulaşacaktır. Bahsedilen tekniğin bir sonraki adımı, numuneleri fırından çıkarmak ve bir sonraki tartım prosedüründen önce uygun ve ortam sıcaklığına ulaşmak için desikatöre bekletmektir. Desikatör veya kurutma kabı, içi bol miktarda silika jel ile kaplanmış, kavisli camsı bir ekipmandır. Çeşitli araştırmalara göre, silika jel, silisyum dioksitin gözenekli formuna dayanan, nanometre ölçekli boşluklara ve

gözeneklere sahip alternatif silikon ve oksijen atomlarından oluşan ürünlerindedir ki düzensiz üç boyutlu bir çerçeveden oluşan ve havadaki nemin havadan bile uzaklaştırılmasına uygundur [52–54]. Malzemeleri desikatöre koymanın işlem ve amacı, ürünlerin nem içeriğini tamamen ortadan kaldırmak ve öte yandan dondurarak kurutma işleminin kontrolü için çift kontrol sağlamaktır. Bu şekilde elde edilebilecek, kurutulmuş ürünlerin sıvı ve sululuğunun doğru bir ölçümde olmasıdır. Teorik ve ampirik veya deneysel modeller birçok türde madde, malzeme ve hatta koşul üzerinde incelenebilir ve farklı sonuca varabilir. Bununla birlikte, birçok denklemlerin çözümü, bu tür modellerin kullanılabilirliğini azaltan çeşitli karmaşık yapıları içeren birçok faktörü gerektiriyor. Yarı teorik örüntüler çok fazla karmaşık yapıya sahip olmamasına ek olarak, denklemlerdeki faktörlerin sadece ilgili ürüne bağlı olması nedeniyle yukarıda belirtilen örüntülerin kullanımını sınırlandırılmıştır. Ayrıca deneysel yollarla elde edilen verilere göre kuruma oranının belirlenmesinde karmaşık matematiksel denklemler yoktur. Ancak denklemler yalnızca numune ve deney koşulları için geçerlidir. Yarı teorik modellerde en çok ve yaygın olarak kullanılan denklem "logaritmik kurutma" denklemi olarak bilinmektedir [55]. Havucun zamana bağlı değişimini gösteren boyutsuz bir terim olan nem oranı (MR) denklem (1) ile hesaplanabilir. Kurutma oranı (DR), denklem (2) kullanılarak da hesaplanabilir [56].

$$MR = \frac{M_t - M_d}{M_0 - M_d} \quad (2.1)$$

$$DR = \frac{M_{t+d_t} - M_t}{d_t} \quad (2.2)$$

Bahsedilen formüllerde, başlangıçtaki nemin M_t ve M_d zamanındaki nemin hayati göstergeleri olarak MR bile, farklı kurutma zamanlarındaki nem oranını gösterir ve DR, o andaki nem miktarını göstermektedir. Ürünlerin nem içerikleri kalıplandıktan ve zamana bağlı ağırlık kaybı veya kütle kaybı kaydedildikten sonra matematiksel modellere dayalı bir grafik çizildi ve farklı kurutma kinetik modellerinden en uygun olanı belirlendi. MATLAB programı bu işlemleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır [56]. Literatürde yer alan tarımsal ürünlerin kuruma özelliklerini ve

özelliklerini açıklamak için çeşitli matematiksel modeller kullanılmış ve bunlardan bazıları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kuruma eğrilerine uygulanan matematiksel modeller.

Sıra	Modelin Matematiksel Açıklaması	Model Açıklaması	İlgili Referanslar
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton	Ref [57–59].
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Ref [60–63].
3	$MR = \exp[(-kt)^n]$	Modified Page	Ref [64–66].
4	$MR = \exp[(-kt)^n]$	Modified Page	Ref [67–69].
5	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson ve Papis	Ref[70–72].
6	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	Ref [73,74].
7	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1t)$	Two-term	Ref [75–77].
8	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-k_1t)$	Two-term exponential	Ref[78–80].
9	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang ve Sing	Ref [69,81].
10	$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2$	Thompson	Ref [76,82,83].
11	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$	Diffision approximation	Ref [78,84].

Deneysel olarak bulunan modeller ile tahmin edilen nem değerleri arasındaki uyumu istatistiksel olarak açıklamak için tahminin standart hatası (RMSE), Khi-kare (X^2) değerleri ve modelin modelleme yeterliliği (R^2) aşağıdaki verilen denklemlerin yardımıyla bulunabilir [85,86].

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - z} \quad (2.4)$$

Sonuçta tahmini standart hata (RMSE), khi-kare (X^2) değerleri, modelin modelleme yeterliliği (R^2) uyumu istatistiksel olarak açıklamak için, deneysel olarak bulunan modeller ile tahmin edilen nem değerleri arasında açıklamak için uygundur.

Yukarıdaki çizelgede görüldüğü gibi bazı matematiksel modeller ve çalışma şekilleri yazılmıştır. Kurutma grafiğini ve ayrıca kurutma prosedürünü göstermek için farklı sayısal şablonlar bile bulunmaktadır.

Ürünlerin kuruma eğrilerine şablon olarak belirlenen matematiksel model belirlendikten sonra, ayrıca Fick'in ikinci difüzyon denklemi yasasına bağlı olarak, kurutma işlemi sırasında ürünün kütle etkin difüzivitesini hesaplanarak, üfleme resimli formülde azalan bir hız periyodunda hesaplamak, 4 numara olarak, kabaca gerekli tüm veriler dondurarak kurutma sistemlerini hesaplamak için kullanılmaktadır [44,45].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (2.5)$$

Denklem 5, difüzyon katsayısı Kartezyen koordinatlar için sabitlendiğinde ve uygun sınır koşulları ile sadeleştirildiğinde, Denklem 6 bulunur.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (2.6)$$

Yukarıdaki formüllerde, D_{eff} efektif yayılma gücü (m^2/s), t kuruma süresi (s), L numunelerin yarı kalınlığıdır m ve n pozitif bir tamsayıdır. İstenen tüm kurutma numuneleri için R^2 , X^2 ve RMSE hesaplandıktan sonra kurutma numunesinin kinetiği bulunmuştur.

2.3. DONDURARAK KURUTMA TEKNİĞİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

2.3.1. Avantajlar

Kalite perspektifi olarak, dondurarak kurutma tekniği ve bu yöntemle kurutulan ve rehidrate edilen ürünler, piyasadaki artan müşterilerin daha iyi ve daha sağlıklı ürünlere olan talebini karşılamak için önde gelen bir seçim olmaktadır 20.

Dondurarak kurutma, biyofarmasötikler için katı bir formülasyon elde etmek için en çok kullanılan kurutma işlemidir. Bazen peptitler ve proteinler, çözeltide uzun vadeli stabilitesini tehlikeye atan agregasyon ve bozunma reaksiyonları yaşarlar. Bu nedenle, ürünün stabilitesini artıran daha uzun bir raf ömrü sağlamak için katı bir formülasyon gerekli olmaktadır [87]. Bu nedenden dondurarak kurutma en mantıklı çözümdür. Ürünlerin dondurularak kurutma tekniği ile kurutulmasının avantajlarından birisi de, söz konusu tekniğin kullanıldığı rehidrate durumu sebze ve meyvelerde lezzet korumasının taze haşlanmış ürünlerle aynı kalitede olmasıdır [24]. Ayrıca dondurarak kurutma yönteminde kullanılan işlem sıcaklığının az olması nedeniyle vitamin ve besin miktarındaki düşüş diğer kurutma tekniklere göre daha az miktarda olduğu görülmektedir [24]. Dondurarak kurutma teknolojisinin çeşitli avantajlarından birisi olarakta, biyoteknoloji ve ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan liyofilizasyondur [88–90]. Liyofilizasyon tanımı olarak, gıda ürünlerini önce dondurarak ve emiş veya vakum altında çok düşük sıcaklıklarda kuruttuktan sonra, ürünleri susuz veya dihidrate bırakarak besin maddelerinin korunması işlemidir [91,92].

2.3.2. Dondurarak Kurutma Teknolojisinin Balık Yağı Özel Çalışmasında Diğer Kurutma Yöntemlerine Yönelik Özel Avantajı

Viskozite, yağ içeriği, katı konsantrasyonu ve emülsifikasyon gibi faktörlerden bazıları, yapılan veya hazırlanan emülsiyonların stabilitesinde çok önemli rol oynamaktadır. Ek olarak, emülsiyonların kararlılığı, kapsülleme etkinliğinin genişletilmesinde çok önemlidir; biyoaktif bileşenlerde kapsüllemeyi en aza indirmenin sağlamlığı da önemli hususlardandır [93,94]. Kapsülleme için bir açıklama kaydedilebileceği gibi, mikrokapsülün çoğu, bir duvar veya bariyer ile çevrili bir çekirdek eleman olarak bir merkez içermektedir [95]. Diğer kurutma teknolojisinin dezavantajı olarak, özellikle balık yağı durumunda sprey kurutmanın, balık yağının yüksek sıcaklıklarda açığa çıkarması ve bu da yağda oksidasyona yol açmasına not edilebilmektedir [96]. Püskürtmeli kurutucu için not alınacak dezavantaj, dondurarak kurutmayı avantaj haline getirebilir ve FD teknolojisini iyi bir alternatif kurutma yapabilir, çünkü düşük sıcaklık ve havanın yokluğu en düşük oksidasyon riskine yol açar [97]. Bununla birlikte, üzerinde dikkatle durulması

gereken önemli faktörlerden biri de işleme sırasında prosedür ürünlerin duvarında stres yaratabilir, duvar malzemesinde ayrıca gıda ürünlerinin duvar malzemesinin özellikle probiyotikler gibi hassas türlerin stabilize edilmesine yardımcı olmak için bir kriyoprotektan olarak işlev görmektedir [98].

