

SAFRAN ÇİÇEĞİNİN DONDURARAK KURUTULMASI

Bahadır ACAR

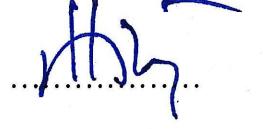
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Mayıs 2011

Bahadır ACAR tarafından hazırlanan “SAFRAN ÇİÇEĞİNİN DONDURARAK KURUTULMASI” başlıklı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylım.

Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

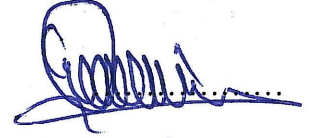


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 24/05/2011

Unvanı : Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Durmuş KAYA (KBÜ)



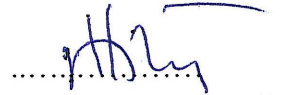
Üye : Doç. Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)



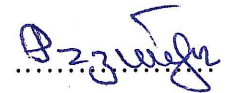
Üye : Doç. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)



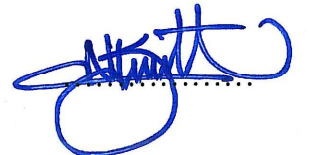
Üye : Doç. Dr. Ziyaddin RECEBLİ (KBÜ)



..../..../2011

KBÜ Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN
Fen Bilimleri 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.”

Bahadır ACAR

ÖZET

Doktora Tezi

SAFRAN ÇİÇEĞİNİN DONDURARAK KURUTULMASI

Bahadır ACAR

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Mayıs 2011, Sayfa 134

Bu çalışmada, safran çiçeğinin dondurarak kurutulması ve güneşte kurutulması karşılaştırılmıştır. Her biri 1000 mg olarak belirlenen toplam 4 adet dondurarak kurutulmuş safran numuneleri ve yine her biri 1000 mg olan toplam 4 adet güneşte kurutulmuş safran numunelerinin, içeriğinde bulunan ve etken maddesi olan safranal ve krosin miktarlarını belirlemek için TÜBİTAK ATAL'da HPLC (*High performance liquid chromatography*) analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde dondurarak kurutulmuş numunelerin safranal miktarı, güneşte kurutulan numunelerin safranal miktarından 5 kat fazla olduğu görülmüştür. Dondurarak kurutulan numunelerdeki krosin miktarı ise güneşte kurutulan numunelerin krosin miktarından yaklaşık % 40 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Dondurarak kurutulan safran çiçeğinin toplam 16 saatlik kurutma süresince ağırlık kaybı verileri kaydedilmiştir. Bu veriler MATLAB programı kullanılarak 10 farklı matematik model üzerinde uygulanmıştır. Kullanılan modellerdeki tahmini standart hata (RMSE), ki-kare (x^2) ve regresyon katsayıları (R^2) kullanılarak modellerin

sonucundaki hata analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Page modelinin diğer modellere göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlenmiştir. Numuneler için bulunan istatistiksel hata değerleri; R^2 , x^2 , RMSE değerleri sırasıyla 0.0065, 0.000453 ve 0.02127 olarak bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler : Dondurarak kurutma, kurutma, safran çiçeği.

Bilim Kodu : 708.1.131

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

FREEZE DRYING OF SAFFRON

Bahadır ACAR

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

May 2011, Pages 134

In this study, saffron flower drying with different methods, which are under the sun and freezing drying methods, were compared. 1000 mg weight four different samples, which are dried with freezing method, and 1000 mg four different samples, which are dried under the sun, were analyzed with HPLC (*high performance liquid chromatography*) to estimate the amount of safranal and crocin contents at TUBITAK ATAL. When analyze results were observed, freezing method dried samples include five times amount of safranal content then under the sun dried samples were seen. Additionally, amount of crocin content of freeze dried samples are 40% higher than sun dried samples were estimated. During totally 16 hours drying time, Freeze dried saffron flower weight loss rate datas had been recorded. These datas have been applied 10 different mathematical models with MATLAB software. Estimated standard error for used models was analyzed with using (RSME), chi-square (χ^2) and regression factor (R^2). According to results Page model gave closer results to experimental results then other models.

Statistical error values for samples were calculated in the order of R^2 , x^2 , RMSE, and values are 0.0065, 0.000453 and 0.02127.

