

**BAZI ELMA ÇEŞİTLERİNİN DONDURULARAK
KURUTULMASINDA KURUTMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Muhammet CANDAS



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZI ELMA ÇEŞİTLERİNİN DONDURULARAK KURUTULMASINDA
KURUTMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Muhammet CANDAŞ
0009-0005-7273-2731

Prof. Dr. Nazmi İZLİ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

BAZI ELMA ÇEŞİTLERİNİN DONDURULARAK KURUTULMASINDA KURUTMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Muhammet CANDAS

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nazmi İZLİ

Gıdaların uzun süre muhafazası, besin değerlerinin korunması ve taşıma kolaylığı açısından önemli bir konudur. Dondurarak kurutma, bu amaçlarla kullanılan ve tarihçesi 1900'lü yılların başlarına kadar uzanan bir yöntemdir. Bu yöntem, gıdaların doğal yapısını ve besin değerlerini koruyarak suyun süblimasyon yoluyla uzaklaştırılması prensibine dayanır.

Dondurarak kurutma işlemi üç ana aşamadan oluşur: dondurma, birincil kurutma ve ikincil kurutma. Bu süreç boyunca ürünün su içeriği buz haline getirilir ve ardından düşük basınç altında süblimasyon yoluyla buharlaştırılır. Bu yöntemin en büyük avantajı, gıdaların aroma, tat, renk ve besin değerlerini büyük ölçüde korumasıdır.

Bu çalışmada, Starking, Granny Smith ve Gala elma çeşitlerinin dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulması sürecinde renk değişiklikleri ve nem içeriği analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, farklı elma çeşitlerinin kurutma işlemi sırasında renk parametrelerinde ve nem içeriğinde meydana gelen değişiklikleri belirlemek ve kurutma işleminin etkinliğini değerlendirmektir. Ayrıca, dondurarak kurutma yönteminin enerji verimliliği de incelenmiş ve enerji tüketiminin optimize edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular, dondurarak kurutma yönteminin elma kurutma işlemlerinde yaygın olarak kullanılabileceğini ve elmaların besin değerlerini ve organoleptik özelliklerini koruduğunu göstermektedir. Çalışma, aynı zamanda enerji verimliliği açısından da önemli bilgiler sunarak, bu yöntemin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Dondurma, Elma, Vakum, Renk, Starking, Granny Smith, Gala

2024, xv + 61 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINATION OF DRYING PARAMETERS IN FREEZE DRYING OF SOME APPLE VARIETIES

Muhammet CANDAS

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nazmi İZLİ

The long-term preservation of food, maintaining its nutritional value, and ease of transportation are crucial aspects. Freeze-drying is a method used for these purposes, with a history dating back to the early 1900s. This method relies on the principle of removing water through sublimation, thereby preserving the natural structure and nutritional value of the food.

The freeze-drying process consists of three main stages: freezing, primary drying, and secondary drying. During this process, the water content of the product is frozen and then evaporated through sublimation under low pressure. The biggest advantage of this method is that it significantly preserves the aroma, taste, color, and nutritional value of the food.

In this study, the color changes and moisture content of Starking, Granny Smith, and Gala apple varieties during the freeze-drying process were analyzed. The aim of the study was to determine the changes in color parameters and moisture content of different apple varieties during the drying process and to evaluate the effectiveness of the freeze-drying method. Additionally, the energy efficiency of the freeze-drying method was examined, aiming to optimize energy consumption. The findings showed that the freeze-drying method could be widely used in apple drying processes, effectively preserving the nutritional values and organoleptic properties of the apples. The study also provides important insights into energy efficiency, highlighting the potential of this method to enhance economic and environmental sustainability.

Key words: Drying, Freezing, Apple, Vacuum, Color, Granny Smith, Gala
2024, xv + 61 pages.

ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Gıdanın ve gıda depolanmasının ne denli büyük bir öneme sahip olduğunu hep biliyordum; ancak bu bölümde geçirdiğim süre bana bu kavramın derinliğini daha iyi anlama fırsatı verdi. “Önemli” kelimesinin, bu olguyu tanımlamak için yetersiz kaldığını fark ettim. Gıda, yalnızca bir ihtiyaç değil; yaşamın ta kendisi, yaşamsal sürekliliğimizin temelidir. Bu süreçte bana rehberlik eden, tüm çalışmaları ve zarafetiyle yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Nazmi İzli’ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sayın Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Polat’a, değerli katkıları için minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Bölümümüzde derslerimize değer katan, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım kıymetli hocalarım Prof. Dr. Kamil Alibaş ve Prof. Dr. Ali Vardar’a da ayrıca teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olan, birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum sevgili arkadaşlarım Barış Yüceses, Canan Karakaş, Cihangir Ateş ve Sinem Zere’ye gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, her zaman bana ilham veren ve sevgisiyle destek olan kızım Aylin Candaş’a en derin sevgi ve saygılarımı sunarım.

Her adımında yanımda olan ve hayatım boyunca bana rehberlik eden kıymetli anne ve babam, Mehmet Candaş ve Mineş Candaş’a da sevgi ve saygılarımı sunarım.

Muhammet CANDAS
04 / 11 / 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	iii
TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	12
2.1 Kurutucuların Sınıflandırılması	17
2.1.1 Konveksiyon Kurutma	17
2.1.2 Kondüksiyon Kurutma	17
2.1.3 Radyasyon Kurutma.....	17
2.1.4 Dondurarak Kurutma	18
2.1.5 Dielektrik Kurutma	19
2.1.6 Ozmotik Kurutma	19
2.1.7 Vakumda Kurutma	19
2.2 Sublimasyon.....	20
2.3 Ürünün Su Aktivitesi	22
2.4 Denge Nemi	24
2.5 Kurumanın Kinetiği	25
2.6 Kurutma Hızı.....	26
2.7 Meyvelerin Dondurarak Kurutulmasında Meydana Gelebilecek Zorluklar	26
2.8 Rehidrasyon Etkisi	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
3.1 Materyal	28
3.1.1 Elma Çeşitleri.....	28
3.1.2 Starking Delicious Elma	29
3.1.3 Granny Smith Elma.....	30
3.1.4 Gala Elma.....	31
3.2 Kullanılan Cihazlar	32
3.2.1 Fırın.....	32
3.2.2 Kurutma Makinesi.....	33
3.2.3 Vakum Pompası	34
3.2.4 Enerji Ölçme Cihazı.....	35
3.2.5 Terazî	36
3.2.6 Renk Ölçer Cihazı	37
3.3 Yöntem.....	37
3.3.1 Nem İçeriğinin Belirlenmesi	37
3.3.2 Nem Oranının Belirlenmesi	37
3.3.3 Renk parametrelerinin belirlenmesi ve hesaplanması.....	41
3.3.4 Rehidrasyon Oranı	42
3.4 Enerji Verimliliği	43
3.5 İstatiksel Analiz.....	44
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	45

4.1 Kurutma Karakteristikleri	45
4.2 Renk Analiz Sonuçları	49
4.3 Rehidrasyon Oranı	52
4.4 Enerji Analizi	53
5. SONUÇ	56
KAYNAKLAR	58



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a, b, c ve n	Kuruma modelinin sabit sayıları
a*	Rengin kırmızılığı (+) ya da yeşilliği (-)
b*	Rengin sarılığı (+) ya da maviliği (-)
C	(Chroma) Renk kroma değeri
L*	Parlaklık
m	Numunenin ağırlığı (g)
t	Zaman (dakika)
T	Sıcaklık (°C)

Kisaltmalar

FD	Freeze Drying (Dondurarak Kurutma)
MWVD	Microwave Vacuum Drying (Mikrodalga Vakum Kurutma)
a _w	Water Activity (Su Aktivitesi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Bitkisel üretim (TÜİK, 2023).....	5
Şekil 1.2. Türkiye meyve ürünlerinde yeterlilik dereceleri (TÜİK, 2022).....	6
Şekil 2.1. Dondurarak kurutma işlem basamakları	13
Şekil 2.2. Dondurularak kurutulmuş patatesler	18
Şekil 2.3. Vakumda kurutma odası	20
Şekil 2.4. Saf maddenin P-T diyagramı	21
Şekil 2.5. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi	22
Şekil 2.6. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri	25
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan elma çeşitleri	28
Şekil 3.2. Starking Elma	29
Şekil 3.3. Granny Smith Elma	30
Şekil 3.4. Gala Elma	31
Şekil 3.5. Örneklerin ilk nem içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan fırın	32
Şekil 3.6. Kurutma cihazı	33
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan vakum pompası	34
Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan enerji ölçüm cihazı.....	35
Şekil 3.9. Kullanılan Terazı	36
Şekil 3.10. Renk ölçer	37
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan elmalar	37
Şekil 3.12. Vakum ortamında işlem gören örneklerin -50°C ile 0,010 mbar basınç altındaki görünümü	39
Şekil 3.13. Kurutma işlemi tamamlanan örneklerden tartım sırasından bir görünüm	40
Şekil 3.14. CIELAB renk uzayı diyagramı	41
Şekil 3.15. Rehidrasyon işlemi 1'e 50 ölçek	42
Şekil 4.1. Dondurarak kurutma koşulları altında Gala elma örneklerinin zamanla nem içeriklerindeki değişimler	45
Şekil 4.2. Dondurarak kurutma koşulları altında Granny Smith elma örneklerinin zamanla nem içeriklerindeki değişimler	46
Şekil 4.3. Dondurarak kurutma koşulları altında Starking elma örneklerinin zamanla nem içeriklerindeki değişimler	46
Şekil 4.4. Gala elma örneklerinin dondurarak kurutma koşullarında nem içeriklerine karşı kuruma hızları	47
Şekil 4.5. Granny Smith elma örneklerinin dondurarak kurutma koşullarında nem içeriklerine karşı kuruma hızları	48
Şekil 4.6. Starking elma örneklerinin dondurarak kurutma koşullarında nem içeriklerine karşı kuruma hızları	48
Şekil 4.7. Dondurarak kurutma koşullarında taze ve kurutulmuş Gala elma örneklerinin renk değerleri	50
Şekil 4.8. Dondurarak kurutma koşullarında taze ve kurutulmuş Granny Smith elma örneklerinin renk değerleri	51

Şekil 4.9.	Dondurarak kurutma koşullarında taze ve kurutulmuş Starking elma örneklerinin renk değerleri	52
Şekil 4.10.	Dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulmuş Gala, Granny Smith ve Starking elma örneklerinin rehidrasyon oranı değerleri	53
Şekil 4.11.	Özgöl nem uzaklaştırma hızı	54
Şekil 4.12.	Nem uzaklaştırma hızı	54
Şekil 4.13.	Özgöl enerji tüketimi	55



ÇİZELGE DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 1.1.	Meyveler, içecek ve baharat bitkileri üretim miktarları (TÜİK, 2023).....	6
Çizelge 1.2.	Yıllara göre Türkiye’de elma üretim miktarları (TUİK, 2022).....	6
Çizelge 1.3.	Dünya Elma Verileri	7
Çizelge 1.4.	Türkiye Elma Verileri	8
Çizelge 1.5.	Geleneksel Kurutma ile Dondurarak Kurutmanın Karşılaştırılması (Özenir, 2009)	9
Çizelge 2.1.	Gıdalarda önemli olan mikroorganizma faaliyetleri için yaklaşık minimum su aktivite (aw) değerleri	23
Çizelge 2.2.	Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi değerleri	24
Çizelge 2.3.	Bazı gıda gruplarının su aktivite (aw) değerleri	24
Çizelge 4.1.	SMER, MER ve ÖET Sonuçları	53

1. GİRİŞ

Dondurarak kurutma, gıdaların uzun süre muhafaza edilmesi amacıyla kullanılan bir yöntem olup, tarihçesi 1900'lü yılların başına kadar uzanmaktadır. Bu yöntem, gıdaların doğal yapısını ve besin değerlerini koruyarak, suyun süblimasyon yoluyla uzaklaştırılması prensibine dayanmaktadır. İlk olarak askeri tayınlar ve uzay gemileri için geliştirilen bu teknoloji, zamanla gıda sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Yöney, 2005).

Dondurarak kurutma işlemi, üç ana aşamadan oluşur: dondurma, birincil kurutma ve ikincil kurutma. Bu süreç boyunca, ürünün su içeriği buz haline getirilir ve ardından düşük basınç altında süblimasyon yoluyla buharlaştırılır. Bu yöntemin en büyük avantajı, gıdaların aroma, tat, renk ve besin değerlerini büyük ölçüde korumasıdır (Aschkenasy, 1989).

Günümüzde hemen hemen her türlü meyve dondurarak kurutulabilmekte olup, özellikle çilek, şeftali, frambuaz, ahududu, böğürtlen, portakal, limon ve ananas gibi meyveler sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, kivi, armut, papaya, muz, kayısı, üzüm ve elma gibi tropikal meyveler de dondurarak kurutulmaktadır (Leibowitz, 2006). Bu yöntem, meyvelerin dilimler halinde, küp şeklinde veya toz olarak üretilmesine olanak tanır ve bu sayede çeşitli gıda ürünlerinin tüketilmesi sağlanır.

Dondurarak kurutmanın sunduğu avantajlar arasında yılın her ayında bulunabilirlik, geniş kullanım alanı, aroma korunumu, renk, tat, şekil ve koku korunumu, buzdolabında saklama gereksinimi olmaması, hafif ambalaj ve nakliye kolaylığı, uzun raf ömrü, yeniden sulandırılabilirlik ve katkı maddesi gereksinimi olmaması yer almaktadır (Fellows, 2000; Çelebi, 2006). Bu özellikler, dondurarak kurutma yöntemini gıda sektöründe vazgeçilmez kılmaktadır.

Vakumlu dondurarak kurutma (FD), enerji tüketimi yüksek olan bir kurutma yöntemidir. Alternatif olarak, mikrodalga FD ve atmosferik FD gibi diğer FD yöntemleri araştırılmıştır (Duan ve ark., 2007; Huang ve ark., 2011; Bantle ve Eikevik, 2011).

Bununla birlikte, FD hala biyolojik ürünlerin, proteinlerin, ilaçların ve meyvelerin yüksek kalitesini korumak için yaygın olarak kullanılmaktadır. FD ürünleri, genellikle diğer kurutulmuş ürünlere kıyasla daha iyi şekil, renk, lezzet ve daha iyi rehidrasyon kapasitesi sağlar. Ancak, FD'nin yüksek enerji tüketimi ve uzun kuruma süresi gibi dezavantajları bulunmaktadır.

FD süreci, malzemenin sıcaklığına bağlı olarak gıda kalitesini etkiler. Genellikle, malzemenin cam geçiş sıcaklığı veya özüt sıcaklığından düşük bir sıcaklıkta tutulması gereklidir. FD süreci, birincil kuruma aşaması ve ikincil kuruma aşaması olmak üzere iki aşamaya ayrılabilir. Birincil kuruma aşamasında, malzemenin ısıtma sıcaklığı, süblimasyonunu ve malzeme sisteminin konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Bu aşamada, sıcaklığın kademeli olarak artırılması veya sabit tutulması gerekebilir. İkincil kuruma aşamasında ise, sıcaklığın genellikle sabit tutulması tercih edilir.

Genellikle, vakum altında dondurarak kurutma, bir ürünün orijinal durumunu minimal değişikliklerle koruyarak ve rehidrasyon sonrasında tam özelliklerini kazanmasına olanak tanır. Bu, ıslak ürünlerin en etkili korunma yöntemlerinden biridir. Katı gıda malzemelerinin fiziksel ön kurulama işlemleri, ürün kalitesini artırmak ve kurutulacak ham gıdanın kalitesini iyileştirmek amacıyla önerilir. Bu ön işleme yöntemleri, genellikle ürünün son kullanımına ve gereksinimlerine bağlı olarak kuruma öncesi uygulanır. Örneğin, blanşlama, enzimleri etkisiz hale getirir, dokuların yumuşamasına neden olur ve renk ile tat kaybını en aza indirir (Guan ve Brennan, 1995).

Dondurmadan önce minimal ısı işlemi, dokuların korunmasına yardımcı olur ve donmuş gıdaların kalitesini ve raf ömrünü artırır (Torreggiani, 1993). Dondurma aşaması, dondurarak kurutmanın başarısı için kritiktir. Dondurulma anında kristalleşme, dondurulmuş ürünlerdeki gözeneklerin boyutlarına doğrudan etki eder ve dondurarak kurutulmuş ürünün rehidrasyon davranışını etkiler (Ratti, 2001). Bu kristalleşme süreci, ürünün mikro yapısını belirler ve sonuç olarak nihai ürün kalitesini etkiler (King, 1975).

Hızlı dondurma, genellikle daha kaliteli donmuş ürünlerle sonuçlanır. Çünkü kristalleşme daha ince ve yaygın olur. Bu durum, hücre duvarlarına zarar verme olasılığını azaltır.

Yavaş donma ise daha büyük buz kristallerine yol açarak hücre duvarlarına zarar verebilir. Bu nedenle, bitki dokuları için donma hızı son derece önemlidir. Uluslararası Soğutma Enstitüsü, donma hızını ürünün içinden hareket ettiği hız olarak tanımlar ve iyi sonuçlar genellikle 2 ila 5 cm/saat arasındaki hızlarda elde edilir (IIR, 2020).

Çoğu meyve ve sebze, %80'den fazla su içerir ve su seviyesi meyve türleri arasında çevresel etkiler ile büyük ölçüde değişir. Genel olarak, su, yenilebilir kısmın derisi hariç olmak üzere düzenli bir şekilde dağılmıştır; deri genellikle çevrelediği dokudan daha az su içerir (Kader, 2002).