2.3.3. Hurmaların Korunmasında Dondurarak Kurutma Yöntemlerinin Diğer Teknolojilere Yönelik Has Avantajı

Kurutma felsefesinin esası ürünü genişletmek ve ürünlerin raf ömrünü uzatmak olduğundan, o meyvenin raf ömrünü uzatmak ve tüketim alanlarını geliştirmek için dondurarak kurutma hurmanın kurutulmasında uygun teknoloji olacaktır.

Fizyolojik, mikrobiyal ve enzimatik bozulma, diğer kurutma teknikleriyle meydana gelen ve onları azaltak adına çoklu yöntemlere ihtiyaç duyan üreticilerin, dondurarak kurutma teknolojisini kullanark, bu dezavantajların hiçbirini içermez.

Trabzon hurması durumunda sıcak hava konvansiyonel kurutma yöntemini kullanılarak, başlangıç aşamasındaki daha yüksek kuruma hızı kabukta ve ürün yüzeyinde sertleşmeye, oluşum, şekil ve yapıda büyük düşüşlere, renk değişimlerine ve nihayetinde büyük kalite kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen işlemi önlemek ve hurmayı kurutmak için en kullanışlı teknoloji dondurarak kurutma tekniğidir. Gerçi, dondurarak kurutma teknoloji ve tekniğin dezavantajı olarak belirtilebilecek uygun maliyetli olmamasıdır, ona rağmen, hassas ürünlerin kurutulması için (freeze-drying) FD'nin özellikle doku, renk, kalite ve besin maddelerindeki üstün benzersiz yönleri dondurarak kurutma işlemi avantajlı kılmaktadır, ve bu şekilde gıdaların kurutulması en az hasar ile yapılabilmektedir [46,99].

2.3.4. Farmasötik Ürünlerde Diğer Kurutma Yöntemleriyle Dondurarak Kurutmanın Eşsiz Avantajı

Dondurarak kurutma, çeşitli araştırmacılar tarafından katı dispersiyonların hazırlanmasında araştırılmıştır [100–102]. Birçok çalışma, sprey kurutma gibi

farmasötik ürünlerin üretilmesinde farklı kurutma yöntemlerinin kullanımını, özellikle XM-GLU katı dispersiyonları üzerindeki etkilerini araştırmıştır [103]. Yazarlar, sprej kurutma tekniğinin piroksikamın çözünmesini işlenmesini iyileştirmek için (Piroxicam, artrit gibi ağrılı enflamatuvar durumların semptomlarını hafifletmek için kullanılan oksikam sınıfından nonsteroidal bir anti-inflamatuvar ilaçtır) ve ayrıca toz yükündeki azalma nedeniyle tozun işlenmesine sebep olmaktadır [103]. Ekonomik görünüm olarak veya başka değışte ekonomi açısından, farmasötik ürünlerin ısı ile kurutma esnasındaki, ısı etkisini araştırmak çok önemlidir. Ayrıca spesifik çalışmada araştırmacılar, kurutma işleminin sprej kurutma ve dondurarak kurutma teknolojileri ile yapıldığı bir anti-solvent kristalizasyon tekniğinin etkisini araştırdılar. Bu araştırma üzerine yazarlar, farmasötik ürünler üzerinde sprej kurutma ile kurutmanın olumsuz yönlerini bildirmişlerdir [104]. Dondurarak kurutma yönteminin avantajlarından biri olarak, Glutamik asit veya basitçe GLU ile dondurarak kurutmanın Piroxicam veya sadece PXM'nin çözünmesini iyileştirdiğinden bahsedilebilir. Piroxicam, dondurarak kurutma işlemi sırasında bazı polimorfik değışiklikler geçirdi ve bu, Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi veya sadece DSC izleri ve X-ışını toz kırınımı veya basitçe XRPD kırınım modelleri ile doğrulanmaktadır [105].

2.3.5. Safran

Dondurarak kurutma teknolojisinin en önemli avantajlarından biri, ısıya duyarlı veya ısıya hassas ürünler, ince kimyasallar ve diğere geleneksel kurutma teknolojilerinde ve tekniklerinde kalitelerini ve etkinliklerini kaybedebilecek olan bazı farmasötikler, güvenle dondurularak kurutulabilmektedir [90,106]. Geleneksel olarak renklendirici veya aroma verici olarak kullanılan safran, bitkisel bir ilaç olmasının yanı sıra dünyanın en değerli ve pahalı tarım ürünlerinden olduğundan dolayı bu değerli ürün için kurutma yönteminde minimum ürün israfı olacak şekilde tercih edilmelidir. Ürünün son teslim istasyona kadar, paketleme olarak safranın işlenmesinin olumlu sonucu almak için, çoğunlukla safran ve crocin miktarının korunmasına bağlıdır.

Acar tarafından yapılan özel bir çalışmada, dondurarak kurutma teknolojisinin, safranın minimum Safranal ve Crosin kaybıyla kurutmak için en iyi seçim olacağı

gösterilmektedir. Safranal, safran çiçeklerinin stigmalarından ve safran aromalarının ana kısmından oluşan bir baharat olup safrandan izole edilen organik bir bileşiktir. Crocin için tanım olarak, bitkinin renklendirici kısmı olarak önemli rol oynayan safranın ana kısımlarından biridir. Daha önce de belirtildiği gibi dondurarak kurutma teknolojisi çok verimlidir, ancak maliyet etkin bir teknik değildir, Safran kurutmada yüksek dondurarak kurutmanın fazla maliyeti, nihai kurutulmuş ürünlerdeki Safranal ve Crocin miktarlarının kaybını en aza indirerek telafi edilebilmektedir [45]. Ayrıca Dr.Acar tarafından yapılan ayrı bir çalışmada, dondurarak kurutma teknolojisi ile kurutulan safran örneklerinin Safranal ve Crocin, miktarının, güneş altında doğal olarak kurutulan aynı numuneler 5 kat, ayrıca %40 daha fazla olduğu gösterilmiştir [47].

2.3.6. Dezavantajları

Dondurarak kurutma (FD) teknolojisi ile kurutulan ürünlerin kalitesi diğer kurutma teknolojilerine göre daha iyidir. Her ne kadar FD teknolojisinin avantajları olursa da, süreç olarak, daha fazla zaman alan tek aşamalı değil, çok aşamalı bir süreç olduğundan, diğer kurutma sistemlerine göre daha yavaş, hatta maliyet açısından diğer geleneksel yöntemlere kıyasla daha pahalı olduğundan bahsedilmektedir [107]. Dondurarak kurutma işleminin olumsuz noktaları olarak adlandırılabilir de, bu işlem maliyetli, zaman çok fazla alıcıdır ve biyolojik olarak stabilite sağlayan istenen kalite özelliklerine sahip dondurularak kurutulmuş bir ürün elde etmek için aktif maddede optimal bir dizi işlem koşulları ve formülasyonu gerekmektedir [87].

BÖLÜM 3

VAKUM KURUTUCU

Vakum kurutucular nem miktarını azaltmak için en Önemli yöntemlerden biridir. Adı geçmiş kurutucu çeşitli sektörlerde uygulanıp ve kurutma uygulama teknikleri ve teknolojilerinden Biridir. Ayrıca, kurutucuların nihai ürünü pullar, granüller, tozlar ve hatta tabakalar şeklinde veya üreticinin gereksinimlerine bağlı olarak farklı formlarda bulunmaktadır [108]. Vakumlu kurutma tekniğinin açıklaması olarak, bu prosedürlerin gıdayı düşük basınçta kuruttuğu ve bunun düşük sıcaklıklarda gıda maddelerinin neminin buharlaşması azaldığında gerçekleştiği kabul edilmektedir. Bu teknikte gıda maddelerinin kurutulması için ısı kaynağı olarak iletim ile gerçekleşen ısı transferi önemli bir rol oynamaktadır [108] .

Vakumla kurutma veya basitçe VD, ısıya hassas, hatta renk değiştirme potansiyeli olan, besinlerden, lif içeriklerinden yoksun bırakan gıda ürünlerini faydalı kurutma yöntemidir. Vakumlu kurutma, gıdalarda oksidasyon prosedürünü önlemesi ve bozunmayı önlemesi nedeniyle yüksek miktarda biyoaktif kombinasyonlu gıda personelinin kurutulmasında titizlikle kullanılmaktadır [109]. Vakumla kurutma, gıda, kimya, ilaç vb. gibi farklı endüstri türlerinde, kurutulmuş bir ürün elde edilirken nemli ürünlerden suyu uzaklaştırmak ve ayırmak için kullanılmaktadır [110]. Ayrıca vakumlu kurutucunun kullanım alanı, işlenen gıdanın özelliklerine ve istenen nihai ürüne bağlıdır [111]. Vakumlu kurutucuların enerji tüketimindeki en önemli ve etken faktörler Şekil 1 de gösterilmiştir. Devasa ısı ve sıcaklık miktarlarından zarar görecektür ürünler için vakumlu kurutucu, iyi bir seçenek olup ve uygulanabilmektedir. [112]. Vakumlu kurutucu teknolojisi, iyileşme gerektiğinde yangın ve/veya patlama tehlikeleri olduğunda iyi alternative olarak kullanılabilir [113]. Bununla birlikte, vakumlu kurutucularında bir çok ekstra ve fazla ekipmana ihtiyaç duyulmaktadır. Kurutucunun seviye kontrol aleti, ürün kalite kontrol cihazı ve hatta hava kilitleri, vakum pompaları ve kondansatörler gibi ek cihazlara olan talep nedeniyle ekstra maliyetli olmaktadır [113] .Vakumlu kurutucuda çalışma prensibi

olarak, malzemelerin kurutulması esnada ısı ve sıcaklığı azalmasına sebep olup ve sonuçta ortam basıncının azalmasına neden olmaktadır [114]. Vakumlu kurutucu özelliklerinden birisi de, çözücü içeren katı ürünlerden çözücü (solvent) geri kazanımı için uygun olan termo-labil malzemelerin düşük sıcaklıkta kurutma seçeneği sunmasıdır. Genelde ısı, ilk özgün şeklindeki vakum kurutucunun gösterildiği gibi, kolayca görülebileceği boş veya boş bir raf, tepside buhar veya sıcak ve hatta sıvı şekilde geçirilmesi sağlanmaktadır [114].