Keywords : Freeze drying, drying, saffron.

Science Code : 708.1.131

TEŞEKKÜRLER

Bu tez çalışması süresince bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana ışık tutan, yol gösteren, hertürlü bilgi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım kıymetli Hocam Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK'a, çalışmalar ensasında yardımlarını esirgemeyen dostum, oda arkadaşım Arş. Gör. Engin GEDİK'e ve deneyleri kendi laboratuvarındaki cihazlarda gerçekleştirmemize mücade veren, bu deneyleri yaparken yardımlarını esirgemeyen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU'na teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 10D4571801 kodlu proje ile desteklendi ve bu vesileyle Karabük Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi çalışanlarına teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE KURUTMA	3
2.2. ISI POMPALI KURUTMA.....	7
2.3. VAKUMDA KURUTMA	8
2.4. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA.....	9
2.5. TÜNEL TİPİ KURUTUCU İLE KURUTMA	13
2.6. KABİNLİ KURUTUCU İLE KURUTMA	16
2.7. MİKRODALGA İLE KURUTMA.....	16
2.8. INFRARED İLE KURUTMA	18
2.9. SİKLON TİPİ KURUTUCU İLE KURUTMA.....	19
2.10. DONDURARAK KURUTMA	19
BÖLÜM 3	28
GIDALARIN MUHAFAZA YÖNTEMLERİ	28
3.1. SOĞUTMA TEKNİKLERİ	28

	<u>Sayfa</u>
3.1.1. Soğuk Hava ile Dondurma	29
3.1.1.1. Durgun Havada Dondurma	29
3.1.1.2. Hızlandırmış Havayla Dondurma	30
3.1.2. Dolaylı Temas Metoduyla Dondurma	32
3.1.3. Daldırarak Dondurma	35
3.1.4. Kriyojenik Sıvılarla Dondurma	35
3.1.5. Kriyomekanik Dondurma	36
3.2. GIDALARI KURUTMA TEKNİKLERİ İLE MUHAFAZA YÖNTEMLERİ	37
3.2.1. Doğal Kurutma	38
3.2.2. Yapay Kurutma	38
3.2.2.1. Morötesi Radyasyon Kurutma	38
3.2.2.2. İletimler Kurutma	39
3.2.2.3. Kızılötesi Işınım ile Kurutma	39
3.2.2.4. Vakumda Kurutma	40
3.2.2.5. Karıştırmalı Yatakta Kurutma	40
3.2.2.6. Akışkan Yataklı Kurutma	40
3.2.2.7. Kızgın Buhar Ortamında Kurutma	41
3.2.2.8. Flaş Kurutma	42
3.2.2.9. Tünel Kurutma	42
3.2.2.10. Püskürtmeli Kurutucular	43
3.2.2.11. Döner Kurutucular	44
3.2.2.12. Kabinli ve Bölmeli Kurutucular	45
3.2.2.13. Dielektrik Kurutma	46
3.2.2.14. Mikrodalga Kurutma	46
3.2.2.15. Appertizasyon	47
3.2.2.16. Dondurarak Kurutma	47
BÖLÜM 4	48
KURUTMA TERİMLERİ VE MEKANİZMASI	48
4.1. DENGE NEMİ	48
4.2. KURUTMA HIZI	50

	<u>Sayfa</u>
4.3. KURUTMA STATİĞİ.....	52
4.4. KURUTMANIN KİNETİĞİ.....	53
4.5. ÜRÜNÜN SU AKTİVESİ.....	56
BÖLÜM 5	60
DONDURARAK KURUTMA	60
5.1. DONDURARAK KURUTMAYA GİRİŞ.....	60
5.2. SÜBLİMLEŞME TEORİSİ	60
5.3. SÜBLİMLEŞMENİN TERMODİNAMİĞİ	64
5.4. KİNETİK TEORİSİ VE SÜBLİMLEŞME ORANI	66
5.5. DONDURARAK KURUTMA İŞLEMİNİN SAFHALARI	68
5.5.1. Dondurma Safhası.....	69
5.5.2. Birinci Kurutma Safhası.....	69
5.5.3. İkinci Kurutma Safhası.....	70
5.6. DONDURARAK KURUTMA SİSTEM ELEMANLARI.....	71
5.6.1. Soğutma Sistemi	72
5.6.2. Kurutma Hücresi.....	76
5.6.3. Vakum Pompası.....	76
5.6.4. Isıtma Ünitesi.....	77
5.7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ	78
5.8. DONDURARAK KURUTMANIN UYGULAMA ALANLARI	80
5.9. DONDURARAK KURUTMANIN AVANTAJLARI.....	81
BÖLÜM 6	82
MATERYAL VE METOT.....	82
6.1. MATERYAL.....	82
6.1.1. Safran Çiçeği (Crocus Sativus L.).....	82
6.1.2. Ölçüm Cihazları	84
6.1.2.1. Freeze Drying Cihazları.....	84
6.1.2.2. Hassas Terazî.....	86
6.1.2.3. Etüv.....	87
6.1.2.4. Desikatör	88