Beslenmede kritik bir yer tutan tarımsal ürünler, üretimden tüketim aşamasına kadar pek çok aşamada kayıplara maruz kalmaktadır. Tahıllarda, hasattan son tüketiciye ulaşana dek oluşan kayıpların yıllık üretimin %10'unu bulduğu, kuru ot üretiminde ise bu oranın %28'e kadar çıktığı tespit edilmiştir. Meyve ve sebzelerde meydana gelen kayıpların ise yıllık üretimin %35-40'ına kadar ulaştığı öngörülmektedir (Işık ve Alibaş, 2000). Dünya çapındaki toplam üretim göz önünde bulundurulduğunda, bu kayıpların oldukça ciddi boyutlarda olduğu ortaya çıkmaktadır (İzli, 2007).

Meyveler, hasat sonrası kayıpları oldukça yüksek olan bozulabilir ürünlerdir. Dünya genelinde bu kayıplar %20 ile %40 arasında değişmektedir. Bu kayıpların başlıca nedenleri uygun olmayan hasat teknikleri, taşıma koşulları ve depolama şartlarıdır. Meyvelerin toplanmasından tüketiciye ulaşmasına kadar geçen süreçte birçok fiziksel işlem yer alır. Hassas ürünlerde bu kayıplar %50'yi aşabilmektedir (Kader, 2002). Mevsiminde üretilen meyve fazlalığı, ürünlerin depolanmasıyla çözülebilir, ancak soğuk hava depoları hem kuruluş hem de işletme açısından maliyetlidir.

Meyvelerin kurutulması hem depolama kolaylığı sağlar hem de tonaj bakımından %80'lere kadar kütle azalımı olduğunda taşımayı kolaylaştırır. Çoğu meyve, kurutma işlemi sonrasında uygun koşullarda, özellikle enerji gerektirmeyen ortamlarda saklanabilir (Fan ve ark., 2005). Kurutma, tarih boyunca insanlar için önemli bir besin koruma yöntemi olmuştur. Etin dahi kurutulması, besine ulaşamayacak zamanlarda insanlığı açlıktan kurtarmıştır. Kurutmanın amacı, besinden suyu uzaklaştırmak ve su

içeriğini yaklaşık %10'a düşürmektir. Böylece, besin üzerindeki bakteriler suya erişemediği için besini tüketemezler (Vadivambal ve Jayas, 2007; Koca ve ark., 2007).

Kurutma işlemi başlangıçta güneş ışınlarıyla gerçekleştirilmiş ve günümüzde de bu geleneksel yöntem kullanılmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, böcekler ve çeşitli mikrobiyal organizmaların gıdalardan uzak tutulması gereklidir. Bu nedenle, modern yöntemler olan Fırında Kurutma, Mikrodalga Fırında Kurutma ve Dondurarak Kurutma gibi farklı teknikler günümüzde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kurutmanın amacı, besinden suyu hızlı bir şekilde uzaklaştırmak ve besinin özelliklerini korumaktır. Bu konu üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Her ürünün özelliklerinin farklı olması nedeniyle, en iyi kurutma yönteminin bulunması elzemdir ve bu, karmaşık çalışmalara ve teknolojik olanaklara bağlıdır.

Kurutma üzerine yapılan birçok çalışma, sıcaklık, basınç ve ürünün fiziksel durumu gibi değişkenleri incelemiştir. Özellikle iklim krizi sonrası besine ulaşmanın zorlaşacağı göz önüne alındığında, kurutma çalışmalarının önemi daha da artmaktadır.

Bu çalışma;

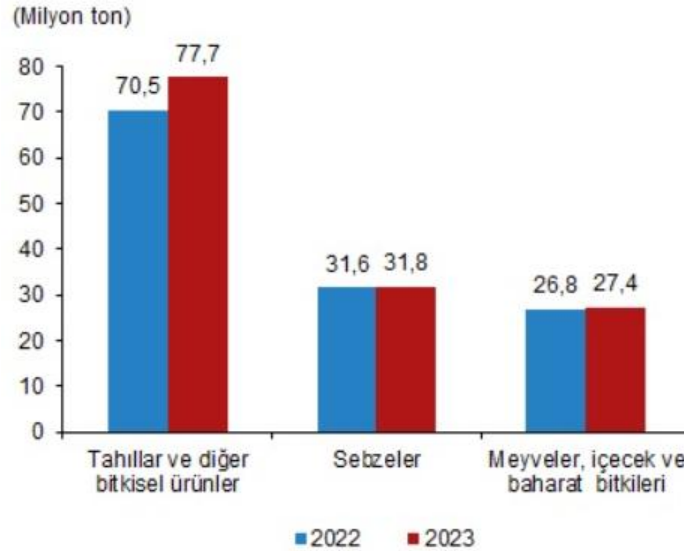
- i-Ürün kurutulması sırasında harcanan enerji miktarının belirlenmesi,
- ii- Bu çalışma, taze ve kurutulmuş ürün örneklerinde renk parametrelerinin, toplam renk değişim değerlerinin, esmerleşme ve beyazlaşma indekslerinin belirlenmesi ve taze ürüne en yakın sonucu veren kurutma yönteminin veya yöntemlerinin saptanması amacıyla yürütülmüştür.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2023 yılında meyve, içecek ve baharat bitkilerinin üretim miktarı, bir önceki yıla göre %2,3 oranında artış göstererek yaklaşık 27,4 milyon tona ulaşmıştır. Bununla birlikte, bu genel artışa rağmen, elma üretiminde bir önceki yıla kıyasla %4,5 oranında bir düşüş yaşanmıştır (TÜİK, 2023).

Meyve üretimindeki diğer değişiklikler ise şu şekildedir:

- Zeytin üretiminde %48,9 oranında bir azalma kaydedilmiştir.
- Şeftali ve nektarin üretimi toplamda %6,8 oranında artmıştır.
- Kiraz üretimi %12,3, vişne üretimi ise %19,5 oranında artış göstermiştir.
- Turunçgil meyvelerinde, mandalina üretiminde %58,3, portakal üretiminde %74,8 ve limon üretiminde %75,8 oranında artış yaşanmıştır.
- Fındık üretimi %15,0 ve Antep fıstığı üretimi %26,4 oranında azalma göstermiştir.
- Ceviz üretiminde %7,5 oranında artış meydana gelmiştir.
- Muz üretimi ise %6,7 oranında bir düşüşle azalmıştır.

Bu veriler, tarım sektöründeki değişiklikleri ve meyve üretiminde belirli ürünlerdeki dalgalanmaları ortaya koymaktadır. Özellikle turunçgil meyvelerindeki büyük artışlar dikkat çekerken, elma ve zeytin gibi önemli ürünlerdeki üretim azalması dikkat çekmektedir. Bu değişiklikler hem iç piyasa taleplerini hem de ihracat potansiyelini etkileyebilir.



Şekil 1.1. Bitkisel üretim (TÜİK, 2023)

Çizelge 1.1. Meyveler, içecek ve baharat bitkileri üretim miktarları (TÜİK, 2023)

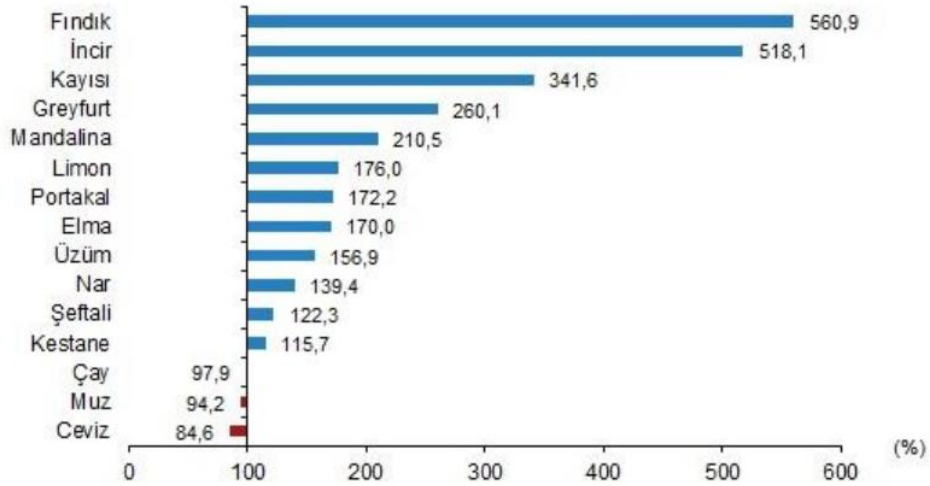
(Ton)					
Üretim					
Meyveler, içecek ve baharat bitkileri	2022	Pay (%)	2023	Pay (%)	Değişim (%)
Elma	4.817.500	18,0	4.602.517	16,8	-4,5

TÜİK, Bitkisel Üretim İstatistikleri, 2023

Kaynak: Tarım ve Orman Bakanlığı

Çizelge 1.2. Yıllara göre Türkiye’de elma üretim miktarları (TÜİK, 2022)

	2018	2019	2020	2021	2022
Elma (Ton)	3.625.960	3.618.752	3.618.752	4.300.486	4.817.500



Şekil 1.2. Türkiye meyve ürünlerinde yeterlilik dereceleri (TÜİK, 2022)

Çizelge 1.3. Dünya Elma Verileri

	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	Değişim (%)
Alan (bin ha)	4.862	4.621	4.645	4.717	-	1,6
Verim (ton/ha)	17.472	17.993	18.475	18.493	-	0,1
Üretim (1000 ton)	76.641	75.512	72.524	79.413	76.131	-4,1
Tüketim (1000 ton)	75.700	74.854	72.005	79.110	75.749	-4,2
İthalat (1000 ton)	6.255	6.064	5.795	5.943	5.672	-4,6
İhracat (1000 ton)	6.674	6.473	5.904	5.884	5.817	-1,1

FAO'nun sağladığı verilere göre, 2019 yılında küresel meyve üretiminde elma, yaklaşık %10'luk bir payla muz ve karpuzun ardından üçüncü sırada gelmektedir. 2019-2020 döneminde dünya çapındaki elma üretiminin 79 milyon ton olduğu öngörülmüştür. Ancak, 2020/21 döneminde bu üretim miktarının geçen sezona göre %4,1 oranında azalarak 76,1 milyon tona düşeceği tahmin edilmektedir (FAO, 2020).

Dünyada en yüksek elma üretim kapasitesine ve dikim alanına sahip olan Çin, 2019-2020 sezonunda üretimini önceki yıla göre %29 artırarak 42,4 milyon tona çıkarmıştır. 2020-2021 döneminde ise Çin'deki elma üretiminin yaklaşık 40 milyon ton civarında, Avrupa Birliği'nde ortalama 12 milyon ton ve Amerika Birleşik Devletleri'nde ise yaklaşık 5 milyon ton seviyelerinde olması beklenmektedir. Çin, 2020-2021 döneminde dünya genelindeki toplam elma üretiminin %53,2'sini sağlayarak lider ülke konumunda olmaya devam edecektir (SGB, 2021).

Türkiye, dünya elma üretiminde önde gelen ülkelerden biri olup, 2019-2020 sezonunda 3,6 milyon ton üretimiyle dünyada dördüncü sırada yer almıştır. 2020-2021 sezonunda dünya genelinde elma ihracat ve ithalat hacminin, 2019-2020 dönemine benzer şekilde yaklaşık 6 milyon ton civarında kalması öngörülmektedir (Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, 2021).

Bu veriler, elma üretiminin küresel boyuttaki önemini ve Çin'in üretimdeki baskın rolünü göstermektedir. Aynı zamanda, Türkiye'nin elma üretiminde dünya sıralamasında önemli bir konumda bulunduğunu ve küresel pazarın istikrarını koruduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 1.4. Türkiye Elma Verileri

	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	Değişim (%)
Alan (ha)	171.417	171.410	173.394	175.357	174.640	-0,4
Verim (kg/ağaç)	46	50	53	53	59	11,3
Meyve Veren Ağaç (1000 adet)	52.272	55.585	55.771	61.288	64.558	-0,1
Üretim (1000 ton)	2.480	2.570	2.926	3.032	3.626	19,6
Yurt içi kullanım (1000 ton)	1.800	1.967	2.042	2.255	2.413	7,0
İthalat (1000 ton)	60	87	22	76	151	98,2
İhracat (1000 ton)	612	556	754	696	1.176	68,9

2019 yılı itibarıyla Türkiye’de elma üretim alanları ve üretim miktarlarında belirgin farklılıklar görülmektedir. Bu dönemde en geniş elma üretim alanına sahip il, 235 bin dekarla Niğde olarak öne çıkmaktadır. En çok meyve veren elma ağacına sahip olan il ise 9,2 milyon ağaçla Karaman olarak kaydedilmiştir. Niğde, Isparta, Karaman, Antalya ve Konya illerinin toplamda yaklaşık 912 bin dekarlık bir alana sahip olduğu, bu miktarın Türkiye’nin toplam elma üretim alanlarının yaklaşık %52’sini oluşturduğu belirtilmiştir (SGB, Ocak 2021).

Elma üretim miktarına bakıldığında, 2019 yılına gelindiğinde Türkiye’nin toplam elma üretimi 3,6 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu miktarın, önceki yıla göre %0,2 oranında bir düşüşe işaret ettiği belirtilmektedir. En yüksek elma üretimi, 732 bin tonla Isparta ilinde gerçekleşmiş olup, Isparta’yı 486 bin tonla Karaman ve 438 bin tonla Niğde takip etmektedir (Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, 2021).

Bu veriler, Türkiye'deki elma üretiminde belirli illerin baskın rolünü ve üretim alanlarının bölgesel dağılımını göstermektedir. Elma üretimi, özellikle Isparta, Karaman ve Niğde illerinde yoğunlaşmıştır.

Çizelge 1.5. Geleneksel Kurutma ile Dondurarak Kurutmanın Karşılaştırılması (Özenir, 2009)

Özellik	Geleneksel kurutma	Dondurarak kurutma
Uygulanabilirlik	Kolay kuruyan gıdalar için uygun (sebzeler, tahıllar)	Çoğu gıda maddesine uygulanabilir, kuruması zor gıdalarda kısıtlı
Kullanım Alanı	Kötü kalite etlerin kurutulmasında	Pişmiş ve ham etlerde
Sıcaklık Aralığı	37-93°C	Donma noktasının altında
Basınç	Atmosferik basınç altında	Düşük basınç (27-133 Pa)
Kurutma Mekanizması	Yüzeyden buharlaşma ile	Buz yüzeyinde süblimasyon ile
Çözücü Hareketi	Çözücü hareket halinde	Minimum çözücü hareketi
Yapısal Bozulma ve Büzülme	Yapısal bozulma ve büzülme fazladır	Minimum yapı bozulumu ve büzülme
Rehidrasyon	Yavaş, tamamlanmamış rehidrasyon	Hızlı, tamamlanmış rehidrasyon
Yoğunluk	Katı veya gözenekli yapı, orijinal maddeden daha yüksek yoğunlukta	Gözenekli yapıda, orijinal maddeden düşük yoğunlukta
Koku ve Tat	Koku ve tat sıkça bozulur	Tat ve koku korunur
Renk	Renk koyu form alır	Renk yoğunlukla korunur
Besin Değeri	Besin değeri azalır	Besin değeri yoğunlukla korunur
Maliyet	Maliyeti düşüktür.	Maliyeti yüksektir.

Dondurarak kurutma işlemi, işlenen gıdanın ağırlığında azalma sağlar. Çoğu gıda maddesi, meyveler, %80-90 oranında sudan oluşmaktadır. Bu suyun uzaklaştırılmasıyla gıdanın ağırlığı ciddi oranda azalır, bu da taşınmasını kolaylaştırır. Bu özellik, özellikle askeri yemekler ve kamp malzemeleri üreten firmalar için avantaj sunar; böylece bir kişinin gerekli gıdayı tek başına taşıyabileceği dondurarak kurutulmuş yiyecekler üretilir. Ayrıca, dondurarak kurutulmuş gıdalar uzay yolculukları için de ideal bir seçenektir (Yöney, 2005).

Gıda sektöründe dondurarak kurutma, insanların beslenme zincirinde önemli yer tutan meyveler gibi ürünler için vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir. Farklı meyve çeşitleri, meyve sularından pürelerine kadar çeşitli formlarda dondurarak kurutulmakta ve toz ya da parçacık halinde piyasaya sunulmaktadır. Bu kurutulmuş meyveler, çabuk rehidrasyon gereken kahvaltılık gevrekler veya atıştırmalıklara kolayca eklenebilmektedir (Leibowitz, 2006).

Dondurarak kurutma işlemi, ürünün su içeriğini süblimasyon yoluyla azaltarak gerçekleştirildiğinden, kurutulan ürünlerin yapısı, besin değeri ve lezzeti büyük ölçüde korunur. Bu yöntem, gıdaların uzun süre dayanıklı kalmasını sağlar ve besin değeri yüksek gıdaların kolayca taşınabilmesini mümkün kılar.

Neredeyse her tür meyve dondurularak kurutulabilir. Dondurularak kurutulmuş olarak her zaman bulunabilen temel meyveler arasında çilek, ahududu, şeftali, frambuaz, böğürtlen, portakal, limon ve ananas yer almaktadır. Buna ek olarak, kivi, papaya, armut, kayısı, muz, üzüm ve elma gibi meyveler ile tropikal meyveler de dondurularak kurutulmaktadır. Dondurularak kurutulmuş meyveler dilimlenmiş, küp şeklinde veya toz halinde üretilebilir (Aschkenasy, 1989).