Şekil 3.1. Farklı laboratuvar türlerinde ve hatta çeşitli pilot ölçekli çalışmalarda yaygın olan çoklu tepsili vakumlu kurutucu [114].

Vakum işlevinin kurutmaya nasıl yardımcı olabileceğini anlamak için aşağıdaki denklem netleştirilmiş bir kurutma teorisini göstermektedir:

$$Q=UA\Delta T \quad (3.1)$$

Ukardaki formülde veya başka bir deyişle, Fourier Yasasına istinaden" Q, İngiliz termal birimlerinde veya basitçe BSI'da Btu/hr ve bir ISO standardına göre W, J/s anlamında ve toplam ısıyı ifade etmektedir. U, toplam ısı transfer katsayısına eşittir (W/(m²K), Btu/(ft² hoF). A, ısı transfer alanıdır (m², ft²). Son olarak, ΔT, vakumlu kurutucuda buharlaşma sıcaklığı ile ısıtma ortamının sıcaklığı arasındaki sıcaklık

farkı anlamına gelen sıcaklık gradyanı veya malzeme üzerindeki farkı göstermektedir (°C, °F) [115].



Şekil 3.2. Vakumlu kurutucularda enerji tüketimi [108].

3.1. VAKUMLU KURUTUCULAR ÇEŞİTLERİ

Vakumlu kurutucular dört çeşit vakumlu kurutma içermektedir:

- Karıştırmalı tavalı kurutucular,
- Çift konili kurutucular,
- Vakum bantlı kurutucular,
- Vakumlu raf kurutucular.

3.1.1. Karıştırılmış Tava Kurutucular

Karıştırmalı vakumlu kurutucular olarak da adlandırılan bu tür kurutucular, beslemenin yerleştirildiği sabit ve sabit ısıtmalı zanaatlara dayanmaktadır. Bu tip vakumlu kurutucular genellikle mikserler ile donatılmaktadır [110].

3.1.2. Çift Koni Kurutucu

Tamburlu konili kurutucular veya başka bir deyişle, çift konili vakumlu kurutucular, beslemenin karışmasını arttırmak için hammaddelerin kaba yüklenildiği esnada döner kaplar ile, ayrıca ısınan duvarlarla temas içermektedir [110].

3.1.3. Vakum Bantlı Kurutucular

Vakum kemerli kurutucular veya basitçe vakum bantlı kurutucular, hammaddeyi yavaşça ürün analizi bölümüne aktarır, ardından nihai ürünü serbest bırakılan ısıtılmış bant içeren kısımdan teslim etmektedir [110].

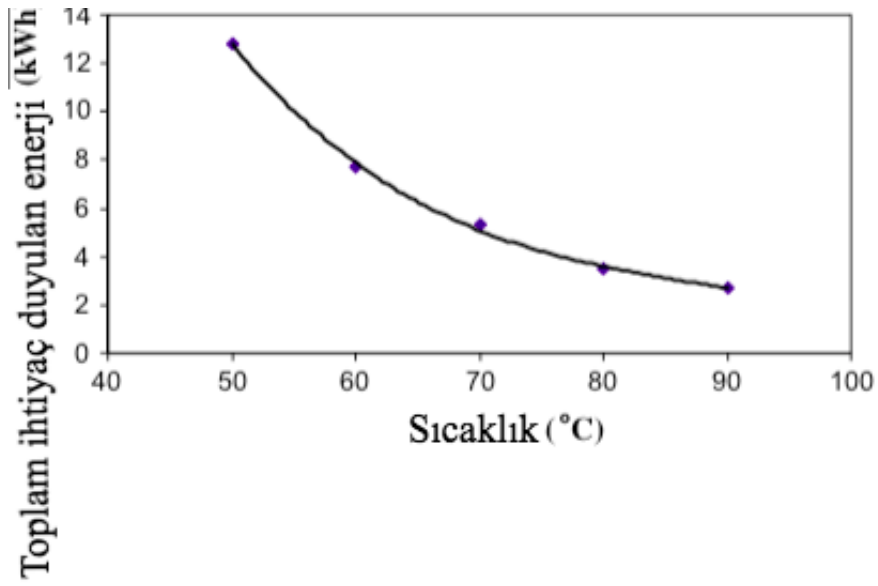
3.1.4. Vakum Raf Kurutucular

Tepsi vakumlu kurutucu veya özellikle vakumlu raf kurutucu, ısıtılmış raflardan veya tepsilerden oluşmaktadır ve genelde besleme tepsisini birleştirmek için üniteler içermemektedir. Bu nedenle gerektiğinde kurutulan ürünlerin aglomeraları ünite dışında parçalanmakta ve bölünmektedir [110].

3.2. VAKUM KURUTMADA EN ÖNEMLİ FAKTÖRLER

Kurutma odasının sıcaklığı, vakumlu kurutucularda enerji tüketimin miktarını etkileyen en önemli unsurlardan biridir [116]. Şekil 2’de gösterildiği gibi, vakumlu kurutucularda sıcaklık enerjisi tüketiminin miktarındaki etkisi önemli payı bulunmaktadır. Vakumla kurutmanın hızının artmasında etkili faktörlerden birisi de ohmik ısıtmadır. Dr. Zhong ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, ohmik ısıtmanın vakumlu kurutma teknolojisinin üzerindeki etkisi detaylı şekilde araştırıldı. Ohmik olarak derecelendirilmiş tatlı patates modellerinin kurtuma hızının tüm elektriksel kuvvet alanında (ESF)(Electrical Strenght Field) ve ayrıca son nokta sıcaklık işleminde veya basitçe EPT (End Point Temperature treatment) karışımlarında daha hızlı olduğunu tanımlamışlardır. Belirtilen çalışmada, maksimum hız farklılaşması 70 V/cm olarak elde edilip ve son nokta sıcaklık muamelesi miktarı (EPT) 60° C olmuştur. Ayrıca en düşük omik ısıtmanın yanı sıra

EFS=50V/cm; EPT=45° C, vakum momentinde kayda değer bir azalmaya (%22–24) öncülük etmektedir. Ohmik ısıtmanın artı noktası olarak, vakumlu kurutma hızının arttırılması ve uzaklaştırma verimlerinin iyileştirilmesi gibi, süper kritik sıvı ekstraksiyonu gibi uygulamalar için en iyi mümkün seçenek olup, ve biyolojik ürünlerden yüksek değerde olan pratik bileşenlerin geliştirilmesinde kayda değer ve mühim olabilir, bu vesilede adı geçmiş öge önemli bir ekonomik ve ürün kalitesi çıkarımına sahip olmaktadır [117].



Şekil 3.3. Vakumlu kurutucuda tüketilen enerji miktarında sıcaklığın reaksiyonu [116].

3.3. VAKUMLU KURUTMALARIN KURUTMA İLKELERİ

Vakumlu kurutma, iki süreçli kurutma süresiyle tanımlamakta olup, vakumlu kurutmada bu süreçler, sürekli kuruma süresi ve azalan kurutma süresi olarak belirlenmektedir [109].

3.4. VAKUMLU KURUTUCULARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

3.4.1. Avantajlar

Vakumlu kurutucunun ıslak katılar ve maddeler, özel karışımlar, biyokatılar ve çok farklı ürünler çikolata, et ve sebze özleri ve hatta meyve suları gibi çeşitli gıdalar gibi her tür mahsul için kullanılacak çeşitli üstünlükleri bulunmaktadır [118]. Vakumla kurutma, kullanılabilir bir mekanizasyon ve yöntemdir ki yıllardır çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. İlaç, gıda, plastik ve tekstil üretimleri ve endüstrilerinde, üstelik diğer Kimyasal Proses Endüstrilerinde (CPI: Chemical Process Industry) geniş alanlarda kullanılmaktadır [109]. Yüksek değerli gıda ürünlerinin sınıflandırılması yeralan ürünler ki hızlı şekilde hava ile reaksiyona girmekte olup, vakumla kurutma ile kurutulabilir veya sudan arındırılabilir [119]. Vakumlu kurutucunun geleneksel sıcak hava yöntemlerine göre en çok vurgulanan avantajlarından bazıları, malzemelerin nihai ürününün yüksek kalitede olmasıdır, çünkü vakumlu kurutucu daha iyi enerji verimliliğine, kurutma verimliliğine, hijyene ve daha iyi ısı transfer oranlarına sahip olduğundan, daha iyi ısı transfer oranları, malzemenin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca dehidrasyon veya sudan uzaklaştırma süresi bu yöntem ile azalmaktadır [120–126]. Vakumlu kurutma yöntemiyle kurutmanın avantajlarından biri bile, bu teknoloji tipi ile kurutulmuş ürünler, meyve ve sebzelerin genel olarak tercih edilmesidir, çünkü hava ile kurutulmuş ürünlerin ve onların beslenme ve aroması, ham ürünlere yakın bir kaliteye sahip olduğu için tercih edilmektedir [127,128]. Ayrıca, Çizelge 3.1’de dolaylı kurutucular için seçim kriterleri gösterilmiştir [129].

Çizelge 3.1. Dolaylı kurutucuların alınmasının standart ve norm seçenekleri [129].