	<u>Sayfa</u>
6.2. METOT.....	89
6.2.1. Safran Çiçeğinin Temini.....	89
6.2.2. Safran Çiçeğinin Dondurarak Kurutulmaya Hazırlanması.....	90
6.2.3. Safran Çiçeğinin Dondurarak Kurutulması.....	92
6.2.4. Safran Çiçeğinin Güneşte Kurutulması.....	93
6.2.5. Kurutulmuş Safran Numunelerinin Analizi.....	94
6.2.6. Safran Çiçeğinin Tam Kuru Ağırlığının Belirlenmesi.....	103
6.2.7. Safran Çiçeğinin Kurutma Esnasında Ağırlık Kaybı Belirlenmesi.....	103
6.2.8. Kurutma Nem Oranı ve Kurutma Sabitlerinin Belirlenmesi.....	105
BÖLÜM 7.....	108
DENEY SONUÇLARI.....	108
BÖLÜM 8.....	118
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	118
8.1. SONUÇLAR.....	118
8.2. ÖNERİLER.....	119
KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Akışkan yatak dondurucu.....	32
Şekil 3.2. Kontinü plakalı dondurucuda dondurulacak ürün girişi ve donmuş ürün çıkışı soğuma eğrileri	34
Şekil 3.3. Doğal kurutma	38
Şekil 3.4. İletim kurutma sistemi	39
Şekil 3.5. Akışkan yataklı kurutucu	41
Şekil 3.6. Paralel akış tünel kurutucu.....	42
Şekil 3.7. Zıt akış tunel kurutucu	43
Şekil 3.8. Dönen tip püskürtmeli kurutucu.....	44
Şekil 3.9. Döner kurutcu.....	45
Şekil 3.10. Kabin kurutucu.....	46
Şekil 4.1. Nem sorpsiyon izotermi.....	49
Şekil 4.2. Özgül nemin bir fonksiyonu olarak hızın değişimi.....	51
Şekil 4.3. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statği açısından anlamı	52
Şekil 4.4. Tarım ürünlerinin kinetik kurutma eğrileri	53
Şekil 5.1. Denge faz diyagramı (üçlü nokta)	64
Şekil 5.2. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doyunluk eğrisi	65
Şekil 5.3. Dondurarak kurutma sistemi şeması	72
Şekil 5.4. Buhar sıkıştırılmalı soğutma sisteminin elemanları	73
Şekil 5.5. Buhar sıkıştırılmalı ideal soğutma çevriminin P-h diyagramı	74
Şekil 5.6. Dondurarak kurutmada gıdanın iletimle ısınması	79
Şekil 5.7. Dondurarak kurutmada gözenekli yapı oluşumu	79
Şekil 6.1. Safran çiçeği.....	82
Şekil 6.2. Dondurarak kurutma cihazı.....	84
Şekil 6.3. Dondurarak kurutma cihazının boyutları	85
Şekil 6.4. Dondurarak kurutma cihazının şematik görüşü	86
Şekil 6.5. Mettler Toledo marka hassas terazi.....	86
Şekil 6.6. Binder marka etüv	87