Dondurarak kurutma tekniği, bir dizi avantaj sunarak tercih edilir hale gelmiştir (Özenir, 2009). Bu avantajlar şunlardır:

1. Yılın Her Ayında Bulunabilirlik ve Geniş Kullanım Alanı: Dondurarak kurutulmuş gıdalar, yılın herhangi bir zamanında bulunabilir ve geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Leibowitz, 2006).
2. Aroma Korunumu: Uçucu aroma bileşenleri, süblimasyon sırasında uzaklaşan su buharına karışmaz, böylece meyvenin yapısında kalmaya devam eder. Bu durum, aroma korunumunun %80-100 oranında sağlanmasına katkı sağlar (Fellows, 2000).
3. Renk, Tat, Şekil ve Koku Korunumu: Dondurarak kurutulmuş gıdalar, kuru halleriyle renklerini, tatlarını, formlarını ve kokularını muhafaza eder (Çelebi, 2006).
4. Buzdolabında Saklama Gereksinimi Yok: Dondurarak kurutulmuş gıdaların saklanması için buzdolabına ihtiyaç duyulmaz (Aschkenasy, 1989).
5. Hafif Ambalaj ve Nakliye Kolaylığı: Dondurarak kurutulmuş gıdaların ambalajları ve kendileri oldukça hafiftir, bu da nakliye sırasında kolaylık sağlar (Çelebi, 2006).
6. Uzun Raf Ömrü: Bazı durumlarda oldukça uzun bir raf ömrüne sahip olabilirler. Örneğin, meyveler yaklaşık 8-10 yıl gibi uzun süreler boyunca muhafaza edilebilir (Çelebi, 2006).
7. Yeniden Sulandırılabilirlik: Dondurarak kurutulmuş gıdalar, sulandırıldıklarında taze hallerine geri dönerler ve eski dokularını yeniden kazanırlar.

8. Katkı Maddesi Gereksinimi Yok: Dondurarak kurutma işlemi sırasında herhangi bir katkı maddesine ihtiyaç duyulmaz.
9. Kolay Çözünürlük: Liyofilizasyon yöntemiyle kurutulmuş toz içecekler, suda daha hızlı ve kolay çözünebilir, topaklanma yapmazlar, bu da kullanımlarını pratik hale getirir.
10. Pratiklik: Günlük meyve ihtiyacını karşılamada kolaylık sağlar ve pratik bir çözüm sunar.

Bu avantajlar, dondurarak kurutma yöntemini gıda sektöründe vazgeçilmez kılmakta ve gıdaların besin değerlerini, lezzetlerini ve diğer organoleptik özelliklerini koruyarak uzun süre saklanmalarına olanak tanımaktadır.

Elma üretimi, birçok ülkede tarımsal ekonominin önemli bir parçasıdır. Elma, besleyici değeri yüksek bir meyve olup, iç pazarda tüketimi yaygındır ve aynı zamanda ihracat açısından da önemli bir üründür. Elma üretimi, çiftçilerin gelir kaynağı olmasının yanı sıra, tarımsal iş gücü açısından da önemli bir istihdam sağlamaktadır.

Elma üretimi, iklim koşullarına oldukça duyarlıdır. Soğuk iklimlerde ve belirli sıcaklık aralıklarında en iyi şekilde yetişir. Elma ağaçları, genellikle kışın soğuk hava koşullarına ihtiyaç duyar ve yazın yeterli miktarda güneş ışığı almalıdır. İklim değişiklikleri ve ekstrem hava koşulları, elma üretimini olumsuz yönde etkileyebilir ve verimde dalgalanmalara neden olabilir.

Modern tarım teknikleri ve gelişmiş sulama sistemleri, elma üretiminde verimliliği artırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, hastalık ve zararlılara karşı dirençli elma çeşitlerinin yetiştirilmesi, üretimdeki kayıpları minimize etmeye yardımcı olmaktadır. Organik elma üretimi de son yıllarda artış göstermektedir ve tüketici talebine bağlı olarak yaygınlaşmaktadır.

Dünya elma üretiminde gelecekte, sürdürülebilir tarım uygulamalarının ve iklim değişikliğine uyum sağlayacak üretim tekniklerinin daha fazla önem kazanması beklenmektedir. Ayrıca, küresel ticaretin artmasıyla birlikte, elma üretiminde ve ticaretinde de büyüme öngörülmektedir.

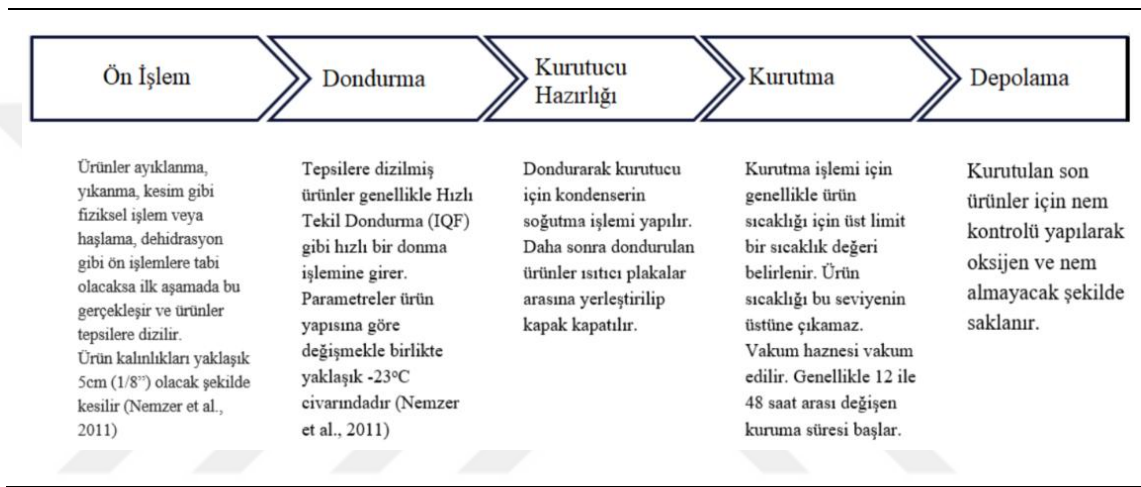
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çetin ve ark., (2021) Elma çeşitlerinin kurutulmasında farklı kurutma yöntemlerinin etkisinin belirlenmesi ve yapay zekâ algoritmalarıyla karşılaştırılmasını incelemişlerdir, Golden Delicious, Oregon Spur ve Granny Smith çeşidi dip (döküntü) elmaları; güneşte, kontrollü serada, mikrodalga fırında (200W), hibrit sistemde (100W+60°C), konvektif kurutucuda (70°C) ve dondurarak kurutucuda (-55°C) ultrases ön işlemlili ve ön işlemsiz olarak kurutmuşlardır. Kurutulmuş elmaların; kurutma karakteristikleri, fiziksel, termal, spektral ve biyokimyasal özellikleri belirlemişler ve yapay zekâ algoritmalarıyla değerlendirmişlerdir. Dondurarak kurutma için; Tüm çeşitler ve uygulamalar için kurutma süresi 4320 dk sürmüştür. Toplam renk değişiminin en fazla olduğu grup 23,76 ile Oregon Spur ultrases olduğunu tespit etmişlerdir. En yüksek rehidrasyon kapasitesi 6,50 ile Golden Delicious ultrases grubunda, en yüksek büzülme ise 0,92 ile Oregon Spur ultrases grubunda elde etmişlerdir. Kurutulmuş ürünlerin en yüksek pH değeri 4,28 ile Oregon Spur ön işlemsiz ve şçkm değerleri ise 12,1 ile Oregon Spur ultrases grubunda belirlemişlerdir. Ayrıca, biyokimyasal özellikler açısından en yüksek toplam fenolik madde, antioksidan aktivite ve askorbik asit seviyeleri Oregon Spur çeşidinin ön işlem uygulanmamış grubunda belirlemişlerdir. Ayrıca en yüksek sertlik değeri 198,66 gf Oregon Spur ultrases, kırılgenlik değeri ise 1,96 kırılgenlik mm^{-1} ile Granny Smith ultrases uygulamasında meydana geldiğini bildirmişlerdir. En yüksek spektral yansıma değerleri Golden Delicious ön işlemsiz uygulamasında belirlemişlerdir.

Bulantekin ve ark., (2021), elma meyvesinin mikrodalga-vakum kurutucuda ve mikrodalga-vakum destekli puf yapısı kazandırılarak kurutulması üzerine çalışmışlar ve bu süreçte bazı kalite kriterlerini incelemişlerdir. Araştırmalarında Red Delicious elma çeşidini (yaygın olarak Kırmızı Starking olarak bilinir) kullanmışlardır; ancak bu çeşidin diğer türlere göre daha yüksek şeker ve fenolik madde içeriği nedeniyle kurutma işlemi için uygun olmadığını saptamışlardır. Bunun yerine, şeker oranı daha düşük olan Grany Smith gibi elma çeşitlerinin kurutma işlemi için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Dondurarak kurutma işleminde, donmuş suyun vakum altında süblime edilmesiyle kurutma gerçekleşir; bu yöntem katı matrisin çökmesini ve büzülmesini önleyerek yapısal sertliğin azalmasını sağlar. FD örneklerinden sonra en düşük sertlik değerleri sırasıyla

0,9kW, 1,8kW ve 2,7kW MWVD+puf örneklerinde 2649,33g, 2873,83g ve 3046,86g olarak ölçülmüştür. Mikrodalga-vakum kurutma ile puf yapısının birlikte kullanılması, doku açısından olumlu sonuçlar vermekte olup, rehidrasyona karşı bir engel olarak bilinen doku sertleşmesini azaltarak daha yumuşak bir ürün elde edilmesine olanak tanıdığını belirtmişlerdir.

Özçelik ve ark., (2022), dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, kurulumu ve performans değerlendirmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır.



Şekil 2.1. Dondurarak kurutma işlem basamakları

Dondurarak kurutma yapılmadan önce ürünler fiziksel ya da kimyasal bir ön işlemden geçmesi gerektiğini bildirmişler. Ön işlemler, boylama, temizleme, dilimleme, haşlama, sterilizasyon, konsantre etme gibi dondurularak kurutulacak gıda hammaddesinin türüne ve özelliklerine göre değişiklik göstereceğini ve genellikle yaş halde ve oda sıcaklığındaki ürünler ön işlemde geçerken, donmuş hazır haldeki ürünler de ön işlemde geçirilmek üzere kullanılabileceğini saptamışlardır (Ozcelik ve ark., 2019).

Ön işlemin üç temel amacı olduğunu ve bunlardan ilki, son ürün kalitesini olumsuz etkileyecek düşük kalite, bozulmakta olan veya boyutları uygun olmayan hammaddenin başlangıçta elenmesi olduğunu belirtmişlerdir. Dondurarak kurutma işlemi yüksek maliyetli bir işlem olduğu için, genellikle kalitesi yüksek ve pahalı ürünler dondurularak kurutulması gerektiğini bildirmişlerdir (Darniadi ve ark., 2020). İkinci olarak üretim,

depolama, taşıma sırasında dondurularak kurutulmuş ürünün koku, renk, tat gibi özelliklerinin stabil kalması için uygulanabilir olduğunu tespit etmişlerdir. (Hua ve ark., 2010). Son olarak ta dondurarak kurutma işleminin süresini kısaltmak amacıyla uygulanabileceğini belirlemişlerdir. Örneğin; püre gibi daha uzun sürede kuruyan ürünlerde köpürtücü ajanlar ile ön işlem uygulamaları yapılabilir ve böylece kuruma süresi kısaltılabilir olduğunu bildirmişlerdir. (Ozcelik ve ark., 2019). Ultrasonik ön işlem yapılan ürünlerde de dondurarak kurutma süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir (Zhang ve ark., 2020). Ozmotik dehidrasyon ön işlemi ile yapılan başka bir çalışmada da aynı sonuca varılmıştır (Beaudry ve ark., 2004). Kurutma öncesinde fiziksel temizlik çok önemli olduğunu ve ürün üzerinde toz, mikroorganizmalar veya tarım ilacı kalıntıları gibi istenmeyen maddeler de yapısı bozulmadan kuruyacağı için tüketici üzerinde olumsuz etkiler meydana getirebileceğini tespit etmişlerdir. Bu yüzden endüstride basınçlı su tabancası gibi sulu temizlik yöntemlerinin tercih edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir (Hua ve ark., 2010). Bu çalışmada, dondurarak kurutma sisteminde sıcaklık artışı ile toplam enerji tüketimi arasında doğru orantılı, kurutma süresi için ters orantılı bir ilişkisi olduğu tespit edilmiş olup. Dondurarak kurutma işleminde, yoğun bir elektrik enerjisi tüketimi olduğu, elektrik tüketimini azaltmak için daha detaylı verimlilik çalışmaları yapılması önerilmektedir. Özellikle ikinci kuruma aşamasında sıcaklık artışı ile paralel artan elektrik enerjisi tüketimini düşürecek yöntemler araştırılması tavsiye edilmektedir. Bunun için elektrik tüketimi ve süblimleşen su miktarının, işlem boyunca belirli aralıklarla kayıt altına alınması gerektiği, elektrik tüketimini azaltmanın mümkün olmadığı durumlar için de yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Suiçmez ve ark., (2014), dondurarak kurutma sistemlerinde kurutma parametrelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, bir dondurarak kurutma cihazı tasarlayıp üretmişler ve bu cihazın kontrol deneylerini gerçekleştirerek elde ettikleri verileri mevcut bilgilerle karşılaştırmışlardır. Deneysel araştırmalar iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada, farklı geometrik özelliklere sahip numunelerin kuruma özelliklerini belirlemişlerdir. İkinci aşamada ise, en hızlı kuruma eğilimi gösteren numune geometrisinden çok sayıda örnek hazırlayarak bu örneklerin kuruma özelliklerini ayrıntılı bir şekilde analiz

etmişlerdir. Çalışmanın sonunda elde edilen veriler ve kazanılan deneyimler doğrultusunda çeşitli önerilerde bulunmuşlardır.

- **Sızdırmazlık:** Dondurarak kurutma sisteminin üretiminde sızdırmazlığın sağlanması, vakum pompasının daha kısa sürede çalışmasına ve enerji tüketiminin düşmesine imkan verir.
- **Düşük Basınç:** Kurutma hacminin sızdırmazlığı, iç ortam basınç seviyesinin daha düşük tutulmasını ve süblimasyonun düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini mümkün kılarak kurutma kalitesini yükseltir
- **Ağırlık Sensörü:** Sistem içine -30°C ile +30°C arasındaki sıcaklık değişiminden etkilenmeyen bir ağırlık sensörünün yerleştirilmesi, kurutma süreci boyunca sistemin kontrolünü kolaylaştırır.
- **Infrared Isıtıcılar:** Vakum altında taşınım veya iletim yoluyla ısı transferi yapan ısıtıcılardan ziyade, ışınlama ısı transferi sağlayan infrared ısıtıcıların kullanılması, ısı transferini daha kolay hale getirebilir. Infrared ısıtma sistemi, kurutulacak maddenin iç kısımlarına daha hızlı nüfuz ederek süblimasyon hızını artırabilir.

Akpınar ve Biçer, (2003), elma dilimlerinin konvektif tip siklon kurutucudaki kuruma davranışlarını incelemişlerdir. Deneylerinde, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarla birlikte 1 ve 1,5 m/s hızında kurutucu hava kullanmışlardır. Bu koşullar altında, 12,5 mm kalınlığındaki elma dilimlerinin 280-540 dakika, 8 mm kalınlığındaki dilimlerin ise 180-320 dakika arasında kuruduğunu belirlemişlerdir. Elmaların kuruma davranışını açıklamak amacıyla 11 farklı ince tabaka kuruma modelini karşılaştırarak, logaritmik modelin en uygun model olduğunu saptamışlardır. Matematiksel modeller, non-lineer regresyon analizi ile çözülmüştür. Kuruma süresi, nem transferi, kurutma havasının hızı ve sıcaklığı gibi parametreleri dikkate alarak, elma dilimlerinin optimum işlem koşullarından daha yüksek koşullarda kuruduğunu gözlemlemişlerdir.

Eliçin ve Saçılık, (2005), tünel tipi güneş enerjili kurutucu kullanarak elmaların ince tabaka halinde kurutulma sürecini araştırmışlardır. Güneş enerjili tünel tipi kurutucuda elmaların nem içeriğinin %82'den %11'e 1,5 gün içinde düştüğünü, açık havada güneşte bırakılan elmaların ise bu seviyeye 2 günde ulaştığını tespit etmişlerdir. Deneysel verileri

Page, logaritmik ve Wang ve Singh modelleri ile incelemişler ve bu modellere ait sabitleri non-lineer regresyon analizi kullanarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, Wang ve Singh modelinin kuruma sürecini desteklediğini, ancak Page modelinin daha doğru sonuçlar sağladığını saptamışlardır. Ayrıca hava koşullarına bağlı olarak, güneş enerjili tünel tipi kurutucunun açık hava kurutmasına kıyasla kuruma süresini %14,28 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir.

Velic ve ark., (2004), konvektif kurutucuda kurutulan elmaların kuruma kinetiğini ve farklı hava hızlarının ısı taşınımı ile ortalama difüzyon katsayısına etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, elma dilimlerini tepsili bir kurutucuda 600°C sıcaklıkta ve çeşitli hava hızlarında (0,64m/s, 1,00m/s, 1,5m/s, 2,00m/s, 2,50m/s ve 2,75m/s) kurutmuşlardır. Kuruma süreci boyunca ürün sıcaklığındaki değişimleri, bağıl nemi ve kurutucu havanın sıcaklığını ölçmüşlerdir. Kurutulmuş maddenin kalitesini belirlemek amacıyla rehidrasyon oranını bir değerlendirme kriteri olarak kullanmışlardır. Kinetik eşitlikleri eksponensiyel matematiksel ifadelerle ifade ederek, modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Artan hava hızının, nem içeriğinin düşmesi için gerekli süreyi azalttığını, ayrıca hava hızındaki artışla birlikte ısı transfer katsayısında ve efektif difüzyon katsayısında artış sağladığını tespit etmişlerdir. Rehidrasyon sürecinde, kurutma ile uzaklaştırılan suyun %72'sinin geri döndüğünü belirlemişlerdir.