Kurutucu Tipi	Plaka	Tambur (Drum)	Tamburlu (Tumble)	Titreşimli	Konik	İnce film	Paletli	Mikser- yoğurucu
Gereksinimler								
Sürekli	İ	İ		İ	UD	İ	İ	İ
Süreksiz	UD	UD	İ	UD	İ		İ	İ
Vakum	İ		O		İ	İ	İ	İ
Geniş yüzey alanı ve geniş hacim	O	BU	BU	BU	O	İ	O	İ
Yüksek özgül kapasite	O	İ	BU	İ	O	İ	O	İ
Malzemeler								
Gevrek	İ	UD	İ	İ	İ	O	İ	İ
Sıvı	UD	İ	UD	UD	UD	İ	BU	İ
viskoz/macun su	UD	İ	UD	UD	UD	UD	BU	İ
Sert (Kabuklu)	UD	UD	UD	UD	UD	BU	O	İ
İşlem								
Mekanik	İ	İ	İ	BU	İ	O	O	O
Termal	O	BU	BU	O	O	BU	BU	BU
UD=Uygun Değil, BU= Bazen Uygun, O = Okey, İ = İdeal								

Vakumlu kurutma prosedürü, düşük sıcaklıklarda bile sıcak olmayan sıcaklıklarda suyun uzaklaştırılmasını ve nemin buharlaşmasını artırmayı mümkün kılmaktadır [110]. Çizelge 3.1’de rahatlıkla görülebileceği gibi, plakalı, konik, ince film, paletli(kürekli) ve mikser yoğurucu tiplerinde vakumlu kurutucular diğer tiplere göre çok daha idealdir, ver her durumda yeterli olup ve uygun olmaktadır. Vakumlu kurutmanın en önemli değeri, ve avantajı, enerji korumasıdır, bu kurutucularda,

kurutmak için daha az enerji gerekir, kurutulmuş ürünlerin depolaması, veya diğer amaçlara göre bağlı ekonomik ve çevresel maliyetleri az olmaktadır. Vakumlu kurutma işlemleri ayrıca diğer kurutma tekniklerinden daha hızlı çalışma eğilimindedir ve daha fazla ürünün hızlı bir şekilde işlendiği bazı potansiyellerde prensip olabilen saflaştırma ve damıtma sürelerini kısaltmaktadır. Vakum kurutmanın en önemli avantajlarından biriside, bu yöntemde kurutulan malzemeler dehidrasyon (sudan uzaklaştırma) süresi boyunca daha az zarar vermektedir. Ancak bazı ürünler, dehidrasyon işlemi sırasında ısı iletiminden dış katmanlarında sert, kösele oluşumu gibi yüksek sıcaklıklarda sorunlar ve arızalarla karşılaşabilir. Vakumla kurutma, yerel ögenin bütünlüğünü ısıyla zarar vermeden koruma ve muhafaze etme eğilimindedir. Gıda ve farmasötik vakaları söz konusu olduğunda, diğer kurutma işlemleri kaliteyi düşürebileceğinden ve gıda ışığını ısıya duyarlı ilaç ürünlerinin çekici gücü haline getirebileceğinden, referans verilen vakum tekniği değerli olabilir [109]. Ayrıca, vakumlu kurutma teknolojileri ve cihazlarının kullanılması, çalışanların tehlike azaltıp ve diğer yöntemlere göre çalışan teknesiyenlerini güvenini sağlar. Diğer kurutma tekniklerini kullanarak, çıkış gazları(emisyon gazlar), dumanlar ve bunların partikülleri ve nanopartikülleri, teknisyenlerin ve operatörlerin hastalanmasına veya hatta kurutma ekipmanı parçalarıyla çalışırken insanları kendilerini korumak zorlamalarına neden olabilir. Ancak, vakumlu kurutma kullanan firmalarda havalandırma zorunluğu oluşmayacaktır. Ayrıca vakumlu kurutucu operatörleri ve teknisyenleri, kurutucuların çalışma esnasında, makinanın çıkış gazlarından zehirlenmeyecektir. Her şeyden önce, vakumlu kurutma yönteminde, ekstra kullanım için dehidrasyon ve kurutma sırasında toplanan nemi alınarak başka alanlarda kullanmak için uygundur [114]. Vakumlu kurutma prosedürleri ile ilgili olarak, ısıya dayanıklı maddelerin düşük sıcaklıkta dehidrasyonunu sağlarlar ve çözücüler dahil katı malzemelerden çözücü geri kazanımı için tatmin edici bir prosedürdür [114].

3.4.2. Dezavantajları

Hammaddeleri vakumlu kurutmada kuruturken, haznede oksijen olmaması, gıda ve çeşitli tarım ürünlerinde istenmeyen tepkilerin azalması nedeniyle kurutulan gıdanın kalitesi diğer tekniklere göre daha yüksek olmaktadır [116–126,128–130]. Başka

tekniklerin diğer dezavantajlarından biri de, dehidrasyon için vakumlu kurutucu uygulandığında, ham maddeler ve ürünler bu teknoloji ile kurutulduğu takdirde nihai ürünün şişirilmesine yol açabilmektedir. Sonuç olarak, hacim ve yüzeyin genişlemesi açısından ürünün şişmesine yol açarak, madde ile kuruyan hava arasında daha fazla ısı transferinin hapsedilmesine neden olmaktadır [131]. Yüksek enerji tüketimi, vakumlu kurutucuların diğer olumsuz yönlerinden biridir. Ayrıca vakumlu kurutucuların olumsuz yönlerinden biri de bu tip kurutucuların diğer kurutucu tiplerine göre daha fazla metal tüketimi ve ekipman olarak gerektirmesidir [132]. Vakumlu kurutucuların nihai ürünü, mikrodalga kurutuculara veya başka tür kurutuculara kıyasla iyi kaliteye sahiptir; Ancak her türlü ürüne kullanmamaktadır, ve sadece hassas ve katma değeri yüksek ürünleri kurutmak için kullanılmaktadırlar [116,130].

Vakumlu kurutucular, vakumun pompası olarak bir pompa içermektedir. Cihazdaki pompa kurutulması gereken hammadde veya maddenin yüklendiği zaman, buharlaşan buharın pompanın önünde bulunan bir kondenserde sıvılaştırıldığı hazneye bağlı olarak çalışmaktadır. Vakuumlu kurutucuların, belirli ve istenilen sıcaklıklarda çalışmaları için hammaddenin ısıtılmış bir yüzey ile temas ettirilmesi ve burada iletken olarak yapılacak olan hammaddeyi kurutmak için ısı transfer şekillerinin yapılması gerekmektedir. Nar taneleri ve mantar dilimlerin numunelerin kurutulmasında, vakumlu kurutucu ve mikrodalga kurutucu tekniklerinde faydalanan bir çalışma, iki kurutucunun arasındaki enerji tüketim miktarı üzerine yapılan araştırmalar, vakumlu kurutucu maksimum enerji kullanıma sahip olduğunu göstermektedir [116,133]. Farklı kaynaklarla karşılaştıran özel bir çalışmada, vakumlu kurutucu ve sıcak havayla kurutma yapan bir kurutucu karşılaştırıldı, belli bir sıcaklıkta örnek olarak 40 °C'de, iki farklı kurutma yöntemlerin arasında, vakumlu kurutucu daha verimli olmaktadır. Adı geçmiş durumun nedeni, daha büyük termal gradyan katkısına neden olan vakumlu kurutucudaki artan sıcaklık ve sonuç olarak kurutma süresini ve dahası enerji tüketimini azaltan nemin hızla uzaklaştırılmasıydı [133]. Ayrıca, vakumlu kurutuculara ait CO₂, NO_x ve SO₂ gaz emisyonları, vakumlu kurutuculara ve diğer kurutucuların arasındaki en yüksek gaz emisyonlarını göstermektedir [134]. Vakumlu kurutucular, çiftçiler ve üreticiler arasında çok popüler kurutucular sınıflandırılmasına girmemektedir. Düşük

kapasiteli oldukları ve çok miktarda ürün için uygun bir seçim olmadıkları ve sadece az miktarda ürünü kurutmak için kullandıkları için popüler olmamaktadır [134].

Spesifik çalışmada, bazı araştırmacılar, farklı teknikler ile kurutulmuş ürünlerinde yoğun esmerleşme oluşturan renklerin sarılığını netleştirmek için Hunter Lab kroma-metre kullanarak renk ölçmelerini incelemişlerdir. Hunter Lab kroma-metre cihazı sebze ve meyveler üzerinde deneldi ve en iyi sonuç dondurarak kurutma tekniği olduğu gösterilmekte fakat vakumlu kurutma ürün şeffaflığında son sırada yer almaktadır [135].

3.5. HİBRİT SİSTEMLER

Hibrit sistemler, en iyi sonuca ulaşmak için ısı transferi ve dehidrasyon (sudan arındırma) için birden fazla kurutma tekniği ve yöntemi kullanmakta ve ayrıca tek teknoloji türlerinden daha az enerji kullanmaktadır [136]. Bazen geleneksel veya sıradan kurutma sistemleri, aşağıda gösterildiği gibi geleneksel olmayan veya sıradışı kurutma teknolojileriyle birleşir; akışkan yatak + ısı pompası, vakumlu kurutma + mikrodalga kurutma, vakumlu kurutma + püskürtmeli kurutma da, böylece farklı kurutma teknolojileri ve yöntemleri kombinasyonları tanımlanabilmektedir [137]. Yukarıda bahsedildiği gibi, hibrit sistemleri kullanma ilkesi, enerji verimliliğini artırmak ve düşük kaliteli nihai ürün ve sığ enerji verimliliği faktörleri gibi sıcak hava geleneksel kurutma sistemleriyle ilişkili olumsuzlukların üstesinden gelmektedir [138,139]. Çizelge 2’de, farklı hibrit kurutma teknolojilerinin enerji verimliliğini özetleyen bir çizelge olarak numaralandırılmıştır [108].

Çizelge 3.2. Enerji verimliliği açısından bazı hibrit kurutma sistemlerinin karşılaştırılması.