Sayfa

Şekil 6.7. Desikatör.....	88
Şekil 6.8. Safran çiçeğinin açmış hali.....	89
Şekil 6.9. Çiçeklerin taç yapraklarından ayrılması.....	90
Şekil 6.10. Ayrılmış çiçeklerin tepsiye serilmesi.....	91
Şekil 6.11. Çiçeklerin tepside seyrek aralılarla dağıtılması.....	91
Şekil 6.12. Cihazın üzerinde bulunan Setup paneli.....	92
Şekil 6.13. Zamana bağlı sıcaklık değişimi.....	93
Şekil 6.14. Dondurarak kurutma ve güneşte kurutma numuneleri.....	94
Şekil 6.15. GK.ve DK numunelerinin görünüşü.....	95
Şekil 6.16. Krosin ve safranal standardı.....	96
Şekil 6.17. 5 µg/mL safranal ve krosin standart kromatogramı.....	97
Şekil 6.18. Safranal için DK ve GK numunelerinin kromatogramları.....	100
Şekil 6.19. Krosin için DK ve GK numunelerinin kromatogramları.....	103
Şekil 6.20. Petri kabına konulmuş 1000 mg safran çiçeği.....	104
Şekil 6.21. Zamana bağlı ağırlık kaybı grafiği.....	104
Şekil 6.22. Ağırlık kaybı kaydedilen ürünler.....	105
Şekil 7.1. Safranal ve krosin için hazırlanan kalibrasyon eğrileri.....	109
Şekil 7.2. Safranal ve krosin numunelerinin analiz grafiği.....	110
Şekil 7.3. Page modelinde deneysel ve tahmini nem oranların zamana göre değişimi.....	112
Şekil 7.4. Newton modelinde oranların zamana göre değişimi.....	112
Şekil 7.5. Geliştirilmiş Page modelinde oranların zamana göre değişimi.....	113
Şekil 7.6. Henderson ve Papis modelinde oranların zamana göre değişimi.....	113
Şekil 7.7. Logaritmik modelinde oranların zamana göre değişimi.....	114
Şekil 7.8. İki terimli modelinde oranların zamana göre değişimi.....	114
Şekil 7.9. İki terimli-exponansiyel modelinde oranların zamana göre değişimi.....	115
Şekil 7.10. Wang ve Singh modelinde oranların zamana göre değişimi.....	115
Şekil 7.11. Difüzyon yaklaşımı modelinde oranların zamana göre değişimi.....	116
Şekil 7.12. Verma modelinde oranların zamana göre değişimi.....	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Sudaki doymuş çözeltileri, bulunduğu ortamı farklı bağıl nemde tutan maddeler.....	49
Çizelge 4.2. Gıdalarda önemli olan bazı mikroorganizmaların faaliyeti için yaklaşık minimum su aktivite (a_w) değerleri	57
Çizelge 4.3. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi (a_w) değerler	58
Çizelge 4.4. Bazı gıda gruplarının su aktiviteleri	59
Çizelge 5.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı.....	62
Çizelge 5.2. Buz buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi	63
Çizelge 5.3. Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi	78
Çizelge 6.1. Kuruma eğrilerini açıklamak için kullanılan modeller.....	106
Çizelge 7.1. Her iki kurutmaya sonucuna göre Safranal ve Krosin değerleri.....	110
Çizelge 7.2. Safran numuneleri için model ile istatistiksel değerler sonuçlarının kurutma sabitleri.....	117

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

a	: Kullanılan modeldeki katsayı
a_w	: Su aktivitesi değeri
b	: Kullanılan modeldeki katsayı
c	: Kullanılan modeldeki katsayı
G	: Gibbs enerjisi (kJ)
G_{ks}	: Knudesel süblimleşmesini oranı ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
H	: Entalpi (kJ)
h_1	: Soğutkanın kompresöre giriş entalpisi (kJ/kg)
h_2	: Soğutkanın kompresörden çıkış entalpisi (kJ/kg)
$h_3=h_4$: Soğutkanın kılcal borudan giriş-çıkış entalpisi (kJ/kg)
H_{sub}	: Süblimleşme gizli ısı (kJ/kg)
k	: Kullanılan modeldeki katsayı
k_b	: Buharlaşma katsayısı
k_0	: Kullanılan modeldeki katsayı
k_1	: Kullanılan modeldeki katsayı
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
M	: Su buharının moleküler ağırlığı (kg/kmol)
M_k	: Kurutma hücresindeki havanın molekül ağırlığı (kg/mol)
MR	: Nem oranı
$MR_{deneysel}$: Deneysel nem oranı
$MR_{tahmini}$: Tahmini nem oranı
N	: Deneysel veri sayısı
N_0	: Ürünün başlangıçtaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
N_t	: Ürünün t anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
N_d	: Ürünün denge nem içeriği (g su/g kuru madde)
R	: Gaz sabiti (J/mol)