Özenir ve ark., (2009), Golden Smith adı verilen yeşil ve sulu elmanın dondurarak kurutma yöntemiyle kuruma kinetiğini incelemiş ve bazı mevcut kuruma modelleri ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Elmanın kuruma davranışını incelemek için yüksek vakum altında dondurarak kurutma işlemi uygulamışlar ve belirli zaman aralıklarında elmanın nem içeriğindeki değişimleri gözlemlemişlerdir.

En sık tercih edilen kurutma yöntemleri arasında güneşte kurutma, kabin tipi kurutucularda kurutma, mikrodalga kurutma, ozmotik dehidrasyon, sprey kurutma, dondurarak kurutma ve akışkan yatak kurutucularda kurutma yer almaktadır (Marques ve ark., 2006).

Dondurarak kurutulmuş gıdanın besin kalitesinin büyük ölçüde korunduğu yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Ratti, 2001; Marques ve ark., 2006). Ancak, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, dondurarak kurutma yönteminin daha yüksek maliyetli ve daha uzun kuruma süresi gerektirdiği belirtilmiştir (Kumar ve ark., 2001; Ratti, 2001; Fan ve ark., 2005; Marques ve ark., 2006).

2.1 Kurutucuların Sınıflandırılması

2.1.1 Konveksiyon Kurutma

Bu sistemlerde hava veya farklı bir gaz, ısı taşıyıcı olarak kullanılarak sistem içinde dolaşmaktadır. Tünel kurutucular (ürünün hava akımıyla hareket ederek kurutulması), kabinli ve bölmeli kurutucular (tepsilere yerleştirilen ürüne sıcak hava üflenmesi) ve döner kurutucular (ürünün sıcak hava akımına maruz bırakılması) gibi örnekler, taşınım kurutma işlemi için kullanılan kurutucu tiplerini oluşturmaktadır (Aktaş, 2007; İzli, 2012).

2.1.2 Kondüksiyon Kurutma

Kurutulacak malzemenin üzerinde durduğu bir plaka veya metal duvar aracılığıyla ısının iletim yoluyla aktarılması prensibine dayanır. Bu tür kurutucularda, ıslak malzeme buharlaşma sürecine tabi tutulurken ısıtılmış yüzeyle temas halindedir. Bu yöntem özellikle kâğıt ürünlerinin kurutulmasında yaygın olarak kullanılır. Tambur tipi kurutucular, kondüksiyon kurutmanın bir örneğidir (Yüzgeç, 2005; İzli, 2012).

2.1.3 Radyasyon Kurutma

Bu yöntem, ısı enerjisinin maddeye ışınım yoluyla iletilmesi prensibine dayanır. Kurutma için gereken ısı enerjisi, elektromanyetik spektrumun kızıl ötesi bölgesindeki ışınlar aracılığıyla yaş maddeye aktarılmaktadır. Bu ışınlar, geçtikleri ortamı ısıtmaz; ancak emildikleri nesneleri ısıtır. Radyasyon kurutma yöntemi, özellikle ince film şeklinde yayılan tabakaların kurutulmasında tercih edilmektedir (Özgül, 2007), çünkü kızıl ötesi ışınların etkisi yüzeyden derinlemesine çok az nüfuz etmektedir. Ayrıca, desenli ürünlerin, örneğin kâğıt ve tekstil ürünlerinin kurutulmasında da kullanılmaktadır (Güngör ve Özbalta, 1997; İzli, 2012).

2.1.4 Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma yöntemi, eczacılık ürünleri, serumlar, bakteri ve virüs kültürleri, deniz ürünleri gibi birçok farklı ürünün kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aktaş, 2007).

Bu yöntemde kurutulacak yaş madde, önce -25°C veya -30°C gibi oldukça düşük sıcaklıklara hızla soğutularak dondurulmaktadır. Donmuş haldeki üründe bulunan su, süblimasyon yöntemiyle uzaklaştırılmak üzere özel bir işlemde geçmektedir. Bu aşamada, üründeki donmuş suyun buharlaşabilmesi için serbest buhar basıncından biraz daha düşük bir vakum ortamı oluşturulur ve gerekli süblimasyon ısı sağlanır. Böylece donmuş su, sıvı faza geçmeden doğrudan buhar fazına geçerek ürün yapısında minimum değişikliklerle uzaklaştırılmış olur (Özgül, 2007; İzli, 2012).

Dondurarak kurutma, diğer bir adıyla liyofilizasyon, yalnızca modern teknolojiye değil, tarih boyunca da kullanılmış bir tekniktir. Bu işlemin, tarihte ilk kez İnkalar tarafından patatesi uzun süre muhafaza etmek amacıyla kullanıldığı düşünülmektedir. İnkalar, bu yöntemi kullanarak patatesin besin değerini korumuş ve ürünü bozulmadan saklamayı başarmışlardır. Bu geleneksel işleme “chuno” adı verilmiştir ve düşük sıcaklıklarda yapılan dondurarak kurutma işleminin ilk örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Suiçmez, 2014).



Şekil 2.2. Dondurularak kurutulmuş patatesler

Dondurarak kurutma işleminde, ürün içerisindeki su önce katı forma getirilir ve ardından düşük basınç altında süblimasyon yoluyla sistemden uzaklaştırılır. Bu işlem, vakum pompası kullanılarak yapılır. Ürün kurutma bölmesine yerleştirildikten sonra çevresindeki hava, vakum pompası ile çekilir. Uygun vakum seviyesi sağlandığında, süblimasyon ısısı sayesinde katı haldeki su doğrudan buhar fazına geçer ve buhar halindeki su vakum pompası yardımıyla sistem dışına taşınır. Vakum pompasından önce bulunan bir yoğuşturucu, buhar fazındaki suyun pompaya ulaşmasını ve orada yoğunlaşmasını önleyerek sürecin verimliliğini artırır.

2.1.5 Dielektrik Kurutma

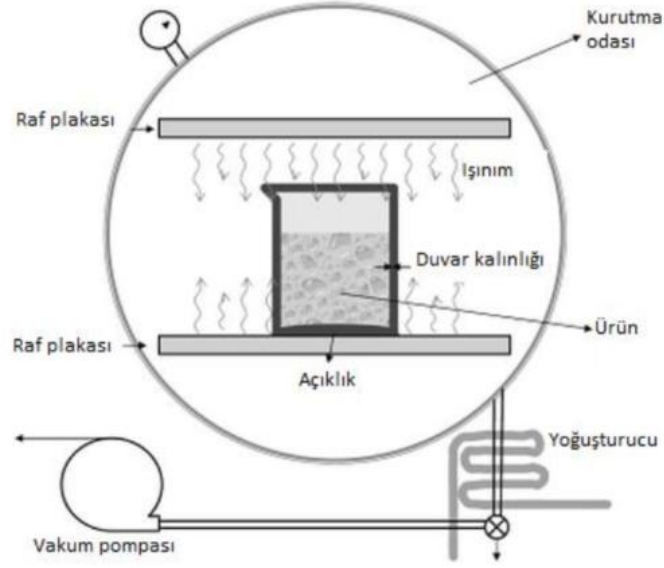
Malzemenin içine yerleştirilen ve çok yüksek frekansa sahip bir elektromanyetik alana maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemde, elektromanyetik alanın hızlı değişimi nedeniyle moleküler sürtünme meydana gelir ve bu da termal enerji üretir. Bu termal enerji sayesinde malzeme kurutulur (Yüzgeç, 2005; İzli, 2012).

2.1.6 Ozmotik Kurutma

Bitki hücresi duvarında iç ve dış çevre arasında ozmotik basınç farkı oluşturarak nemin azaltılmasını esas alır. Kurutulacak materyal, yüksek ozmotik basınca sahip bir çözeltinin içine daldırılarak nem kaybı sağlanır. Bu amaçla genellikle meyveler için şekerli, sebzeler için ise tuz (NaCl) içeren çözeltiler kullanılır (Yağcıoğlu, 1999; Özgül, 2007). Ayrıca, mikrodalga ve konvektif kurutmanın birleştirildiği kombine kurutucular da kullanılmaktadır (Kaya, 2008; İzli, 2012).

2.1.7 Vakumda Kurutma

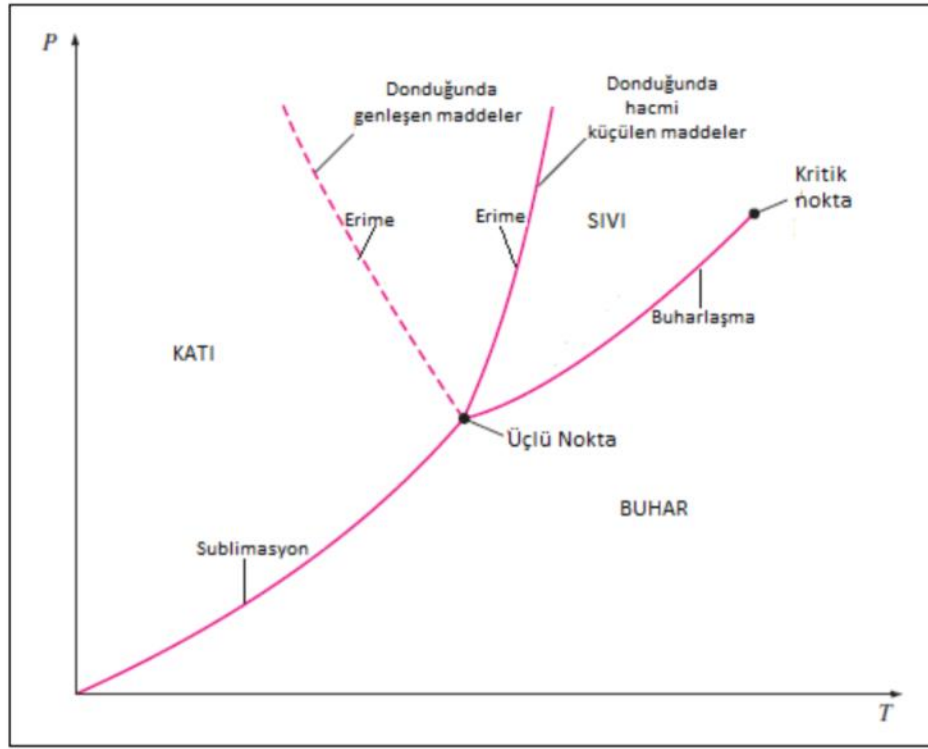
Vakumda kurutma, düşük basınç altında gerçekleştirilen bir kurutma işlemidir ve bu sayede kurutma için gerekli ısı azalır. Bu işlem için kullanılan cihazlara vakumlu kurutucu denir ve boyutları mutfakta kullanılabilecek küçük cihazlardan, kereste ürünleri için oda büyüklüğünde cihazlara kadar değişir. Vakumda kurutma, daha düşük sıcaklıklarda hızlı ve yüksek seviyede kuruma sağlar. Bu yöntem enerji tasarrufu sağladığı için maliyetleri düşürür ve rekabet gücünü artırır. Ayrıca, kurutma süresi diğer yöntemlere göre daha kısadır, bu da üretimi artırır. Vakumda kurutma, düşük sıcaklıkta yapıldığından, malzemelere daha az zarar verir ve yüksek kaliteyi korur (Suiçmez, 2014).



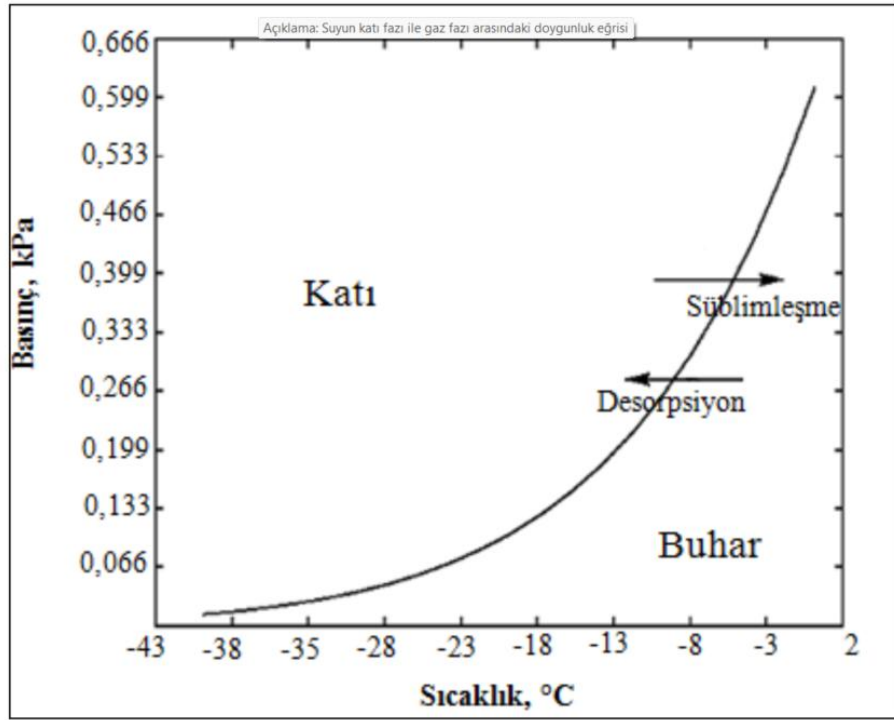
Şekil 2.3. Vakumda kurutma odası

2.2 Süblimasyon

Maddenin üç temel fazı vardır: katı, sıvı ve gaz. Bir maddenin bu fazlardan birinde, ikisinde veya üçünde bulunabilmesi sahip olduğu enerjiye ve çevresindeki basınca bağlıdır. Enerji ve basınçtaki değişiklikler, maddenin bir fazdan diğerine geçişine yol açabilir. Örneğin, katı fazdan sıvıya geçiş erime, sıvı fazdan gaz fazına geçiş buharlaşma ve katı fazdan doğrudan gaz fazına geçiş süblimleşme olarak adlandırılır. Süblimasyonun gerçekleşmesi için, maddenin faz diyagramında P-T (basınç-sıcaklık) eğrisinde süblimasyon eğrisinin üzerinde bulunması gerekir ve bu süreçte düşük basınç kritik bir rol oynar. Şekil 2.4'te, farklı sıcaklıklarda buzun buhar basınçları gösterilmiştir (Suiçmez, 2014).



Şekil 2.4. Saf maddenin P-T diyagramı



Şekil 2.5. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi

2.3 Ürünün Su Aktivitesi

Gıdaların su aktivitesi (a_w), mikrobiyolojik, kimyasal ve biyokimyasal bozulma süreçlerinde kritik bir rol oynar (Anthony ve Fontana, 2000). Saf suyun su aktivitesi 1,0 iken, meyve ve sebzelerin su aktivitesi genellikle $a_w = 0,970 - 0,996$ arasında değişmektedir. Genellikle meyvelerin su aktivitesi sebzelere göre biraz daha düşüktür.

Mikroorganizmalar su aktivitesine göre farklı hassasiyetler gösterir. Genel olarak, su aktivitesi 0,6'nın altına indiğinde tüm mikrobiyolojik faaliyetler durmaktadır. Gıdalarda bozulmaya yol açan bakteriler genellikle $a_w = 0,90$ 'ın altına düştüğünde faaliyetlerini durdurur; buna karşılık, küflerin çalışmasının sona erdiği su aktivitesi sınırı genellikle $a_w = 0,70 - 0,75$ aralığında kabul edilir. Ancak bazı kseroofilik küfler $a_w = 0,65$ seviyesinde bile aktif olabilir. Mayaların faaliyet gösterebileceği minimum su aktivitesi ise $a_w = 0,85$ düzeyindedir. Mikroorganizmaların faaliyet gösterdiği en düşük su aktivitesi değerleri kaynaklara göre farklılık gösterebilir. Bu değişiklik, su aktivitesinin mikroorganizmalar üzerindeki engelleyici etkisinin diğer çevresel faktörlerle bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır.

Bazı mikroorganizmalar düşük su aktivitesine uyum sağlayabilir; dolayısıyla, minimum su aktivitesi sınırları değişiklik gösterebilir. Mikroorganizmaların üreme gösterebildikleri en düşük su aktivitesi değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Suiçmez, 2014).

Çizelge 2.1. Gıdalarda önemli olan mikroorganizma faaliyetleri için yaklaşık minimum su aktivite (a_w) değerleri

Mikroorganizmalar	a_w	Mikroorganizmalar	a_w
Gruplar		Gruplar	
Bozulma yapan bakterin çoğu	0,90	Halofilik bakteriler	0,75
Bozulma yapan mayaların çoğu	0,88	Kserofilik küfler	0,61
Bozulma yapan küflerin çoğu	0,80	Ozmofilik mayalar	0,61

Gıdalarda su aktivitesi (a_w), mikrobiyolojik bozulmaların yanı sıra kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar üzerinde de önemli bir rol oynar. Su aktivitesi 0,6'nın altına düştüğünde bile bazı bozulma reaksiyonları gerçekleşebilir, ancak bu reaksiyonların hızı düşer. Su aktivitesi, mikroorganizmaların çoğalma ve faaliyetlerini, ayrıca metabolit üretme yeteneklerini de etkiler. Örneğin, bir küf belirli bir su aktivitesinde gıdayı bozabilirken, mikotoksin üretimi için daha yüksek bir su aktivitesine ihtiyaç duyar. Mikroorganizmalar düşük su aktivitesinde üreyip faaliyet gösterebilir, ancak toksin üretimi için daha yüksek su aktivitesine ihtiyaç duyarlar; bu, orta nemli gıdaların güvenli olmasının başlıca nedenidir. (Suiçmez, 2014)

Su aktivitesi, mikroorganizma faaliyetleri dışında çeşitli reaksiyonların hızını da etkiler. Su, reaksiyonlarda farklı roller oynar: çözücü, reaktan, reaksiyon ürünü veya katalitik etkileri engelleyici bir unsur. Gıdanın su oranı, çevre havasının bağıl nemi ile dengeye ulaştığında, bağıl nemin 100'e bölünmesi ile su aktivitesi (a_w) hesaplanır (Cemeroğlu ve ark., 2003).