Sıra	Kurutma tipi	Kurutma numunesi	Enerji verimliliği η (%)	Referanslar
1	Solar- Biyokütle Kurutucu	Bamya, Yerfıstığı, Yam cipsleri	0.23–16.04	Ref [140].
2	Biyokütle Isıtıcı + Güneş	Kaju Fıstığı	5.08	Ref [141].
3	Konveksiyonel Kurutma + Mikrodalga	Ekşi Kirazlar	8.77–10.03	Ref [142].
4	Isı Pompası + Fotovoltaik Termal Kurutucu	Safran	10.8–72	Ref [143].
5	Güneş + Termal Raf	Siyah Zerdeçal	12	Ref [144].
6	Mikrodalga-Kızılötesi Konvektif Kurutma	Yeşil Biber	13	Ref [145].
7	Tünel + Fotovoltaik-Güneş	Nane Yaprakları	16.32	Ref [146].
8	Sıcak Hava + Güneş Kurutma	Domates	17–29	Ref [147].
9	Sıcak Hava + Döner Kurutucu	Tuzlu gümüş benekli geniş balığı	17–44	Ref [148].
10	Gaz Yakıtlı + Güneş Kurutucu	Soğan, zencefil, lahana	42.79	Ref [149].

Çizelge 1’de bahsedilen verilere bakıldığında, hibrit sistemleri yaratıcı olup ve rahatlıkla kullanabildiği görülmektedir. Ayrıca ürünleri kurutmak için tek teknolojik sistem yerine enerji verimli kurutma teknolojisi sistemi kullanılmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi arı, çevre dostu ve hatta ucuz bir enerji kaynağı olduğundan dolayı, güneş enerjisi ve vakumlu kurutma teknolojisinin hibrit system kombinasyonu olarak, kurutma teknolojisinde iyi bir alternatif hibrit sistem olabilmektedir. Çizelge 3’te, vakumlu kurutucu hibrit kurutucu olarak ilaveten asıl kurutucu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Ana kurutucunun VD (Vakumlu Kurutucu) olduğu farklı hibrit sistemlerde enerji verimliliği miktarı.

Sıra	Vakumlu Kurutma Tipi	Kurutma numunesi	Enerji verimliliği	Referanslar
1	MW + VD	Probiyotik ürünler veya fermente ürünleri	$\eta=27\%$	Ref [150].
2	VD	Nar suyu	$\eta = 14.9\%$	Ref [151].
3	VD+Ohmic heating	Nar suyu	$\eta = 24.76-42.78\%$	Ref [151].
4	VD	Papatya çiçeği	$\eta = 1.42-6.53\%$	Ref [134].
5	MW+VD	Çay yaprakları	SEC değerleri 1.90–9.75 kWh/k	Ref [152].
6	MW+VD	Çilek	SMER değerleri 1.30×10^{-3} - 2.30×10^{-3} kWh/g	Ref [153].
7	VD	Mantar	SMER değerleri 3.36–9.60 kWh/kg	Ref [116].
8	MW+VD	Mantar	SMER değerleri 41.97–124.34 kWh/kg	Ref [154].
9	FD + VD	Bamya	SMER değerleri 21.3 kWh/kg	Ref [155].
10	MW+VD	Bamya	SMER değerleri 4.38 kWh/kg	Ref [155].
11	MW+VD	Mantar	SMER değerleri 10.75–21.3 kWh/kg	Ref[156].

Çizelge 3.2'den de kolayca anlaşılacağı gibi, ilk ham haldeki Probiyotik ürünler veya fermente ürünleri mikrodalga ve vakumlu kurutma ile hibrit olarak kurutulmuştur, bu hibrit teknolojinin enerji verimliliği yaklaşık %27'dir ki bu miktar çok fazla değil ancak diğerlerine göre daha iyi seviyede olduğu görülmektedir. İkinci sırada vakumlu kurutma olan tekli kurutma teknolojisi yer almıştır ve hatta Dr. Çokgezme ve arkadaşları kabul ettiği gibi, tekli kurutmaların verimleri Çizelge 3.3'te yazıldığı gibi kabaca %14.9 olduğunu kabul edilmektedir. Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi, Dr. Çokgezme ve arkadaşları tarafından nar suyunu kurutmak için vakumlu kurutma ve Ohmik ısıtma sisteminin %24.76'dan %42.78'e kadar verimle birleştirilmesiyle hibrit sistem yayınlanmıştır. Çizelge 3.3'te de yazıldığı gibi Papatya çiçeklerinin %1,42–

6,53 verim değişimi ile kurutulması için tek vakumlu kurutma, Dr. Motavali ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Çizelge 3.3'te diğer sırada çay yaprakları, Dr. Jindarat ve arkadaşları tarafından hibrit bir mikrodalga kurutma ve vakum kurutma sisteminde kurutması yapılmıştır. Çizelge 3.3'te bir sonraki adımda çilekler, Dr. Bórques ekibi tarafından mikrodalga ve vakumlu kurutucu kombinasyonunun hibrit sistemi ile kurutulmuştur. Motevali tarafından mantar kurutma ürünü olarak tekli bir vakumlu kurutucu ile kurutuldu ve üstelik, Dr. Amir Nejat ve Dr. Jiang ekipleri tarafından ayrı sistemlerde mikrodalga kurutucu ve vakumlu kurutucu gibi hibrit sistemler ile de kurutulmuştur. Son olarak Bamya bitkisi Dr. Jiang ve ekibi tarafından ilk adım olarak dondurarak kurutma kombinasyonu ile ikinci adımda mikrodalga kurutma ile vakum kurutma karışımı ile çeşitli hibrit yöntemlerle farklı şekilde kurutulmuştur. Son olarak, her kurutma teknolojisi için enerji verimliliğinin yanısıra, gıda ürünlerini kurutmak veya nemi uzaklaştırmak için kullanılan ısıtma kaynağı tarafından tüketilen enerjiye bağlı olarak değişimleri detayli olarak belirtilmiştir. Vakumlu kurutmanın diğer yöntemlerle karşılaştırılmasıyla birlikte, VD (Vacuum Drying) teknolojisi çoğu durumda toplu işlem nedeniyle üretim kapasitesinde ve vakum odalarının küçük oranlarında ve uzun süreli gerekli kurutma öğelerinden dolayı sınırlı olmuştur. Ayrıca, vakumla kurutulmuş gıdaların düşüşü mikrodalga kurutmaya kıyasla daha yüksektir - ancak sıcak havayla kurutulmuş ürünlerden daha düşük olmaktadır [131,157]. Ayrıca vakumlu kurutma teknolojisi ile kurutulan ürünler elastik olup ve buna bağlı olarak öğütülerek toz şeklinde elde etmek için uzun prösödür gerektirip ve yoğun oluşumlarından dolayı rehidrasyonda (su uzaklaştırma) kararlı olmuşlardır [158].

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

Bölüm 2 ve 3'te bahsedilen kurutma teknolojisinin sınıflandırılması nedeniyle, gelecekteki araştırmaların maliyet etkin, daha çevre dostu ve aynı zamanda sürdürülebilir olarak farklı enerji verimli kurutmanın geliştirilmesi ve iyileştirilmesine odaklanması gerektiği fark edilmiştir. Krutulmuş üründe renk yoksunluğu, görünüş aroması, tat ve kimyasal bileşenler gibi kalite parametrelerini korumada yetkin olmaktadır. Benzer araştırmalar ve çalışmalar, geleneksel olmayan kurutma teknolojisinin ekonomik uygulanabilirliği konusunda daha net bir bakış açısı elde etmeye yardımcı olmaktadır. Son olarak iki farklı tekniğin karşılaştırılmasında en önemli sonucun hibrit sistem olabileceğini söylenebilir. Dondurarak kurutma ve vakumla kurutma tekniğinin birleşimi olan hibrit sistem, kurutma teknolojisi olarak en faydalı sonuç olabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., ve Nowacka, M., "Cofile:///Users/macbook/Downloads/scholar (2).riscomparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas", *Chemical Engineering And Processing-Process Intensification*, 160: 108274 (2021).
2. Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., ve Youssef, M. M., "Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review", *Food Research International*, 48 (2): 410–427 (2012).
3. Nindo, C. I. ve Tang, J., "Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method", *Drying Technology*, 25 (1): 37–48 (2007).
4. Kırmacı, V., Usta, H., ve Menlik, T., "An experimental study on freeze-drying behavior of strawberries", *Drying Technology*, 26 (12): 1570–1576 (2008).
5. Marques, L. G. ve Freire, J. T., "Analysis of freeze-drying of tropical fruits", *Drying Technology*, 23 (9–11): 2169–2184 (2005).
6. Kopjar, M., Piližota, V., Hribar, J., Simčič, M., Zlatič, E., ve Tiban, N. N., "Influence of trehalose addition and storage conditions on the quality of strawberry cream filling", *Journal Of Food Engineering*, 87 (3): 341–350 (2008).
7. White, G. W. ve Cakebread, S. H., "The glassy state in certain sugar-containing food products", *International Journal Of Food Science & Technology*, 1 (1): 73–82 (1966).
8. Levine, H. ve Slade, L., "A polymer physico-chemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs)", *Carbohydrate Polymers*, 6 (3): 213–244 (1986).
9. Slade, L. ve Levine, H., "Non-equilibrium behavior of small carbohydrate-water systems", *Pure And Applied Chemistry*, 60 (12): 1841–1864 (1988).
10. Roos, Y. ve Karel, M., "Applying state diagrams to food processing and development", *Food Technol*, 45 (12): 66–68 (1991).
11. Rahman, M. S., "State diagram of foods: Its potential use in food processing and product stability", *Trends In Food Science & Technology*, 17 (3): 129–141 (2006).
12. Herawat, H., Kusnandar, F., Adawiyah, D. R., Budijanto, S., ve Rahman, M. S., "Thermal characteristics and state diagram of extruded instant artificial rice", *Thermochimica Acta*, 593: 50–57 (2014).