P_{atm}	: Atmosfer basıncı (Pa)
P_b	: Buharlaşma basıncı (Pa)
P_b	: Buzun doymuş buhar basıncı (Pa)
P'_e	: Buharlaştırıcı ortam basıncı (Pa)
P_k	: Kurutma hücresi basıncı (Pa)
R	: Gaz sabiti (J/kmolK)
RMSE	: Tahminin standart hata
R^2	: Regresyon katsayısı
S	: Entropi (kJ/K)
S_v	: Vakum pompası hızı (m^3/s)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_k	: Kurutma hücresinin mutlak sıcaklığı (K)
t_b	: Buharlaşma süresi (s)
V_k	: Kurutma hücresinin hacmi (m^3)
z	: Kullanılan modeldeki katsayı sayısı
Q_b	: Buharlaştırıcı kapasitesi (kW)
Q_y	: Yoğunlaştırıcı kapasitesi (kW)
χ^2	: Ki-kare
W_k	: Kompresör gücü (kW)
η	: Vakum pompası verimi
ρ_k	: Kurutma hücresindeki havanın yoğunluğu (kg/m^3)
φ	: Bağıl nem (%)

KISALTMALAR

AHE	: Azalan hızla kuruma evresi
BKN	: Birinci kritik nokta
ÇBN	: Çevre havası bağıl nemi (%)
IE	: Materyalin ısınma evresi
SHE	: Sabit hızla kuruma evresi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gıda maddelerini istediğimiz her an elde etmemiz mümkün değildir. Böyle durumlarda ürün bol miktarda bulunduğu dönemde elde edilen ürünleri kaliteli bir şekilde uzun süre muhafaza etmeli ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmelidir. Gıdaların uzun süre muhafaza edilmesi için bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başında kurutma gelir. Kurutma, ürün içerisinde bulunan suyu, üründen uzaklaştırma yöntemidir. Kurutma başta gıda sektörü olmak üzere tıp, eczacılık alanlarında, boya sanayinde, tarım sektöründe, mobilya sektörü ve kağıt sanayinde de kullanılmaktadır. Gıda sektöründe genelde geleneksel olarak kullanılan kurutma yöntemi güneşte kurutmadır. Güneşte kurutulan bu gıda türlerinden biri ise baharatlar içerisinde yer alan safran dır.

Safran (*Crocus sativus*), Dünyada birkaç ülkede olmak üzere ülkemizde de Safranbolu'da yetiştirilen ve sonbaharda çiçek açan, 20-30 cm boyunda, soğanlı bir kültür bitkisidir. Ağırlığına göre dünyanın en pahalı baharatı, (bir gramı 5 ile 6 € arası) olarak gösterilmektedir. Bu bitki içerdiği maddeler ve özellikle kansere karşı kullanımından dolayı değer kazanmıştır. Günümüzde halen Safranbolu'da Tarım İl Müdürlüğü tarafından desteklenen safran çiçeği, çiftçilerimiz tarafından yetiştirilmekte ve ticareti yapılmaktadır. Safran çiçeğinin kurutulması ve muhafaza edilmesi geleneksel yöntemle yapılmaktadır. Bu yöntem güneşte doğal kurutma ve daha sonra kapalı kapta muhafaza edilme şeklindedir.

Güneşte kurutma işlemi gıdaların muhafaza edilmesinde günümüzde en yaygın biçimde kullanılan ve en ucuz olan gıda muhafaza yöntemidir. Türkiye'de birçok ürünün kurutulması güneşe serilerek tabii olarak yapılmaktadır. Ancak güneşle kurutma yöntemi ile ürün daha uzun sürede ve kalitesiz olarak kurumaktadır.

Yapılan kurutma işlemi ile üründe istenmeyen bakteriler oluşmakta ve istenmeyen mikrobiyolojik bozulmalar meydana gelmektedir. Direk güneşe maruz kalması, ürün içerisinde radyasyon miktarını artırır, açık havada bulunması, uçucu böcekler tarafından ürüne zarar vermektedir.