Çizelge 2.2. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi değerleri

Oluşturulan mikotoksinler	Küfler	Minimum su aktivitesi değerleri	
		Faaliyet için	Toksin üretimi için
Aflatoksin	<i>Aspergillus flavus</i>	0,82	0,83-0,87
	<i>A. parasiticus</i>	0,82	0,87
Ochratoksin	<i>A. ochraceus</i>	0,77	0,85
	<i>Penicillium cyclopium</i>	0,82 - 0,85	0,87 - 0,90
Patulin	<i>P.expansum</i>	0,81	0,99
	<i>P.patulum</i>	0,81	0,95
Stachybotryn	<i>Stachybotrys atra</i>	0,94	0,94

Çizelge 2.3. Bazı gıda gruplarının su aktivite (a_w) değerleri

GIDALAR	Su Aktivitesi (a_w)	GIDALAR	Su Aktivitesi (a_w)
Kuru meyveler	0,60 – 0,75	Bal	0,75
Kuru sebzeler	0,30 – 0,40	Kek ve kuru pasta	0,60 – 0,90
Reçel – marmelat	0,80 – 0,91	Şekerlemeler	0,60 – 0,65
Meyve suyu konsantreleri	0,79 – 0,84	Ekmek	0,96
Tahıl ve baklagiller	0,65 – 0,75	Dondurulmuş gıdalar	0,60 – 0,90

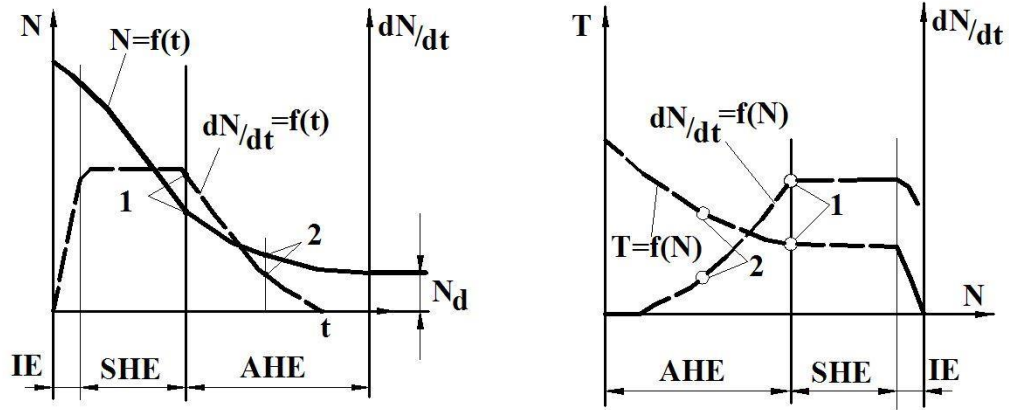
2.4 Denge Nemi

Gıdalar ve diğer nem içeren maddeler, bulundukları ortamla nem dengesi sağladıklarında sorpsiyon izotermi eğrileri meydana getirirler. Bu izotermiler, gıdanın nem içeriği ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişkiyi tanımlar ve gıdanın yaş veya kuru olmasına bağlı olarak değişiklik gösterir. Yaş gıdaların nem kaybetmesi sürecine desorpsiyon, kuru gıdaların nem kazanması sürecine ise adsorpsiyon denir (Suiçmez, 2014).

Desorpsiyon izotermi, nemli maddelerin farklı bağıl nem seviyelerine sahip ortamlarda dengeye ulaştıktan sonra tartılarak ağırlık kaybının belirlenmesiyle elde edilir. Adsorpsiyon izotermi ise başlangıçta tamamen kuru olan bir materyalin, farklı bağıl nem koşullarında dengeye ulaştığında nem kazanmasıyla elde edilir. Sorpsiyon izotermi çeşitli amaçlar için kullanılır; desorpsiyon izotermi kurutma işleminin izlenmesi ve incelenmesinde, adsorpsiyon izotermi ise kurutulmuş ürünlerin higroskopik özelliklerinin ve uygun depolama koşullarının belirlenmesinde faydalıdır (Demirtaş, 1996).

2.5 Kurumanın Kinetiği

Kuruma kinetiğinde, materyal ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zamana bağlı olarak analiz edilmektedir. Şekil 2.6'da, tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri gösterilmektedir (Demir ve Günhan, 2002).



Şekil 2.6. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri

- Ürünün nemi ile kuruma süresi arasındaki ilişki: $N = f(t)$
- Kuruma hızı ile ürün nemi arasındaki ilişki: $dN / dt = f(N)$
- Kuruma hızı ile kuruma süresi arasındaki ilişki: $dN / dt = f(t)$
- Ürün sıcaklığı ile nemi arasındaki ilişki: $T = f(N)$

Kuruma olayı sırasında üç temel evre gözlemlenmektedir. Bu evreler şunlardır:

- **Isınma Evresi:** Bu başlangıç aşamasında, materyal ile çevresindeki hava sıcaklık dengesi sağlanır ve kuruma işlemi için gereken enerji sağlanmaya başlar.
- **Sabit Hız Evresi:** Bu evrede, materyal yüzeyindeki serbest su hızla buharlaşır ve kuruma hızı sabit kalır. Kuruma işlemi genellikle en hızlı bu aşamada gerçekleşir.
- **Düşen Hız Evresi:** Serbest su miktarı azaldıkça, kuruma hızı yavaşlamaya başlar. Bu aşamada suyun iç kısımlardan yüzeye taşınması sınırlı hale gelir ve kuruma hızı giderek düşer.

Kuruma işlemi birkaç evrede ilerler. İlk olarak, ısınma evresi (IE) gerçekleşir; bu evrede, ürünün sıcaklığı kurutma ortamıyla dengelenene kadar devam eder ve kuruma hızı artar. Ardından, sabit hızla kuruma evresi (SHE) başlar; bu evrede yüzeydeki suyun buharlaşma hızı, yüzeye iletilen suyun hızına eşittir. Bu evre, birinci kritik nokta (BKN) ile sona erer. BKN'den sonra, azalan hızla kuruma evresi (AHE) devreye girer; yüzeydeki su filmi kaybolur ve kuruma hızı kademeli olarak düşmeye başlar. İkinci kritik nokta (İKN) ise, kuruma hızındaki değişimin doğrusal olmaktan çıkmaya başladığı aşamadır. Kuruma süreci teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle analiz edilebilir (Mengeş, 2005).

2.6 Kurutma Hızı

Kurutma hızı, birim zamanda birim alandan buharlaşarak ayrılan su kütlesidir ve ürünün kalitesi ve maliyeti açısından kritik bir faktördür (Kırmacı, 2008). Sıcaklık, basınç ve geometri parametreleri değiştirilerek kontrol edilebilir. Sıcaklık arttıkça kuruma hızı artar, ancak bu, ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, kurutma hızı istenen kaliteye göre optimum şekilde ayarlanmalıdır (Suiçmez, 2014).

2.7 Meyvelerin Dondurarak Kurutulmasında Meydana Gelebilecek Zorluklar

Dondurarak kurutma işlemi, suyun tamamını çıkarmakta ve maddenin yapısını değiştirmeden kurutmakta önemli zorluklar içermektedir. Bu yöntem genellikle suyun sadece %90-95'ini çıkarabilmektedir, bu da bakteri ve enzimlerin aktivitesini yavaşlatsa da durdurmamaktadır. Ayrıca, buharlaşma sürecinde ortaya çıkan ısı, maddenin dokusunu, bileşimini ve şeklini değiştirerek kimyasal reaksiyonları tetiklemektedir. Bu değişiklikler, yiyeceğin lezzetini artırabilir veya değiştirebilir, ancak kurutulan maddenin eski haline getirilmesi gerektiğinde bu durum farklı bir nitelik kazanır. Dondurarak

kurutma işlemi, buharlaşma sürecinde gerekli olan ısıyı atlayarak, maddenin bileşim ve yapısının değişmesini önlemeyi amaçlamaktadır (Yöney, 2005).

Yapılan araştırmalar, dondurarak kurutulmuş çileklerin bazı enzimatik veya mikrobiyal etkiler gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu etkilerin başında, çilek içerisindeki renk pigmentlerinin doğasından kaynaklanan bazı etkileşimler gelmektedir. Bu etkileşimler sonucunda çileğin renginin kahverengiye dönüştüğü görülmüştür. Oluşum süresi genellikle 30 gün olarak belirlenmiştir. Ancak, bu değişiklik meyvenin iç kısmında nadiren pembeden beje dönüşen bir renk değişimi olarak ortaya çıkabilirken, tat üzerinde herhangi bir değişime neden olmamaktadır (Aschkenasy, 1989).

Çoğu meyvenin yüzeyinde, liyofilizasyon sırasında donmuş su kristallerinin etkisiyle oluşan bir yapı meydana gelir. Bu yapı, şişe mantarını andıran bir görünüme sahiptir ve yüzeyde mükemmel bir yalıtıcı görevi görür. Ancak bu yalıtıcı özellik, meyve içerisindeki buz kristallerinin süblimasyon sürecinde gerekli olan ısının içeriye ulaşmasını engelleyebilir. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ısı içeriye iletilebilir hale gelir, ancak bu durum ürünün bozulmasına yol açabilir. Bu sorunun çözümü için, ışınlama ısıtma yöntemi geliştirilmiştir. Yüksek frekanslı dalgalar, iç kısımdaki molekülleri harekete geçirerek yalnızca süblimasyon için gerekli olan kadar ısı sağlar. Bu nedenle, gıda ürünlerinin liyofilizasyonunda sıklıkla bu yöntem tercih edilmektedir (Çelebi, 2006).

2.8 Rehidrasyon Etkisi

Dondurarak kurutulmuş meyvelerin tadını geri kazanmak için su eklenmesi ve bu miktarın dengelenmesi oldukça önemlidir. Özellikle meyvelerle yapılan şekerlemelerde, sadece ağızdaki tükürükle ıslatma yeterli olmayabilir, bu nedenle meyvenin tadını tam olarak alabilmek için uygun miktarda su eklenmelidir. Ancak, bu eklenen su miktarı da dikkatle kontrol edilmelidir. Bazı yardımcı maddeler kullanılarak kaplanan şekerlemeler, tat alma özelliğini artırabilir. Bu yardımcı maddeler arasında %25 oranında hazır meyve suyu, doğal yağlar ve tatlandırıcılar gibi bileşenler bulunabilir. Kurutulan ürünler, normalde içerdikleri su oranına yakın bir şekilde sulandırılmalıdır. Bu süreçte, meyvelerin doğal tadını korumak ve ürün kalitesini artırmak için uygun formülasyonlar kullanılmalıdır (Aschkenasy, 1989; Duxbury, 1993; Çelebi, 2006; Özenir, 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

Örneklerin kurutulması, laboratuvar tipi bir dondurarak kurutucu (Alpha 1-2 LD Plus, Osterode am Harz, Almanya) kullanılarak, 52 Pa vakum basıncı ve -50°C sıcaklık koşullarında yapılmıştır. Örneklerin ağırlık kayıpları, her 60 dakikada bir yapılan ağırlık ölçümleri ile belirlenmiştir. Tüm kurutma deneyleri, her biri üç kez tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Taze ve kurutulmuş ürünlerin renk ölçümleri için ise bir renk ölçüm cihazı (MSEZ-4500L, HunterLab, Virginia, ABD) kullanılmıştır.

3.1.1 Elma Çeşitleri

Yürütülen çalışmada Türkiye’de en çok bulunan elma çeşitlerinden üç tanesi incelenmiştir. Elma çeşitleri Starking, Granny Smith ve Gala olarak belirlenmiştir. Elmalar Bursa’da yerel bir marketten temin edilmiştir. Elma çeşitleri hakkında detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.1.Çalışmada kullanılan elma çeşitleri

3.1.2 Starking Delicious Elma



Şekil 3.2. Starking Elma

Starking Delicious elması, kışlık bir elma çeşididir ve dünya genelinde geniş bir kabul görmektedir. Bu elmanın meyvesi iri, yuvarlak konik bir şekle sahip olup, sarı zemin üzerine kırmızı renkte, seyrek noktalı ve parlak bir kabuğa sahiptir. Meyve sarımsı renkte ete sahiptir, yumuşak dokulu, sulu, tatlı ve aromatiktir. Ortalama ağırlığı yaklaşık 208 gramdır, bu da onu pazar ve tüketici tercihleri açısından cazip kılmaktadır.

Starking Delicious elmasının popülerliği, çeşitli tüketim şekillerine uygunluğundan kaynaklanmaktadır. Genellikle taze tüketim için tercih edilirken, aynı zamanda mutfak uygulamalarında, özellikle salatalar ve tatlılarda da kullanılabilir. Bu elma çeşidi, depolama ve raf ömrü açısından da avantajlar sunar, bu nedenle ticari olarak geniş ölçüde yetiştirilir ve satılır.

Bu elma çeşidinin kökeni, Kanadalı bahçıvan Leslie Stark'a dayanmaktadır. Leslie Stark, elmanın bu belirgin özelliklerini ve üstün kalitesini geliştirerek "Starking" ismini, kendi soyadını yaşatmak üzere vermiştir. Bu nedenle, Starking Delicious elması, sadece tarımsal değeri ile değil, aynı zamanda tarihsel ve kültürel bir anlam taşımaktadır.

Bilimsel araştırmalar, Starking Delicious elmasının, besin değerleri açısından da zengin olduğunu göstermektedir. Yüksek C vitamini içeriği ve antioksidan kapasitesi, bu elmayı sağlık açısından da değerli kılmaktadır. Ayrıca, elmanın nem içeriği ve şeker profili,

kurutma işlemleri sırasında önemli avantajlar sunar, bu da dondurarak kurutma tekniklerinin verimliliğini artırır.

3.1.3 Granny Smith Elma



Şekil 3.3. Granny Smith Elma

Granny Smith elması da birçok dilde kullanılan bir isimdir ve aslen İngilizce kökenlidir. Bu elma çeşidi, Avustralyalı bahçıvan Maria Ann Smith tarafından 1868 yılında Sydney'de keşfedilmiştir. Genellikle Granny Smith olarak adlandırılan bu elma çeşidi, Latince "*Malus domestica*" olarak bilinen elmaların içinde yer alan bir türdür.

Granny Smith elması, yeşil ve ekşi bir tat profiline sahip olmasıyla ünlüdür. Özellikle tatlımaya yönelik olmayan, hafif ekşi ve ferahlatıcı bir lezzeti vardır. Bu özelliği nedeniyle pişirme için de tercih edilir. Diğer özellikleri arasında şunlar vardır:

Granny Smith elması genellikle parlak yeşil bir renge sahiptir. Dokusu sert ve sulu olduğu için salatalara veya yemeklere eklemek için idealdir. Bu elma çeşidi, diğer bazı elmalar gibi uzun süre taze kalabilir, bu da depolama için uygun olmasını sağlar. Ekşi tadı, tatlımaya karşı bir denge sağlar ve özellikle elmalı turta gibi pişirme tariflerinde tercih edilir. Granny Smith elmaları, C vitamini bakımından zengindir, bu da bağışıklık sistemini destekler. Genel olarak, Granny Smith elması taze tüketim için uygun olmasının

yanı sıra, salatalarda, soslarda, turta veya kek gibi tatlılarda da kullanılabilecek çok yönlü bir elma çeşididir.

3.1.4 Gala Elma



Şekil 3.4. Gala Elma

Gala elması da oldukça popüler bir elma çeşididir. Bu elma çeşidi, aslında birçok farklı ülkede yetiştirilen ve tüketilen bir çeşittir. Gala elması, 1934 yılında Yeni Zelandalı bahçıvan J.H. Kidd tarafından geliştirilmiştir. İsmi, dünya çapında ticari bir başarı elde eden “Gala” adıyla almıştır.

Gala elması, birçok ülkede yetiştirildiği için biraz farklı tat profillerine sahip olabilir, ancak genel olarak şu özellikleri taşır:

Gala elması, parlak kırmızı renkte olup genellikle üzerinde sarı lekeler bulunur. Bu elma çeşidi sulu ve tatlı bir dokuya sahiptir. Tat profili genellikle tatlı ve hafif ekşi arasında bir yerdedir. Bu nedenle genellikle taze tüketim için tercih edilir. Gala elmaları, uzun süre taze kalabilen ve depolama için uygun olan elmalar arasındadır. Orta boyutta olan Gala elmaları, genellikle çocuklar tarafından da tercih edilir. Gala elması, salatalarda, doğranmış olarak atıştırmalık olarak veya taze tüketim için kullanılabileceği gibi, keklerde, turta ve tartılarda da kullanılabilir. Tercih edilen bir elma çeşidi olmasının nedenlerinden biri hem tatlı hem de ekşi notaları dengelemesi ve çeşitli yemek ve tatlı tariflerine uygun olmasıdır.

3.2 Kullanılan Cihazlar

3.2.1 Fırın



Şekil 3.5. Örneklerin ilk nem içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan fırın

Örneklerin ilk nem içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan fırın Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Örnekler 24 saat 70°C de kurutulduktan sonra nem içerikleri hesaplanmıştır.