13. Rahman, M. S., "Food stability determination by macro–micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature", *Journal Of Food Engineering*, 99 (4): 402–416 (2010).
14. Díaz, P., Lopez, D., Matiacevich, S., Osorio, F., ve Enrione, J., "State diagram of salmon (*Salmo salar*) gelatin films", *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 91 (14): 2558–2565 (2011).
15. Guizani, N., Al-Saidi, G. S., Rahman, M. S., Bornaz, S., ve Al-Alawi, A. A., "State diagram of dates: glass transition, freezing curve and maximal-freeze-concentration condition", *Journal Of Food Engineering*, 99 (1): 92–97 (2010).
16. Rahman, M. S., Sablani, S. S., Al-Habsi, N., Al-Maskri, S., ve Al-Belushi, R., "State diagram of freeze-dried garlic powder by differential scanning calorimetry and cooling curve methods", *Journal Of Food Science*, 70 (2): E135–E141 (2005).
17. Al-Rawahi, A., Rahman, M. S., Waly, M., ve Guillemain, G. J., "Thermal characteristics of a water soluble extract obtained from pomegranate skin: Developing a state diagram for determining stability", *Industrial Crops And Products*, 48: 198–204 (2013).
18. Lopez-Quiroga, E., Wang, R., Gouseti, O., Fryer, P. J., ve Bakalis, S., "Crystallisation in concentrated systems: A modelling approach", *Food And Bioproducts Processing*, 100: 525–534 (2016).
19. Lopez-Quiroga, E., Antelo, L. T., ve Alonso, A. A., "Time-scale modeling and optimal control of freeze–drying", *Journal Of Food Engineering*, 111 (4): 655–666 (2012).
20. Prosapio, V., Norton, I., ve De Marco, I., "Optimization of freeze-drying using a Life Cycle Assessment approach", (2017).
21. Prosapio, V. ve Norton, I., "Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance", *Lwt*, 80: 401–408 (2017).
22. Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Zhong, Q., ve Sun, J., "Recent developments in high-quality drying with energy-saving characteristic for fresh foods", *Drying Technology*, 33 (13): 1590–1600 (2015).
23. Lopez-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T., ve Bakalis, S., "A model-based study of rehydration kinetics in freeze-dried tomatoes", *Energy Procedia*, 161: 75–82 (2019).
24. Krokida, M. K. ve Philippopoulos, C., "Rehydration of dehydrated foods", *Drying Technology*, 23 (4): 799–830 (2005).
25. Gaware, T. J., Sutar, N., ve Thorat, B. N., "Drying of tomato using different methods: comparison of dehydration and rehydration kinetics", *Drying Technology*, 28 (5): 651–658 (2010).

26. Sette, P., Franceschinis, L., Schebor, C., ve Salvatori, D., "Fruit snacks from raspberries: influence of drying parameters on colour degradation and bioactive potential", *International Journal Of Food Science & Technology*, 52 (2): 313–328 (2017).
27. Haeuser, C., Goldbach, P., Huwyler, J., Friess, W., ve Allmendinger, A., "Imaging techniques to characterize cake appearance of freeze-dried products", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 107 (11): 2810–2822 (2018).
28. O'Brien, F. J., Harley, B. A., Yannas, I. V., ve Gibson, L., "Influence of freezing rate on pore structure in freeze-dried collagen-GAG scaffolds", *Biomaterials*, 25 (6): 1077–1086 (2004).
29. Jin, J., Yurkow, E. J., Adler, D., ve Lee, T.-C., "Improved freeze drying efficiency by ice nucleation proteins with ice morphology modification", *Food Research International*, 106: 90–97 (2018).
30. Nakagawa, K., Hottot, A., Vessot, S., ve Andrieu, J., "Modeling of freezing step during freeze-drying of drugs in vials", *AIChE Journal*, 53 (5): 1362–1372 (2007).
31. Cicerone, M. T., Pikal, M. J., ve Qian, K. K., "Stabilization of proteins in solid form", *Advanced Drug Delivery Reviews*, 93: 14–24 (2015).
32. Pikal, M. J., "Freeze drying", *Encyclopedia Of Pharmaceutical Technology*, Marcel Dekker, New York, 1299: 1326 (2002).
33. Franks, F., "Freeze-drying of bioproducts: putting principles into practice", *European Journal Of Pharmaceutics And Biopharmaceutics*, 45 (3): 221–229 (1998).
34. Patel, S. M. ve Pikal, M. J., "Emerging freeze-drying process development and scale-up issues", *Aaps Pharmscitech*, 12 (1): 372–378 (2011).
35. Horn, J., Schanda, J., ve Friess, W., "Impact of fast and conservative freeze-drying on product quality of protein-mannitol-sucrose-glycerol lyophilizates", *European Journal Of Pharmaceutics And Biopharmaceutics*, 127: 342–354 (2018).
36. Andrieu, J. ve Vessot, S., "A review on experimental determination and optimization of physical quality factors during pharmaceuticals freeze-drying cycles", *Drying Technology*, 36 (2): 129–145 (2018).
37. Mehta, M., Bhardwaj, S. P., ve Suryanarayanan, R., "Controlling the physical form of mannitol in freeze-dried systems", *European Journal Of Pharmaceutics And Biopharmaceutics*, 85 (2): 207–213 (2013).
38. Yu, L., Milton, N., Groleau, E. G., Mishra, D. S., ve Vansickle, R. E., "Existence of a mannitol hydrate during freeze-drying and practical implications", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 88 (2): 196–198 (1999).

39. Larsen, H. M. L., Trnka, H., ve Grohganz, H., "Formation of mannitol hemihydrate in freeze-dried protein formulations—A design of experiment approach", *International Journal Of Pharmaceutics*, 460 (1–2): 45–52 (2014).
40. Srinivasan, J. M., Wegiel, L. A., Hardwick, L. M., ve Nail, S. L., "The influence of mannitol hemihydrate on the secondary drying dynamics of a protein formulation: a case study", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 106 (12): 3583–3590 (2017).
41. Schneid, S., Riegger, X., ve Gieseler, H., "Peer-Reviewed Technical Note: Influence of Common Excipients on the Crystalline Modification of Freeze-Dried Mannitol", *Pharmaceutical Technology*, 3 (32): (2008).
42. Berry, D., "The power of encapsulation", *Food Product Design FFA*, 1: 57–65 (2004).
43. Shefer, A. ve Shefer, S., "Novel encapsulation system provides controlled release of ingredients", *Food Technology (Chicago)*, 57 (11): 40–42 (2003).
44. Bahadır, A., Dağdeviren, A., Janaani, A., Roshanaei, K., Taşkesen, E., ONGUN, G. K., ve Özkaymak, M., "Freeze-Drying of Carrot Slices in Diverse Thicknesses", *International Journal Of Energy Studies*, 6 (1): 53–65 (2021).
45. Acar, B., Sadikoglu, H., ve Doymaz, I., "Freeze-Drying Kinetics and Diffusion Modeling of Saffron (*Crocus sativus* L.)", *Journal Of Food Processing And Preservation*, 39 (2): 142–149 (2015).
46. DAĞDEVİREN, A., Bahadır, A., ALHAMMADİ, A., ROSHANAELI, K., COŞKUN, T., İNANÇ, Ö., ve ÖZKAYMAK, M., "Freeze-Drying of Persimmon (*Diospyros Kaki*) Slices Investigation of Drying Characteristics", *Politeknik Dergisi*, 1 .
47. Acar, B., Sadikoglu, H., ve Ozkaymak, M., "Freeze drying of saffron (*Crocus sativus* L.)", *Drying Technology*, 29 (14): 1622–1627 (2011).
48. Zoric, Z., Dragovic-Uzelac, V., Pedisic, S., Kurtanjek, Z., ve Garofulic, I. E., "Kinetics of the degradation of anthocyanins, phenolic acids and flavonols during heat treatments of freeze-dried sour cherry Marasca paste", *Food Technology And Biotechnology*, 52 (1): 101 (2014).
49. Zorić, Z., Pedisić, S., Kovačević, D. B., Ježek, D., ve Dragović-Uzelac, V., "Impact of packaging material and storage conditions on polyphenol stability, colour and sensory characteristics of freeze-dried sour cherry (*Prunus cerasus* var. Marasca)", *Journal Of Food Science And Technology*, 53 (2): 1247–1258 (2016).
50. Brás, T., Neves, L. A., Crespo, J. G., ve Duarte, M. F., "Effect of extraction methodologies and solvent selection upon cynaropicrin extraction from *Cynara cardunculus* leaves", *Separation And Purification Technology*, 236: 116283 (2020).

51. Roshanaei, K., Dağdeviren, A., Bahadır, A., Demir, E., Canan, A., Dumrul, H., ve Özkaymak, M., "Study the Characteristics of Kinetic Model of Drying Freeze-Dried Rosehip (Rosa Canina)", *Journal Of International Environmental Application And Science*, 16 (4): 149–158 (2021).
52. Liu, L., Huang, H., He, Z., Li, S., Li, J., Chen, J., Deng, L., Osaka, Y., ve Kobayashi, N., "The heat and mass transfer performance of facile synthesized silica gel/carbon-fiber based consolidated composite adsorbents developed by freeze-drying method", *Nanoscale And Microscale Thermophysical Engineering*, 22 (4): 255–269 (2018).
53. Seligmann Jr, E. B. ve Farber, J. F., "Freeze drying and residual moisture", *Cryobiology*, 8 (2): 138–144 (1971).
54. Couriel, B., "Freeze drying: past, present and future", *Journal Of The Parenteral Drug Association*, 34 (5): 352–357 (1980).
55. Iorizzo, M., Curaba, J., Pottorff, M., Ferruzzi, M. G., Simon, P., ve Cavagnaro, P. F., "Carrot Anthocyanins Genetics and Genomics: Status and Perspectives to Improve Its Application for the Food Colorant Industry.", *Genes*, 11 (8): (2020).
56. Menges, H. O. ve Ertekin, C., "Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples", *Journal Of Food Engineering*, 77 (1): 119–125 (2006).
57. Ayensu, A., "Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow", *Solar Energy*, 59 (4–6): 121–126 (1997).
58. Liu, Q. ve Bakker-Arkema, F. W., "Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development", *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 66 (4): 275–280 (1997).
59. Tiris, C., Ozbalta, N., Tiris, M., ve Dincer, I., "Experimental testing of a new solar dryer", *International Journal Of Energy Research*, 18 (4): 483–491 (1994).
60. Doymaz, I., "Drying kinetics of white mulberry", *Journal Of Food Engineering*, 61 (3): 341–346 (2004).
61. Karathanos, V. T. ve Belessiotis, V. G., "Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits", *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 74 (4): 355–361 (1999).
62. Park, K. J., Vohnikova, Z., ve Brod, F. P. R., "Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.)", *Journal Of Food Engineering*, 51 (3): 193–199 (2002).
63. Sun, D.-W. ve Woods, J. L., "Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers", *Transactions Of The ASAE*, 37 (6): 1919–1926 (1994).
64. Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., ve Ross, I. J., "Drying soybeans with heated air", *Transactions Of The ASAE*, 16 (1): 112 (1973).