Gıdaların özel bir yöntemle kurutulmasını sağlayan önemli bir teknoloji ise dondurarak kurutma teknolojisidir. Dondurarak kurutma teknolojisinde gıda ilk önce dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırucusu ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan gıdaya iletim ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada katı fazındaki su buharlaşarak (süblimleşme) kurutma işlemi gerçekleşmektedir. Dondurarak kurutma işlemi sırasında her gıda maddesinde bağlı su olarak adlandırılan donmamış halde bir miktar suyun bulunması kaçınılmazdır. Bununla birlikte bu suyun bulunduğu nemli bölgedeki geçiş sıcaklığının çok düşük olması kurutulmuş ürün kalitesini oldukça artırmaktadır. Kurutulacak maddenin içerisinde yeterli miktarda donmuş suyun bulunması, dondurarak kurutma işlemi için oldukça önem taşımaktadır.

Doğru işlemek kaydıyla, bir çok ürün başlangıçtaki fiziksel, kimyasal, biyolojik ve organik özelliklerini muhafaza ederek kullanılacakları zamana kadar uzun süre saklanabilirler. Mümkün olduğunca kurutmadan önceki yapıda ve görünümde ürün elde etmek için, dondurarak kurutulmuş ürünler genellikle başlangıçta içerdikleri orijinal miktardaki su veya çözücü içerisinde çözündürülürler.

Dondurarak kurutma teknolojisi özellikle hazır kahve üretiminde kullanılmakta olup, kahve aromasını en iyi koruyan gıda teknolojisi olarak bilinmektedir. Ayrıca dondurarak kurutma eczacılıkta kullanılan ürünler, ilaç sanayi, bakteri kültürleri, meyve suları, sebze ve çay özlerinin elde edilmesinde, et ve süt kurutulması gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Dondurarak kurutma pahalı bir işlemdir, ısıya duyarlı materyaller için uygundur. Dondurarak kurutma ile diğer kurutma yöntemlerine göre daha kaliteli kurutulmuş ürün elde edilir. Safran çiçeğinin de dondurarak kurutulması ile çiçeğin kalitesi artırılarak raf ömrünün uzatılması planlanmaktadır. Ürünün raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması ve soğutma gibi ek muhafaza işlemlerine ihtiyaç duyulmaması dondurarak kurutmanın avantajlarındanır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bilindiği üzere gıdaların her mevsim elde edilmesi zordur. Bunun için gıdaların bol miktarda bulunduğu zamanlarda, bu gıdaların uzun süre muhafaza edilmesini sağlamak gerekmektedir. İhtiyaç dahilinde kullanacak gıdaların uzun süreli muhafaza edilmesini sağlayan yöntem kurutma yöntemidir. Gıdalar her türlü meyve, sebze, et ve süt olabileceği gibi, yapılan bu çalışmada olduğu gibi safran çiçeği gibi baharat çeşitleri de olabilir. Gıdaların kurutulmasında birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu kurutma yöntemleri ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE KURUTMA

Kholliev ve vd., yaz aylarında ürün kurutmak, diğer mevsimlerde ise sebze ve fide yetiştirmek amacıyla 50 x 5,86 m boyutlarında bir kurutma serası inşa etmişlerdir. Serayı orta kısmından, doğu-batı doğrultusunda, bir bölmeyle ikiye ayırmışlardır. Güneye bakan bölümünün tabanını siyaha boyamışlar, buradaki kurutma işlemini radyasyon ve konveksiyonla sağlamışlardır. Kuzey bölümündeki ürünlerin kurutulması diğer bölümde ısıtılan havanın taşınmasıyla yapmışlardır [1].

Özel ve Özil, doğal şartlar altında güneş enerjisiyle sergide ve sıcak hava akımlı indirekt tip dolaplı bir güneşli kurutucu kullanarak kayısı, üzüm ve biber kurutmuşlardır. Deneyler sonucunda, doğal şartlarda kayısının 7, üzümün 10-15 ve biberin 5-10 günde kurutulduğunu; kontrollü şartlarda ise güneşli kurutucuda kayısının 2, üzümün 5 ve biberin 3 günde hedeflenen nem miktarına düşürerek kuruttukları görülmüştür [2].