3.2.2 Kurutma Makinesi

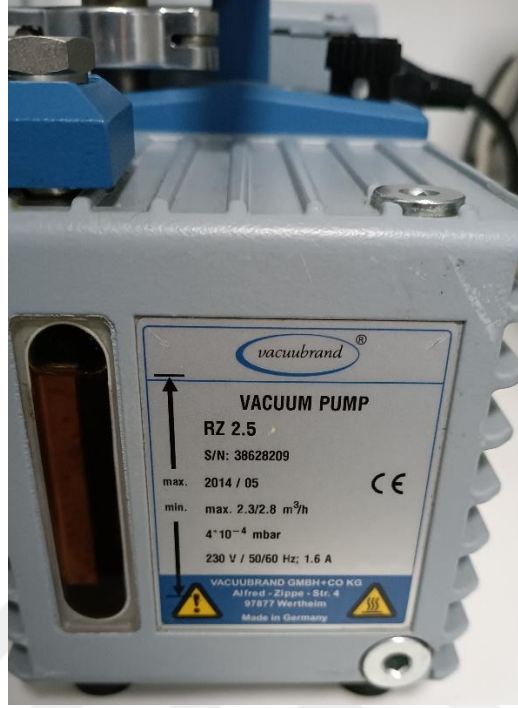


Şekil 3.6. Kurutma cihazı

Alpha 1-2 LD plus, bir laboratuvar tipi dondurarak kurutma yapan bir cihazdır ve genellikle biyolojik ve farmasötik ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Bu cihaz, örneklerin düşük sıcaklıklarda ve vakum altında kurutulmasını sağlar. Cihazın temel özellikleri arasında yüksek verimli soğutma kapasitesi, kullanıcı dostu kontrol paneli ve dayanıklı paslanmaz çelik yapısı bulunmaktadır. Ayrıca, enerji verimliliği ve güvenilir performansı ile laboratuvar ortamlarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Cihaz -50°C de 0.010 milibar basınç altında çalıştırılmıştır. Makine enerji ölçere bağlı olduğundan tüm çalışmalarda harcanan enerji ölçülüp ve kayıt altına alınmıştır.

3.2.3 Vakum Pompası



Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan vakum pompası

Vacuubrand RZ 2.5, yüksek performanslı bir vakum pompasıdır ve genellikle laboratuvar uygulamaları için kullanılır. Bu pompa, özellikle hassas dondurucu kurutma ve diğer vakum gerektiren işlemler için uygundur. Öne çıkan özellikleri arasında:

- Yüksek Vakum Performansı: 2 mbar'a kadar ulaşan nihai vakum kapasitesi.
- Çift Aşamalı: Daha hızlı ve daha etkili vakum sağlar.
- Dayanıklılık: Kimyasallara dayanıklı yapısı ile uzun ömürlü kullanım.
- Düşük Gürültü ve Titreşim Seviyesi: Sessiz ve sarsıntısız çalışır.

Vakum motoru ve soğutma makinesi aynı enerji ölççere bağlanmıştır. Tüm deneylerde harcanan enerji vakum pompası ve soğutma makinesinin harcadığı enerji toplamı olarak kayıt edilmiştir.

3.2.4 Enerji Ölçme Cihazı



Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan enerji ölçüm cihazı

Polaxtor wattmetre, elektrikli cihazların güç tüketimini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Bu cihaz, evde veya iş yerinde enerji verimliliğini izlemek ve optimize etmek için oldukça faydalıdır. İşte Polaxtor wattmetrenin kullanımı ve özellikleri hakkında ayrıntılı bilgiler:

Özellikleri:

Güç Ölçümü: Cihaz, anlık güç tüketimini watt (W) cinsinden ölçer.

Enerji Tüketimi: Uzun süreli enerji tüketimini kilowatt-saat (kWh) olarak kaydeder.

Gerilim ve Akım Ölçümü: Voltaj (V) ve akım (A) değerlerini gösterir.

Zaman Fonksiyonu: Elektrikli cihazların kullanım süresini izler.

Büyük LCD Ekran: Tüm ölçüm değerlerini kolayca okunabilir bir ekranda gösterir.

Programlanabilir Ayarlar: Enerji maliyetlerini hesaplamak için birim enerji fiyatı girişi yapılabilir.

3.2.5 Terazi



Şekil 3.9. Kullanılan Terazi

Hassas terazi mümkün olduğunca ortamdan etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmış ve ölçüm değerleri dikkatli bir şekilde kayıt edilmiştir.

3.2.6 Renk Ölçer Cihazı



Şekil 3.10. Renk ölçer

3.3 Yöntem

3.3.1 Nem İçeriğinin Belirlenmesi

Rasgele boyutlarda kesilen elmaların örnekleri alınarak, her bir elmadan parça alınarak 9 adet pedri kabına yerleştirilmiştir. Örnekler, 70 °C fırında 24 saat boyunca kurutulmuştur.



Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan elmalar

3.3.2 Nem Oranının Belirlenmesi

Elma çeşitlerinin her biri, üç farklı çalışma için toplamda ayrı ayrı olmak üzere dokuz çalışma yapılmıştır. Örnek dilimleri kare formunda ve ince dilimler halinde kesilmiştir.

Kurutma deneyleri sırasında nem oranı (MR) ve kurutma hızı (DR) hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

$$DR = \frac{M_{d+dt} - M_t}{dt} \quad (2)$$

Burada,

- M_t : t anındaki nem içeriği,
- M_o : başlangıçtaki nem içeriği,
- M_e : denge nem içeriği.
- dM : belirli bir zaman diliminde kaybedilen nem miktarı,
- dt : zaman değişimi.

Bu denklemler, kurutma süreci boyunca nem oranının ve kurutma hızının değişimini hesaplamak için kullanılmıştır.

Üç elma örneğinde de örnekler 20'şer gram olacak şekilde ayarlanmıştır. Örnekler dilimleyici de doğranan elma parçalarının rastgele bölgelerinden seçilmiştir. Böylelikle örnekler, çalışma yapılan elmayı temsil edebilir duruma gelmiştir.



Şekil 3.12. Vakum ortamında işlem gören örneklerin -50°C ile 0,010 mbar basınç altındaki görünümü

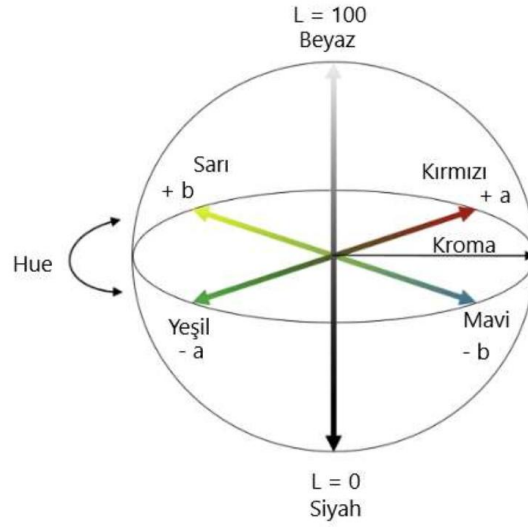
Çalışma esnasında örnekler düşük basınç altında gözlemlenmiştir. Örnekler hızlı dondukları için kristalleşme anında oluşan sesler gözlemlenmiş, tartı işlemi için soğutma makinası durdurulmuş ve örnekler hızlıca tartılmıştır.



Şekil 3.13. Kurutma işlemi tamamlanan örneklerden tartım sırasından bir görünüm.

Kurutma işlemi sonucunda örnekler son tartım işlemi ardından ayrı ayrı poşetlere konulmuştur. Tüm poşetler etiketlenmiş ve deney ile ilgili bilgiler bu etiketlere yazılmıştır.

3.3.3 Renk parametrelerinin belirlenmesi ve hesaplanması



Şekil 3.14. CIELAB renk uzayı diyagramı

Meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında, renk analizi amacıyla L^* , a^* ve b^* ölçüm değerleri kullanılır. Bu ölçümler, CIELAB renk uzayı içinde bir nesnenin rengini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Diyagramda görüldüğü gibi, L^* değeri parlaklığı ifade ederken, a^* ve b^* değerleri kromatik koordinatlar olarak tanımlanmıştır. L^* değeri parlaklık seviyesini gösterir (0 = siyah, 100 = beyaz), a^* değeri yeşil (-) ile kırmızı (+), b^* değeri ise mavi (-) ile sarı (+) renk tonlarını ifade etmektedir (Ly ve ark., 2020). Renk ölçüm işlemlerine başlamadan önce cihaz, siyah ve beyaz plakalar kullanılarak kalibre edilmiştir. Her bir uygulama için renk ölçümleri beş kez tekrarlanmıştır. Cihazdan elde edilen L^* , a^* ve b^* değerleri, insan gözünün algılayabileceği renk parametreleri olan kroma (C , renk doygunluğu) ve hue açısı (α° , 0° veya 360° = kırmızı, 270° = mavi, 180° = yeşil ve 90° = sarı) hesaplamalarında aşağıdaki formüllerle kullanılmıştır (Udomkun ve ark., 2017; Polat, 2023).

$$C = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (4)$$

Örnek rengi, Colorflex model renk ölçer (Hunter Lab Co., Reston, VA) ile ölçüldü. Deneme beş kez tekrarlandı. (Maskan, 2000).

3.3.4 Rehidrasyon Oranı



Şekil 3.15. Rehidrasyon işlemi 1'e 50 ölçek

Rehidrasyon işlemi için gözlenen değerler arasında en uyumlu deney grupları seçilmiştir. Bu örnekler içerisinde rastgele 0,50 gram örnekler alınarak saflaştırılmış 25 gram su içerisinde 14 saat bekletilmiştir.

Süre sonunda örnekler kurutma kâğıdı üzerinde numuneler üzerindeki fazla su kâğıda emdirilerek sadece ürünün ihtiva ettiği su kalıncaya kadar kısa süre bekletilmiştir. Rehidrasyon yapılan örnekler tartılmış ve kayıt altına alınmıştır.

Kurutulmuş örnekler, kontrollü sıcaklıkta (21 ± 1 °C) bir distile su banyosunda daldırılarak rehidre edilmiştir. Su hacmi, kurutulmuş meyvenin hacminin 30 katı olarak ayarlanmıştır. Kurutulmuş meyvelerin rehidrasyonu üç saat sonra durdurulmuştur. Daha sonra

örneklerin yüzeyindeki fazla su, kağıt havlu ile alınmıştır. Veriler, aşağıdaki formül kullanılarak rehidrasyon oranı (RR) cinsinden sayısallaştırılmıştır:

$$RR = \frac{W_R}{W_D} \quad (5)$$

Burada,

RR, rehidrasyon oranını (g/g, kuru bazda),

W_R , rehidre edilmiş örneklerin ağırlığını (g),

ve

W_D ise dehidre edilmiş örneklerin ağırlığını (g) ifade eder (Zielinska ve ark., 2016).

3.4 Enerji Verimliliği

Kurutma sistemlerinin enerji verimliliklerinin belirlenmesi Kurutucu sistemlerinin etkinliğini belirlemek için özgül nem uzaklaştırma hızı (SMER), nem uzaklaştırma hızı (MER) ve özgül enerji tüketimi (ÖET) kullanılmıştır. Özgül nem uzaklaştırma hızı (SMER), kurutma sürecinde kullanılan enerjinin etkinliğini tanımlar. SMER, tüketilen kilovat-saat başına uzaklaştırılan nem miktarı olarak tanımlanır ve fan gücü ve elektrikli cihazların verimlilikleri dahil olmak üzere kurutucuya verilen toplam güçle ilişkilidir (Prasertsan ve Saensaby, 1998; Chua ve ark., 2002; Tosun, 2009).

SMER (Specific Moisture Extraction Rate / Özgül Nem Uzaklaştırma Hızı)

$$SMER = \frac{M_u}{E_T} \quad (6)$$

Enerji tüketimi başına uzaklaştırılan nem miktarını gösterir. Daha yüksek SMER değeri, daha verimli bir kurutma işlemi anlamına gelir.

MER (Moisture Extraction Rate / Nem Uzaklaştırma Hızı)

$$MER = \frac{M_u}{t_k} \quad (7)$$

Belirli bir zaman diliminde uzaklaştırılan nem miktarını gösterir.

ÖET (Specific Energy Consumption / Özgül Enerji Tüketimi)

$$\text{ÖET} = \frac{E_T}{M_u} \quad (8)$$

M_u : Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi (kg)

E_T : Toplam enerji tüketimi (kWh)

t_k : Ürünün toplam kuruma süresi (h)

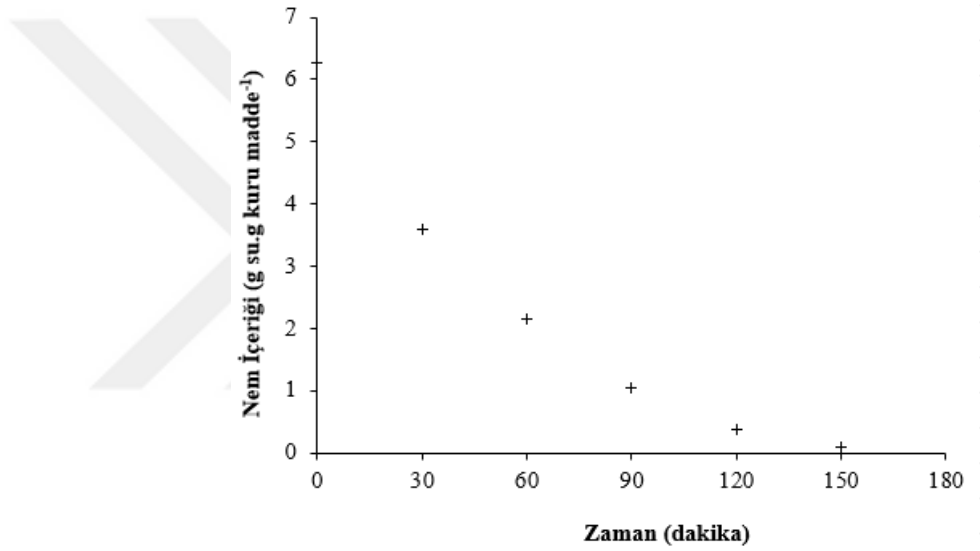
3.5 İstatiksel Analiz

Dondurarak kurutma işlemlerindeki tüm ölçümler üç kez tekrarlanmıştır. Üç tekrarın ortalama değerleri (ortalama $\pm$ standart sapma) bileşik içeriklerin sonuçlarını göstermek için kullanılmıştır. Deneysel veriler, istatistik yazılım ürünü JMP (Sürüm 7.0, SAS Institute Inc., Cary, NC, ABD) kullanılarak karşılaştırılmış ve varyans analizi (ANOVA) tek yönlü varyans analizi ile yapılmıştır. Değerlendirilen parametreler içinde örnekler arasındaki anlamlı farkları belirlemek için %95 güven seviyesinde ($P < 0,05$) En Küçük Anlamlı Fark testi (LSD) kullanılmıştır.

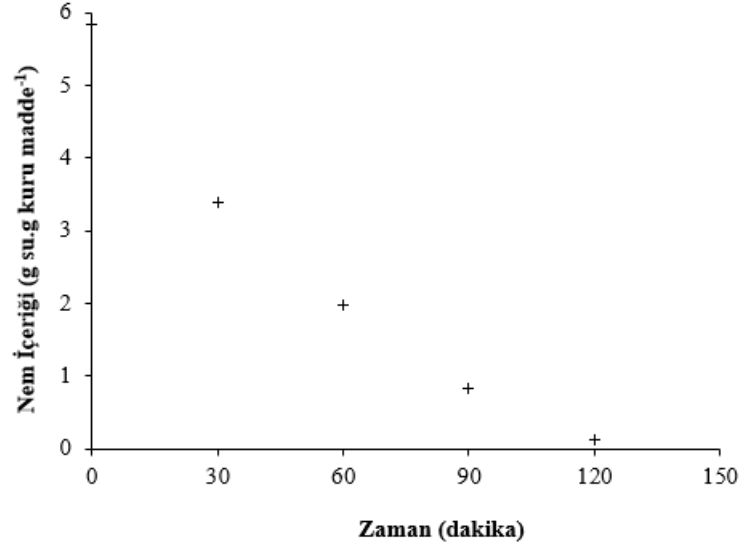
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Kurutma Karakteristikleri

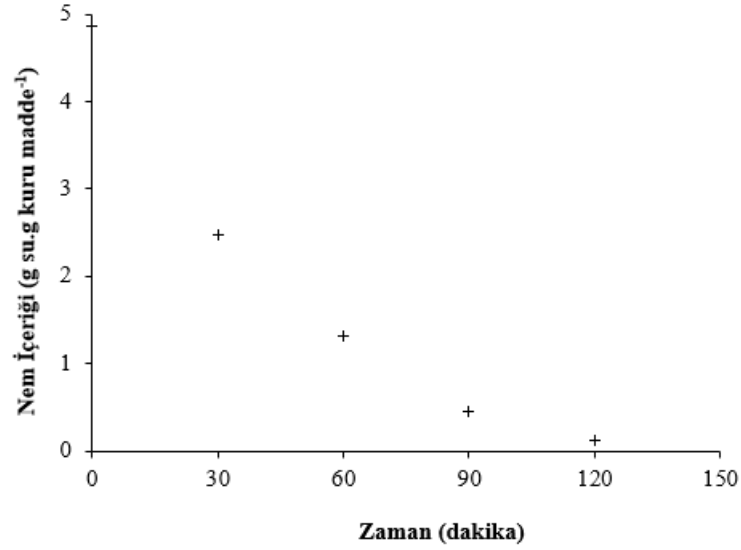
Şekiller 4.1-4.3’de dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulan Gala, Granny Smith ve Starking apple samples nem içeriklerinin zamanla değişimleri sunulmuştur. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, Gala, Granny Smith ve Starking elma örnekleri için ortalama toplam kuruma süreleri sırasıyla 150, 120 ve 120 dakika olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, kuruma süresi arttıkça nem içeriğinin sürekli azaldığını açıkça göstermektedir (Sacilik, 2007).