65. White, G. M., Bridges, T. C., Loewer, O. J., ve Ross, I. J., "Seed coat damage in thin-layer drying of soybeans", *Transactions Of The ASAE*, 23 (1): 224–227 (1980).
66. White, G. M., Bridges, T. C., Loewer, O. J., ve Ross, I. J., "Thin-layer drying model for soybeans", *Transactions Of The ASAE*, 24 (6): 1643–1646 (1981).
67. Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A. K., ve Degirmencioglu, A., "Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves", *Biosystems Engineering*, 88 (3): 325–335 (2004).
68. Özdemir, M. ve Devres, Y. O., "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting", *Journal Of Food Engineering*, 42 (4): 225–233 (1999).
69. Panchariya, P. C., Popovic, D., ve Sharma, A. L., "Thin-layer modelling of black tea drying process", *Journal Of Food Engineering*, 52 (4): 349–357 (2002).
70. Chhinnan, M. S., "Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans", *Transactions Of The ASAE*, 27 (2): 610–615 (1984).
71. Pal, U. S. ve Chakraverty, A., "Thin layer convection-drying of mushrooms", *Energy Conversion And Management*, 38 (2): 107–113 (1997).
72. Rahman, M. S., Perera, C. O., ve Thebaud, C., "Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas", *Food Research International*, 30 (7): 485–491 (1997).
73. Doymaz, İ., "Effect of dipping treatment on air drying of plums", *Journal Of Food Engineering*, 64 (4): 465–470 (2004).
74. Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., ve Jaouhari, J. T., "Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)", *Journal Of Food Engineering*, 61 (2): 173–179 (2004).
75. Dandamrongrak, R., Young, G., ve Mason, R., "Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models", *Journal Of Food Engineering*, 55 (2): 139–146 (2002).
76. Madamba, P. S., Driscoll, R. H., ve Buckle, K. A., "The thin-layer drying characteristics of garlic slices", *Journal Of Food Engineering*, 29 (1): 75–97 (1996).
77. Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., ve Wutiwiwatchai, W., "Fluidised bed drying of soybeans", *Journal Of Stored Products Research*, 37 (2): 133–151 (2001).
78. Ertekin, C. ve Yaldiz, O., "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model", *Journal Of Food Engineering*, 63 (3): 349–359 (2004).

79. Midilli, A. ve Kucuk, H., "Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy", *Energy Conversion And Management*, 44 (7): 1111–1122 (2003).
80. Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L., ve Hamdy, M. Y., "A model for ear corn drying", *Transactions Of The ASAE*, 23 (5): 1261–1265 (1980).
81. Chen, C. ve Wu, P.-C., "Thin-layer drying model for rough rice with high moisture content", *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 80 (1): 45–52 (2001).
82. R. Paulsen, M. ve L. Thompson, T., "Drying Analysis of Grain Sorghum", *Transactions Of The ASAE*, 16 (3): 537–540 (1973).
83. Thompson, T. L., Peart, R. M., ve Foster, G. H., "Mathematical simulation of corn drying a new model", *Transaction Of The ASAE*, 11 (4): 582–586 (1968).
84. Toğrul, I. T. ve Pehlivan, D., "Modelling of drying kinetics of single apricot", *Journal Of Food Engineering*, 58 (1): 23–32 (2003).
85. Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Bilbao-Sáinz, C., Uribe, E., ve Lemus-Mondaca, R., "Empirical modeling of drying process for apple (Cv. Granny Smith) slices at different air temperatures", *Journal Of Food Processing And Preservation*, 32 (6): 972–986 (2008).
86. Rayaguru, K., Routray, W., ve Mohanty, S. N., "Mathematical modeling and quality parameters of air-dried betel leaf (piper betle L.)", *Journal Of Food Processing And Preservation*, 35 (4): 394–401 (2011).
87. Wang, W., "Lyophilization and development of solid protein pharmaceuticals", *International Journal Of Pharmaceutics*, 203 (1–2): 1–60 (2000).
88. Liapis, A. I., Pim, M. L., ve Bruttini, R., "Research and development needs and opportunities in freeze drying", *Drying Technology*, 14 (6): 1265–1300 (1996).
89. Liapis, A. I. ve Bruttini, R., "Freeze-drying of pharmaceutical crystalline and amorphous solutes in vials: Dynamic multi-dimensional models of the primary and secondary drying stages and qualitative features of the moving interface", *Drying Technology*, 13 (1–2): 43–72 (1995).
90. Sadikoglu, H. ve Liapis, A. I., "Mathematical modelling of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze-drying in trays: Parameter estimation and model discrimination by comparison of theoretical results with experimental data", *Drying Technology*, 15 (3–4): 791–810 (1997).
91. Varshney, D. ve Singh, M., "History of lyophilization", *Lyophilized Biologics and Vaccines*, Springer, 3–10 (2015).
92. Goldberg, E., "Handbook of downstream processing", *Springer Science & Business Media*, (2012).

93. Cao, X., Li, N., Qi, G., Sun, X. S., ve Wang, D., "Effect of spray drying on the properties of camelina gum isolated from camelina seeds", *Industrial Crops And Products*, 117: 278–285 (2018).
94. Di Giorgio, L., Salgado, P. R., ve Mauri, A. N., "Encapsulation of fish oil in soybean protein particles by emulsification and spray drying", *Food Hydrocolloids*, 87: 891–901 (2019).
95. Charles, A. L., Abdillah, A. A., Saraswati, Y. R., Sridhar, K., Balderamos, C., Masithah, E. D., ve Alamsjah, M. A., "Characterization of freeze-dried microencapsulation tuna fish oil with arrowroot starch and maltodextrin", *Food Hydrocolloids*, 112: 106281 (2021).
96. Anwar, S. H. ve Kunz, B., "The influence of drying methods on the stabilization of fish oil microcapsules: Comparison of spray granulation, spray drying, and freeze drying", *Journal Of Food Engineering*, 105 (2): 367–378 (2011).
97. Fang, Z. ve Bhandari, B., "Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation", Encapsulation technologies and delivery systems for food ingredients and nutraceuticals, *Elsevier*, 73–109 (2012).
98. Kailasapathy, K. ve Sureeta, B. S., "Effect of storage on shelf life and viability of freeze-dried and microencapsulated *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium infantis* cultures", *Australian Journal Of Dairy Technology*, 59 (3): 204 (2004).
99. Çalışkan, G. ve Dirim, S. N., "Freeze drying kinetics of persimmon puree", *GIDA*, 40 (1): 9–14 (2015).
100. Fitriani, L., Haqi, A., ve Zaini, E., "Preparation and characterization of solid dispersion freeze-dried efavirenz–polyvinylpyrrolidone K-30", *Journal Of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 7 (3): 105 (2016).
101. Hassouna, F., El Dahab, M. A., Fulem, M., Haiek, A. D. L., Laachachi, A., Kopecký, D., ve Šoóš, M., "Multi-scale analysis of amorphous solid dispersions prepared by freeze drying of ibuprofen loaded acrylic polymer nanoparticles", *Journal Of Drug Delivery Science And Technology*, 53: 101182 (2019).
102. Nidhul, K., Kumar, S., Yadav, A. K., ve Anish, S., "Computational and experimental studies on the development of an energy-efficient drier using ribbed triangular duct solar air heater", *Solar Energy*, 209: 454–469 (2020).
103. Adebisi, A. O., Kaialy, W., Hussain, T., Al-Hamidi, H., Nokhodchi, A., Conway, B. R., ve Asare-Addo, K., "Solid-state, triboelectrostatic and dissolution characteristics of spray-dried piroxicam-glucosamine solid dispersions", *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, 146: 841–851 (2016).