Güner, raf tipi güneşli meyve kurutucu kullanarak kayısı kurutmada 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200 ve 400 l/s hava debisi değerlerinde, kayısının kuruma zamanı, kuruma hızı ve kuruma için ihtiyaç olan hava ve sıcaklık değerlerini belirlemeye çalışmıştır. Deneysel sonuçlarında; kuruma zamanının hava sıcaklığı arttıkça azaldığı, hava debisi arttıkça kütle transferinin arttığı ve kuruma zamanının azaldığı, kuruma hızının arttığı, raflı kurutucularda güneş ışınımından çok hava akımının özelliklerinin etkili olduğunu bulunmuştur [3].

Yağcıoğlu ve vd., farklı kurutma koşullarında defne yaprağının kurutma karakteristiklerini incelemiştir. Güneşte kurutma metodunda uygun olmayan hava koşulları ile karşılaştırıldığında, kayıpların meydana geldiğini ve uzun kuruma zamanı gibi avantajlı durumların ortaya çıktığını görmüşlerdir. Kontrollü koşullarla kurutmanın geleneksel kurutmaya göre bir çok problemi ortadan kaldırdığı gözlemiştir. 50°C ya da 60°C sıcaklıkta kurutma ile defne yapraklarının temel yağ bileşim miktarları ile kalitesinde bir kayıp olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca yaprakların % 10 nem içeriğine kadar kurutma zamanı, geleneksel kurutma işlemine göre 120 kez ya da 40°C sıcaklıkta kurutma şartlarına göre 8 kez daha kısaldığını ve hiçbir kayıp olmadığını ifade etmişlerdir [4].

Olgun ve Rzayev, güneş enerjisi ile kabinet tipi, dolap tipi ve çadır tipi üç farklı sistemde fındığın kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Yapılan sistemlerde, açık havada fındığın 82 saat civarında kuruduğu tespit edilerek; kabinet tipli kurutucuda ek ısıtıcı kullanılması durumunda 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığı durumda 50 saatte, çadır tipli kurutucuda 73 saatte, ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise 72-76 saat içerisinde fındığın kuruduğunu tespit etmişlerdir. Kurutulmuş olan fındıklardan alınan numuneler görüntü ve tat analizine de tabi tutulduğunda ürünlerde herhangi bir bozulmaya rastlamamışlardır. Sistemde ek ısıtıcı kullanıldığı durumda ise kurutma süresinin oldukça kısaldığını görmüşlerdir [5].

Sarsılmaz, kayısı kurutmanın genellikle geniş toprak zeminler üzerine serilerek gerçekleştirilmesinde kuruma süresinin uzadığını, homojen kuruma sağlanmadığını, ürün kaybına ve kalite düşümüne sebep olduğunu belirterek, çalışmada belirtilen olumsuzlukları ortadan kaldırmak için özel dizayn edilen, konveksiyon etkisi

arttırılmış havalı güneş kollektörü ve döner sütunlu silindirik kurutucu geliştirmiştir. Sistem üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; üfleme bölgesi (fan), havayı ısıtma bölgesi (kollektör), kurutma bölgesi (kurutucu odası). Böylece kurutucuda kurutulan kayısların nem değışimleri karşılaştırılmış ve deneyler sonucunda açıkta kurutulan kayısların yaş bazdaki nem oranının 4 gün içerisinde % 25'e düştüğünü ve buna karşılık döner sütunlu silindirik kurutucuda ise aynı nem oranına yaklaşık 2 günde düştüğü tespit edilmiştir [6].