Şekil 4.1. Dondurarak kurutma koşulları altında Gala elma örneklerinin zamanla nem içeriklerindeki değişimler



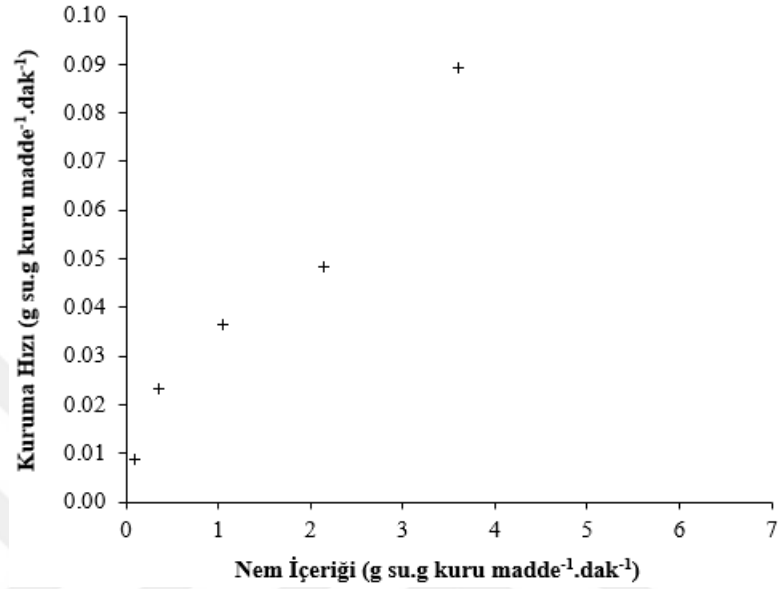
Şekil 4.2. Dondurarak kurutma koşulları altında Granny Smith elma örneklerinin zamanla nem içeriklerindeki değişimler



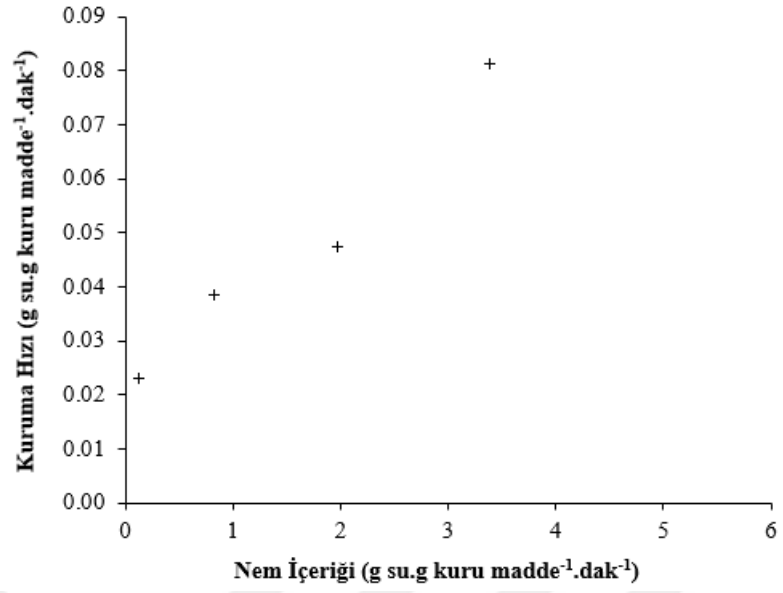
Şekil 4.3. Dondurarak kurutma koşulları altında Starking elma örneklerinin zamanla nem içeriklerindeki değişimler

Şekiller 4.4-4.6'da Gala, Granny Smith ve Starking elma örneklerinin kuruma hızlarının, nem içeriği ile nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3 birlikte incelendiğinde, kurutma işleminin başlangıcında örneklerin hızlı bir şekilde kuruduğu, ancak zamanla kuruma hızının azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, örneklerin dondurarak kurutulma işleminin azalan bir hız periyodunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Acar ve ark., (2015) yaptıkları dondurarak kurutma çalışmalarında benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca,

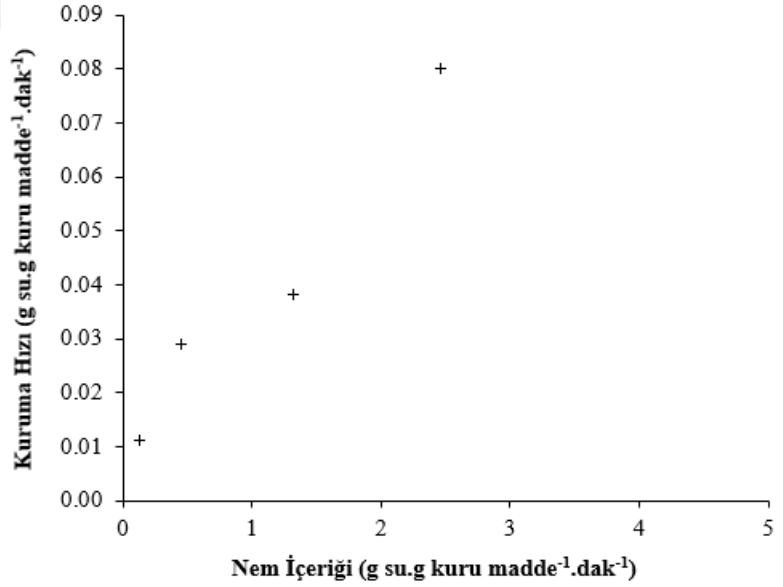
şekillerden de anlaşılacağı üzere, kurutulan örneklerin düşük ve yüksek nem seviyelerindeki kuruma hızları karşılaştırıldığında, yüksek nem seviyelerinde elde edilen kuruma hızlarının düşük nem seviyelerindeki kuruma hızlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Mundada ve ark., 2010).



Şekil 4.4. Gala elma örneklerinin dondurarak kurutma koşullarında nem içeriklerine karşı kuruma hızları



Şekil 4.5. Granny Smith elma örneklerinin dondurarak kurutma koşullarında nem içeriklerine karşı kuruma hızları



Şekil 4.6. Starking elma örneklerinin dondurarak kurutma koşullarında nem içeriklerine karşı kuruma hızları

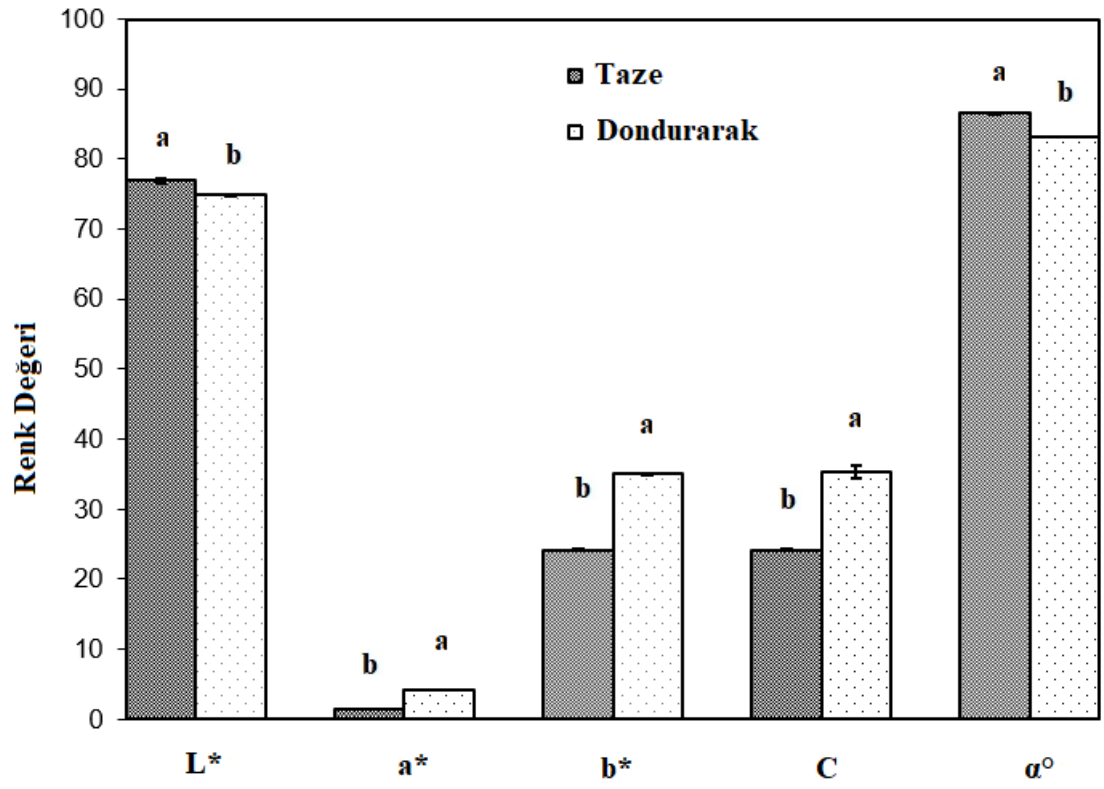
4.2 Renk Analiz Sonuçları

Taze ve dondurarak kurutulmuş Gala, Granny Smith ve Starking örneklerinin renk parametreleri olan L^* , a^* , b^* , Kroma (C) ve Hue açısı (α°) değerleri, Şekil 4.7 - 4.9'da gösterilmiştir.

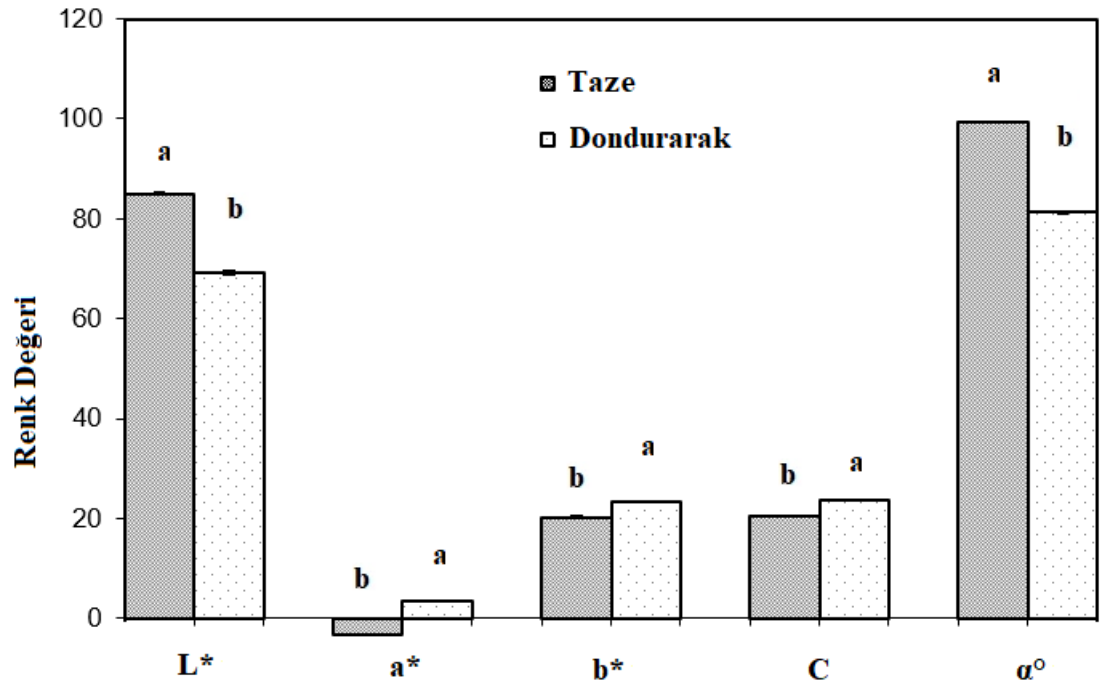
Elde edilen verilere göre, kurutulmuş Gala örneklerinde L^* değeri 76,936'dan 74,882'ye, α° değeri 86,584'ten 83,137'ye düşerken; a^* değeri 1,460'tan 4,244'e, b^* değeri 24,154'ten 35,044'e ve C değeri 24,198'den 35,300'e yükselmiştir. Taze Gala örneklerinin tüm renk parametrelerinin, kurutulmuş örneklerin değerlerinden istatistiksel olarak anlamlı şekilde farklı olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Granny Smith örneklerinde ise, L^* değeri 85,062'den 69,340'a, α° değeri 99,313'ten 81,298'e düşerken; a^* değeri -3,346'dan 3,602'ye, b^* değeri 20,314'ten 23,422'ye ve C değeri 20,588'den 23,697'ye çıkmıştır. Taze Granny Smith örneklerinin tüm renk parametrelerinin, kurutulmuş örneklerin değerlerinden istatistiksel olarak anlamlı ölçüde farklı olduğu bulunmuştur ($p<0,05$).

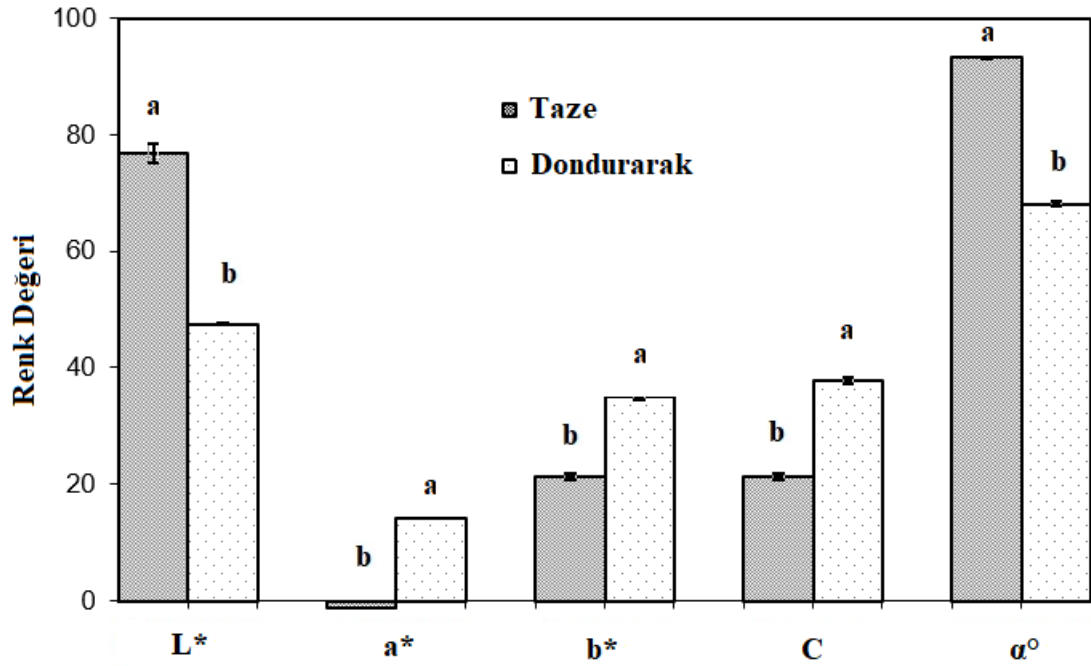
Starking örneklerinde, L^* değeri 76,844'ten 47,504'e, α° değeri 93,225'ten 68,125'e düşerken; a^* değeri -1,218'den 14,124'e, b^* değeri 21,338'den 35,124'e ve C değeri 21,373'ten 37,858'e yükselmiştir. Taze Starking örneklerinin tüm renk parametreleri, kurutulmuş örneklerin değerlerinden istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermiştir ($p<0,05$).



Şekil 4.7. Dondurarak kurutma koşullarında taze ve kurutulmuş Gala elma örneklerinin renk değerleri



Şekil 4.8. Dondurarak kurutma koşullarında taze ve kurutulmuş Granny Smith elma örneklerinin renk değerleri

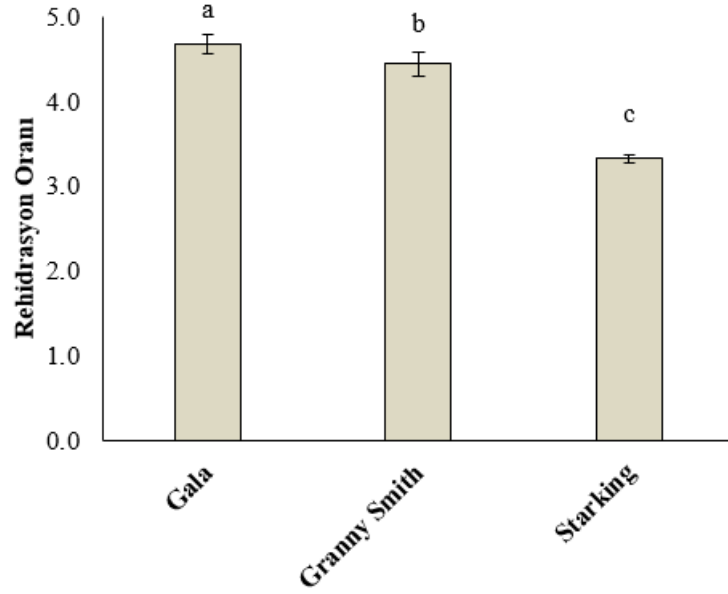


Şekil 4.9. Dondurarak kurutma koşullarında taze ve kurutulmuş Starking elma örneklerinin renk değerleri

Sonuçlara bakıldığında, dondurarak kurutma işleminin L^* ve α° değerlerinde azalmaya, a^* , b^* ve C değerlerinde ise artışa yol açtığı görülmüştür. Önceki çalışmalar incelendiğinde, İzli ve Polat, (2019) ayva dilimlerinin dondurarak kurutulması üzerine yaptıkları araştırmada, taze örnekler ile dondurularak kurutulmuş örneklerin L^* , b^* , C ve α° değerlerinin azaldığını, yalnızca a^* değerinin arttığını rapor etmişlerdir.