104. Homayouni, A., Sadeghi, F., Varshosaz, J., Garekani, H. A., ve Nokhodchi, A., "Comparing various techniques to produce micro/nanoparticles for enhancing the dissolution of celecoxib containing PVP", *European Journal Of Pharmaceutics And Biopharmaceutics*, 88 (1): 261–274 (2014).
105. Adebisi, A. O., Kaialy, W., Hussain, T., Al-Hamidi, H., Nokhodchi, A., Conway, B. R., ve Asare-Addo, K., "Freeze-dried crystalline dispersions: Solid-state, triboelectrification and simultaneous dissolution improvements", *Journal Of Drug Delivery Science And Technology*, 61: 102173 (2021).
106. Sadikoglu, H., Liapis, A. I., ve Crosser, O. K., "Optimal control of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze drying in trays", *Drying Technology*, 16 (3–5): 399–431 (1998).
107. Sadikoglu, H., Ozdemir, M., ve Seker, M., "Freeze-drying of pharmaceutical products: Research and development needs", *Drying Technology*, 24 (7): 849–861 (2006).
108. Menon, A., Stojceska, V., ve Tassou, S. A., "A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies", *Trends In Food Science And Technology*, 100 (June 2019): 67–76 (2020).
109. Parikh, D. M., "Vacuum drying: basics and application", *Chemical Week Associates, New York, USA*, (2015).
110. Criscuoli, A., Carnevale, M. C., ve Drioli, E., "Study of the performance of a membrane-based vacuum drying process", *Separation And Purification Technology*, 158: 259–265 (2016).
111. Green, D. W. ve Southard, M. Z., "Perry's Chemical Engineers", Mc Graw Hill Education, 1–2 (2019).
112. Tsotsas, E. ve Mujumdar, A. S., "Modern drying technology vol. 1 computational tools at different scales", *Taylor And Francis, NY*, 26: 812–814 (2008).
113. Passos, M. L., "A review of: "Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying" Edited by Sakamon Devahastin Exergex Corporation, Montreal, Canada 187 pages, 2000", *Drying Technology, Taylor & Francis*, 1937–1938 (2000).
114. Parikh, D. M., "Vacuum Drying: Basics and application", (2015).
115. Koelet, P. C. ve Gray, T. B., "Food Products and their Preservation by Refrigeration", *Industrial Refrigeration, Springer*, 234–279 (1992).
116. Motevali, A., Minaei, S., ve Khoshtagaza, M. H., "Evaluation of energy consumption in different drying methods", *Energy Conversion And Management*, 52 (2): 1192–1199 (2011).

117. Zhong, T. ve Lima, M., "The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue", *Bioresource Technology*, 87 (3): 215–220 (2003).
118. Kayisoglu, S. ve Ertekin, C., "Vacuum drying kinetics of barbunya bean (*Phaseolus vulgaris* L. elipticus Mart.)", *The Philippine Agricultural Scientist*, 94 (3): (2011).
119. Saravacos, G. D. ve Kostaropoulos, A. E., "Food evaporation equipment", *Handbook of Food Processing Equipment*, Springer, 298–330 (2002).
120. Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irudayaraj, J., ve Demirci, A., "Infrared heating in food processing: an overview", *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 7 (1): 2–13 (2008).
121. Rastogi, N. K., "Chapter 13 - Infrared Heating of Fluid Foods", *Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods*, Elsevier, 411–432 (2012).
122. Basman, A. ve Yalcin, S., "Quick-boiling noodle production by using infrared drying", *Journal Of Food Engineering*, 106 (3): 245–252 (2011).
123. Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., ve Siriamornpun, S., "Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage", *Food And Bioproducts Processing*, 90 (2): 155–164 (2012).
124. Khir, R., Pan, Z., ve Salim, A., "Drying rates of thin layer rough rice drying using infrared radiation", (2006).
125. Shih, C., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D., ve Hirschberg, E., "Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries", *Transactions Of The ASABE*, 51 (1): 205–216 (2008).
126. Nowak, D. ve Lewicki, P. P., "Infrared drying of apple slices", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5 (3): 353–360 (2004).
127. Lewicki, P. P., "Design of hot air drying for better foods", *Trends In Food Science & Technology*, 17 (4): 153–163 (2006).
128. Jaya, S. ve Durance, T. D., "Compressive characteristics of cellular solids produced using vacuum-microwave, freeze, vacuum and hot air dehydration methods", *Journal Of Porous Materials*, 16 (1): 47–58 (2009).
129. Sahni, E. K. ve Chaudhuri, B., "Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches", *International Journal Of Pharmaceutics*, 434 (1–2): 334–348 (2012).
130. Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., ve Amirnejat, H., "Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices", *Energy*, 36 (11): 6433–6441 (2011).

131. Jaya, S. ve Das, H., "A vacuum drying model for mango pulp", *Drying Technology*, 21 (7): 1215–1234 (2003).
132. Bazyma, L. A. ve Kutovoy, V. A., "Vacuum drying and hybrid technologies", *Stewart Postharvest Review*, 4 (7): (2005).
133. Motevali, A. ve Kolor, R. T., "A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants", *Journal Of Cleaner Production*, 154: 445–461 (2017).
134. Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., ve Khoshtaghazza, M. H., "Comparison of energy parameters in various dryers", *Energy Conversion And Management*, 87: 711–725 (2014).
135. Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., ve Saravacos, G. D., "The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products", *International Journal Of Food Science & Technology*, 36 (1): 53–59 (2001).
136. Chou, S. K. ve Chua, K. J., "New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs", *Trends In Food Science And Technology*, 12 (10): 359–369 (2001).
137. Lee, D.-J., Jangam, S., ve Mujumdar, A. S., "Some recent advances in drying technologies to produce particulate solids", *KONA Powder And Particle Journal*, 30: 69–83 (2013).
138. Baysal, T., Icier, F., Ersus, S., ve Yıldız, H., "Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic", *European Food Research And Technology*, 218 (1): 68–73 (2003).
139. Vishwanathan, K. H., Giwari, G. K., ve Hebbar, H. U., "Infrared assisted dry-blanching and hybrid drying of carrot", *Food And Bioproducts Processing*, 91 (2): 89–94 (2013).
140. Okoroigwe, E. C., Ndu, E. C., ve Okoroigwe, F. C., "Comparative evaluation of the performance of an improved solar-biomass hybrid dryer", *Journal Of Energy In Southern Africa*, 26 (4): 38–51 (2015).
141. Dhanuskodi, S., Wilson, V., ve Kumarasamy, S., "Design and thermal performance of the solar biomass hybrid dryer for cashew drying", *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 12 (3): 277–288 (2014).
142. Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., ve Maskan, M., "Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries", *Food Chemistry*, 230: 295–305 (2017).
143. Mortezapour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., ve Khoshtaghaza, M. H., "Saffron drying with a heat pump–assisted hybrid photovoltaic–thermal solar dryer", *Drying Technology*, 30 (6): 560–566 (2012).

144. Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., ve Nayak, P. K., "Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage", *Renewable Energy*, 120: 23–34 (2018).
145. Łechtańska, J. M., Szadzińska, J., ve Kowalski, S. J., "Microwave-and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations", *Chemical Engineering And Processing: Process Intensification*, 98: 155–164 (2015).
146. Eltawil, M. A., Azam, M. M., ve Alghannam, A. O., "Energy analysis of hybrid solar tunnel dryer with PV system and solar collector for drying mint (*Mentha Viridis*)", *Journal Of Cleaner Production*, 181: 352–364 (2018).
147. Hossain, M. A., Amer, B. M. A., ve Gottschalk, K., "Hybrid solar dryer for quality dried tomato", *Drying Technology*, 26 (12): 1591–1601 (2008).
148. Fudholi, A., Sopian, K., Gabbasa, M., Bakhtyar, B., Yahya, M., Ruslan, M. H., ve Mat, S., "Techno-economic of solar drying systems with water based solar collectors in Malaysia: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 51: 809–820 (2015).
149. Anum, R., Ghafoor, A., ve Munir, A., "Study of the drying behavior and performance evaluation of gas fired hybrid solar dryer", *Journal Of Food Process Engineering*, 40 (2): e12351 (2017).
150. Ambros, S., Foerst, P., ve Kulozik, U., "Temperature-controlled microwave-vacuum drying of lactic acid bacteria: Impact of drying conditions on process and product characteristics", *Journal Of Food Engineering*, 224: 80–87 (2018).
151. Cokgezme, O. F., Sabanci, S., Cevik, M., Yildiz, H., ve Icier, F., "Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system", *Journal Of Food Engineering*, 207: 1–9 (2017).
152. Jindarat, W., Sungsoontorn, S., ve Rattanadecho, P., "Analysis of energy consumption in drying process of biomaterials using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (CUMV)—Case study: Tea leaves", *Drying Technology*, 31 (10): 1138–1147 (2013).
153. Bórquez, R., Melo, D., ve Saavedra, C., "Microwave–vacuum drying of strawberries with automatic temperature control", *Food And Bioprocess Technology*, 8 (2): 266–276 (2015).
154. AmirNejat, H., Khoshtaghaza, M. H., ve PAHLAVAN, Z. H., "A determination of thin layer drying kinetics of button mushroom when dried through an infrared applied drying method", *IRANIAN JOURNAL OF BIOSYSTEMS ENGINEERING (IRANIAN JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES)*, 42 (1): 53–61 (2011).

155. Jiang, N., Liu, C., Li, D., Zhang, Z., Liu, C., Wang, D., Niu, L., ve Zhang, M., "Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption", *LWT-Food Science And Technology*, 82: 216–226 (2017).
156. Jiang, N., Liu, C., Li, D., Zhang, Z., Yu, Z., ve Zhou, Y., "Effect of thermosonic pretreatment on drying kinetics and energy consumption of microwave vacuum dried *Agaricus bisporus* slices", *Journal Of Food Engineering*, 177: 21–30 (2016).
157. Balzarini, M. F., Reinheimer, M. A., Ciappini, M. C., ve Scenna, N. J., "Comparative study of hot air and vacuum drying on the drying kinetics and physicochemical properties of chicory roots", *Journal Of Food Science And Technology*, 55 (10): 4067–4078 (2018).
158. Kubbutat, P., Leitão, L., ve Kulozik, U., "Stability of Foams in Vacuum Drying Processes. Effects of Interactions between Sugars, Proteins, and Surfactants on Foam Stability and Dried Foam Properties", *Foods*, 10 (8): 1876 (2021).

RESUME

Niyayesh özel okulunda orta okul ve lise eğitimi tamamlandı. Lisans eğitimi Urmia State Üniversitesinde tamamlandı. Yüksek Lisans eğitimi Karabük Teknik Üniversitesinde 2022'de tamamlandı. Doktora eğitimini almaya Türkiye arasında 2022 senesinde başlayacak.