4.3 Rehidrasyon Oranı

Gala, Granny Smith and Starking örneklerinin rehidrasyon oranı sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre Gala örneklerinin rehidrasyon oranı değeri 4,673, Granny Smith örneklerinin rehidrasyon oranı değeri 4,440 ve Starking örneklerinin rehidrasyon oranı değeri 3,325 olarak belirlenmiştir. Gala, Granny Smith ve Starking örneklerinin tüm rehidrasyon oranı değerleri istatistiki olarak önemli ölçüde farklıdır ($P < 0,05$). İzli ve Polat, (2016) zencefil örneklerinin dondurularak kurutma çalışmalarında rehidrasyon oranı değerini 5,20 olarak bulmuşlardır.



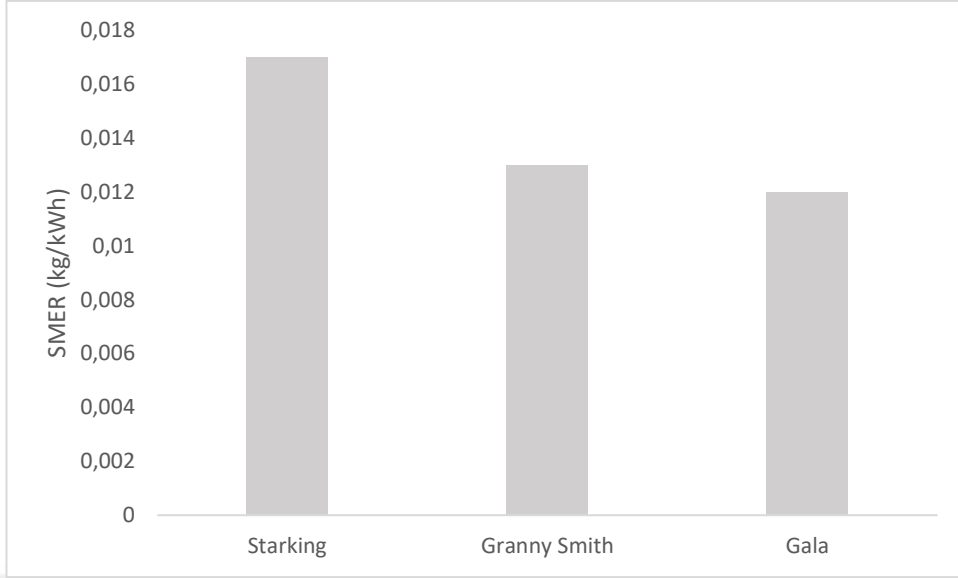
Şekil 4.10. Dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulmuş Gala, Granny Smith ve Starking elma örneklerinin rehidrasyon oranı değerleri

4.4 Enerji Analizi

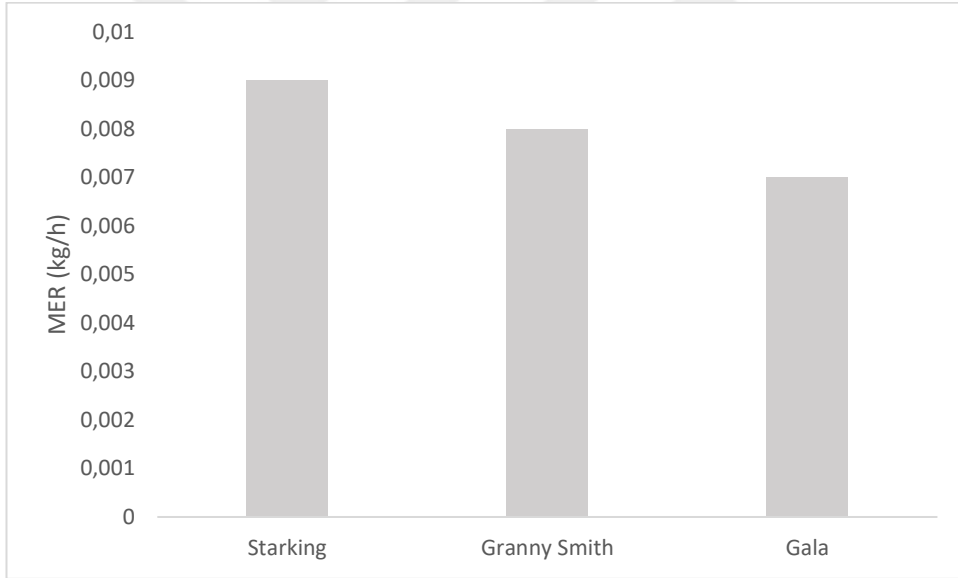
Çizelge 4.1. SMER, MER ve ÖET Sonuçları

	Starking	Granny Smith	Gala
SMER (kg/kWh)	0,017	0,013	0,012
MER (kg/h)	0,009	0,008	0,007
ÖET (kWh/kg)	60,29	74,45	82,80

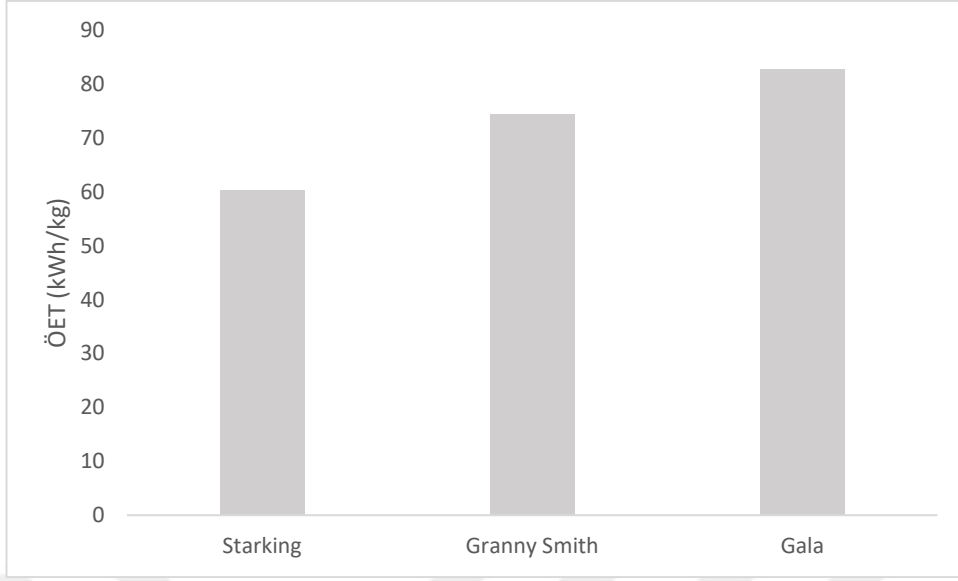
Starking Elması en verimli kurutma sürecine sahip. Hem SMER hem de ÖET değerleri açısından en iyi performansı gösteriyor. Granny Smith Elması orta seviyede bir verimlilik sunuyor, ancak kuruma süresi daha uzun. Gala Elması en düşük enerji verimliliğine sahip. Hem SMER hem de ÖET değerleri en düşük ve en yüksek değerlere sahip, bu da enerji tüketiminin en yüksek olduğunu gösterir.



Şekil 4.11. Özgül nem uzaklaştırma hızı



Şekil 4.12. Nem uzaklaştırma hızı



Şekil 4.13. Özgöl enerji tüketimi

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Starking, Granny Smith ve Gala elma çeşitlerinin dondurularak kurutma yöntemine tabi tutulmasının sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Kurutma Süreci ve Nem İçeriği:

Üç elma çeşidinin kurutma sürecinde, başlangıçtaki yüksek nem içeriği önemli ölçüde azalmıştır. Starking elma çeşidi en hızlı nem kaybını göstermiş, ardından Granny Smith ve Gala elma çeşitleri gelmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere, zamanla nem içeriği belirgin şekilde azalmış ve 120 dakika sonunda minimum seviyelere ulaşmıştır.

Renk Değişimleri:

Kurutma işlemi sonucunda elmaların renk parametrelerinde belirgin değişiklikler gözlenmiştir. Özellikle L* (parlaklık) değerlerinde azalma, a* (kırmızılık/yeşillik) ve b* (sarılık/mavilik) değerlerinde artış görülmüştür. Bu durum, elmaların kurutma sonrası daha koyu ve doygun renklere sahip olduğunu göstermektedir. C (kroma) değerindeki artış, elmaların kurutma sonrası daha canlı ve doygun renklere sahip olduğunu belirtmektedir. α° (hue açısı) değerindeki düşüşler ise elmaların renk tonlarının değiştiğini göstermektedir.

Rehidrasyon Kapasitesi:

Kurutulmuş elma örneklerinin rehidrasyon kapasiteleri incelendiğinde, yüksek oranda su geri kazanımı gözlemlenmiştir. Bu durum dondurarak kurutma yönteminin elma örneklerinde etkin bir rehidrasyon kapasitesi sağladığını göstermektedir. Starking elma çeşidi, en yüksek rehidrasyon kapasitesine sahip olmuştur, bunu Granny Smith ve Gala elma çeşitleri takip etmiştir.

Enerji Verimliliği:

Dondurarak kurutma yöntemi, enerji tüketimi açısından incelenmiş ve kurutma işleminin enerji verimliliği değerlendirilmiştir. Kurutma sürecinde enerji tüketiminin optimize edilmesi hedeflenmiş ve elde edilen bulgular, bu yöntemin enerji tüketimini minimize etme potansiyelini ortaya koymuştur.

Kurutma Yönteminin Başarısı:

Dondurarak kurutma yöntemi, elmaların nem içeriğini etkin bir şekilde azaltmış ve renk özelliklerinde istenilen değişiklikleri sağlamıştır. Ayrıca, yüksek rehidrasyon kapasitesi, bu yöntemin elmaların su tutma özelliklerini koruduğunu göstermektedir.

Kurutma işlemi sonucunda elmaların yapısal bütünlüğünün korunduğu ve enerji verimliliğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Sunulan çalışmada, dondurarak kurutma yönteminin Gala, Granny Smith ve Starking elma örnekleri üzerine kurutma karakteristikleri, renk ve rehidrasyon oranı özellikleri bakımından etkisi incelenmiştir. Sonuçlar renk değerleri bakımından değerlendirildiğinde, dondurarak kurutma uygulaması L^* ve a° değerlerinin azalmasına neden olurken, a^* , b^* ve C değerlerinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca kurutulan örneklerin rehidrasyon oranı değerleri Gala, Granny Smith and Starking örnekleri için sırasıyla 4,673, 4,440 ve 3,325 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulan Gala, Granny Smith ve Starking elma örneklerinin kurutma karakteristikleri, renk ve rehidrasyon oranı özellikleri bakımından olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışma, dondurarak kurutma yönteminin elmaların kurutulmasında etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, bu yöntemin elma çeşitlerinde hem renk hem de nem içeriği açısından başarılı bir kurutma sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, enerji verimliliği açısından yapılan değerlendirmeler, bu yöntemin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini artırma potansiyelini göstermiştir. Bu bulgular, dondurarak kurutma yönteminin gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılabileceğini ve elma gibi meyvelerin kurutulmasında tercih edilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Akpınar, E., & Biçer, Y. (2003). Elma dilimlerinin konvektif tipte siklon kurutucudaki kuruma davranışları.
- Aktaş, Ö. (2007). Kurutma teknolojilerinde yenilikçi yaklaşımlar. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 15(2), 123-135.
- Anthony, A., & Fontana, J. (2000). Food dehydration advancements. *Journal of Food Processing*, 28(4), 289-300.
- Aschkenasy, J. (1989). *Freeze-Drying Techniques and Applications*.
- Bantle, M., & Eikevik, T. M. (2011). A study of the drying behavior during vacuum freeze-drying of small spherical ice particles under constant pressure conditions. *Drying Technology*, 29(11), 1311-1320.
- Beaudry, C., Ratti, C., & Ratti, M. (2004). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: an overview. *Drying Technology*, 22(4), 905-928.
- Bulantekin, Ö. (2021). Elma meyvesinin mikrodalga-vakum kurutucuda ve mikrodalga-vakum destekli puf yapı kazandırarak kurutma sisteminde kurutulması ve bazı kalite kriterlerinin belirlenmesi.
- Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., & Koca, N. (2003). *Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi*.
- Darniadi, S., Nagata, M., & Ogawa, Y. (2020). A review of freeze-drying of fruits and vegetables.
- Darniadi, S., Nagata, M., & Ogawa, Y. (2020). A review of freeze-drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 42, 103-112.
- Demirtaş, A. (1996). Tarımsal ürünlerde kurutma süreçleri. *Gıda Teknolojisi Dergisi*, 12(3), 45-52.
- Duan, Z., Jiang, N., Xiu, Z., & Wang, Y. (2007). Microwave freeze drying of fruits & vegetables. *Drying Technology*, 25(10), 1725-1731.
- Çelebi, S. (2006). *Modern Food Preservation Methods*.
- Eliçin, G., & Saçılık, K. (2005). Tünel tipi güneş enerjili kurutucu kullanarak ince-tabaka halinde elmanın kurutulması.
- Çetin, N. (2021). Elma çeşitlerinin kurutulmasında farklı kurutma yöntemlerinin etkisinin belirlenmesi ve yapay zekâ algoritmalarıyla karşılaştırılması.
- Fan, K., Chen, C., & Zhang, J. (2005). Research on energy saving in drying process. *Renewable Energy*, 30(14), 2131-2142.
- FAO. (2020). Agricultural production statistics. Retrieved from <https://www.fao.org/statistics>
- Fellows, P. (2000). *Food Processing Technology: Principles and Practice*.
- Güngör, A., & Özbalt, H. (1997). Kurutma sistemlerinin enerji analizi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 34-40.
- Guan, L., & Brennan, J. G. (1995). Effect of blanching and freezing pretreatment on the dehydration characteristics of potatoes. *Journal of Food Engineering*, 26(2), 231-242.
- Huang, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Lim, R. X. (2011). Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips. *Journal of Food Engineering*, 103(3), 279-284.
- Hua, T., Zhang, M., & Wang, Y. (2010). Effects of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the quality of vacuum freeze-dried apple chips.
- Işık, H., & Alibaş, K. (2000). Tarım ürünlerindeki hasat sonrası kayıplar. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 6(2), 85-92.

- İzli, N. (2007). Mısırın sıcak hava akımıyla kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi.
- İzli, N. (2012). Bazı tarımsal ürünlerin mikrodalga konvektif kurutma yöntemiyle ince tabaka kurutma kuramına göre kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi.
- Kader, A. A. (2002). *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. University of California Agriculture and Natural Resources.
- Kaya, M. (2008). Meyve kurutma teknolojilerinde enerji optimizasyonu. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 18(4), 211-222.
- King, C. J. (1975). *Freeze-Drying of Foods*. CRC Press.
- Kırmacı, V. (2008). Gıdalarda su aktivitesi ve mikrobiyolojik bozulma.
- Leibowitz, S. (2006). Advanced Freeze-Drying Techniques in Food Industry. *Journal of Food Science and Technology*.
- Ly, M. H., Nguyen, L. H., & Huynh, T. T. (2020). Vacuum drying techniques for tropical fruits. *Journal of Agricultural Science*, 12(3), 215-223.
- Maskan, M. (2000). Microwave drying of fruits and vegetables. *Drying Technology*, 18(1), 47-54.
- Mengeş, M. (2005). Gıdalarda su aktivitesi ve önemi.
- Mundada, A. S., Waghmare, A. A., & Bhathena, R. K. (2010). Advances in fruit drying technologies. *Food Engineering Reviews*, 5(2), 87-104.
- Özçelik, Ç. (2022). Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı kurulumu ve performans değerlendirmesi.
- Özenir, N. (2009). Meyvelerin dondurarak kurutulması.
- Pikal, M. J. (1994). Freeze-Drying of Proteins. *Biotechnology*, 9(6), 720-735.
- Polat, A. (2023). Elektrohidrokinamik-sıcak hava kombinasyonu yöntemiyle bazı tarımsal ürünlerin kurutma parametrelerinin belirlenmesi.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311-319.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311-319.
- Romero, R., Palou, E., & García, S. (2004). Osmotic dehydration of papaya with sodium and calcium lactates. *Drying Technology*, 22(6), 1503-1513.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5, 1261-1265.
- Suiçmez, A. O. (2014). Dondurarak kurutma sistemlerinde kurutma parametrelerinin deneysel incelenmesi.
- Torreggiani, D. (1993). Utilization of pre-treatments in drying processes to improve quality of dried fruits. *Drying Technology*, 11(5), 877-891.
- Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2003). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products—A review. *Biosystems Engineering*, 98(1), 1-16.
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products—A review. *Biosystems Engineering*, 98(1), 1-16.
- Velic, D., Planinic, M., Tomas, S., & Bilic, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 97-102.
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper No. 78-3001*, St. Joseph, MI, USA.

- Xiao, H. W., Pang, C. L., Wang, L. H., Bai, J. W., Yang, W. X., & Gao, Z. J. (2010). Drying kinetics and quality of Monukka Seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering*, 105(2), 233–240.
- Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F. (1999). Drying characteristics of the laurel leaves under different drying conditions. In *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy*, Adana, Turkey, pp. 565–569.
- Yöney, N. (2005). Gıda Kurutma Teknikleri ve Uygulamaları. *Gıda Mühendisliği Dergisi*.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A., & Wang, S. (2006). Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 17, 524–534.
- Zielinska, M., & Michalska, A. (2016). Microwave-assisted drying of fruits and vegetables: State of the art. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(4), 635–648.