El-Sebaai ve vd., güneş enerjili indirekt kurutucuda çekirdeksiz üzüm, incir, elma, domates, soğan ve bezelye kurutmuşlardır. Kurutma havasını ısıtmak için kullandıkları güneş kollektörünün alanı 1 m² olup, absorbe edici yüzeyi siyaha boyanmış 2 mm kalınlığından bakır levha, kollektörün örtü malzemesi de 5 mm kalınlığındaki cam dan oluşturmuşlardır. Cam ile absorbe edici yüzey arasındaki boşluk 8 cm dir. Kollektörün arka yüzeyinden oluşabilecek ısı kaybını önlemek için 8 cm kalınlığındaki izolasyon malzemesi kullanılmıştır. Prototip kurutma kabini 1x1x1,5 m boyutlarında imal edilmiştir. Siyaha boyanmış 5 cm uzunluğundaki baca, doğal dolaşımı hızlandırmak için kurutucunun üzerine bağlanmışlardır. 0,855 x 0,8 m boylarındaki alüminyum çerçeveye takılmış olan örgü teller kurutma tepsisini oluşturmuşlardır. Kolektörde ısıtılan hava doğrudan kurutma hücresine girmektedir. Kollektörün absorbe yüzeyi ile izolasyon malzemesinin arasında kalan 0,1 m kalınlığındaki kısmı gece koşullarında da kurutmanın devam edebilmesi amacıyla ısı depolayıcı kil, granit, kum gibi malzemelerle de doldurularak kurutma denemeleri yapılmıştır. Domateslerle yaptıkları deneylerde kesilerek kurutulan domateslerin % 7 nem içeriğine 28 saat içinde ulaştığını belirlemişlerdir. Hazırladıkları kurutucu ünitesinin 45-55°C aralığında denemelerde inceledikleri tarımsal ürünlerin kurutulması için uygun olduğunu, ısı depolama materyali kullanmanın gece boyunca da nem azalmasına yardım ettiğini sistemin tam kapasiteyle kullanılması halinde homojen bir kurutma için belli süre sonra tepsilerin yerlerinin değıştirilmesi gerektiğini, büyük materyallerin parçalara ayrılarak kurutulması gerektiğini belirtmişlerdir [7].

Tarhan ve vd., Tokat yöresinde başarılı mısır kurutma işlemi için çevre havasının ortalama sıcaklığının Eylül ayında 3°C ve Kasım ayında ise 6°C artırılması

gerektiğini hesaplamalarla bulmuşlardır. Bu sonuç Tokat yöresinde dış ortamda sergilerde meyve ve sebze kurutmanın çok zor olduğunu, tarımsal ürünlerin kurutulmasında kurutucuların kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gerek kurutma masraflarının azaltılması gerekse kullanma kolaylığı açısından güneş enerjili kurutucuların kullanılmasını önermişlerdir [8].

Midilli ve Küçük, kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerinin doğal ve zorlamalı taşınımlı güneş enerjili kurutucuda, kuruma davranışlarının matematiksel modellerini incelemişlerdir. Güneş enerjili kurutma modellerinden uygun olanını bulmak amacı ile sekiz değişik matematiksel model kullanılmıştır. Kullanılan modeller yarı teorik ve deneyseldir. Yarı teorik ve deneysel modeller Statistica yazılımı kullanılarak lineer olmayan regresyon analizi ile karşılaştırılmış, ki-kare ve korelasyon katsayılarına göre en uygun modeli seçmişlerdir [9].

Aktaş ve vd., güneş enerjili kurutma sistemlerinin fındık kurutulmasına uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Araştırmacılar, fındığın uluslararası standartlarda kurutulmaması, “pazar payının kaybına yol açmaktadır” ifadesini kullanmışlar ve yapmış oldukları çalışmada enerji maliyeti düşük, sıcaklık, ağırlık ve nem kontrollü güneş enerjili bir fındık kurutma fırını tasarımını yapmışlardır. Araştırmada, üreticilerin ilk yatırım masrafı düşük ve enerji giderleri az olan kurutma fırınlarını tercih ettiklerini belirtmişlerdir [10].

Tarhan ve vd., günümüzde ticari olarak kullanılan kurutucuların hiçbirinin en ekonomik ve en kaliteli kurutma işlemini bir arada sağlayamadığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, güneş enerjili kurutuculardan beklenen başarı kriterleri ve kurutulmuş ürün kalitesi ile ilgili faktörleri açıklanmışlardır. Kurutucu tasarımı ile ilgili gerekli veriler ve güneş enerjili kurutucu tasarımı ile ilgili pratik kuralları vermeye çalışılmışlardır. Güneş enerjili kurutucuların ekonomik ve uzun süreli kullanımları için üreticinin yapması gereken işleri açıklamışlardır [11].

Aktaş ve vd., fındık kurutma şartlarını göz önünde bulundurarak ısı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellemesini yapmışlardır. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfiyatı

olurken, diğler zamanlarda kurutma işleminin devamlılığının ısı pompası yardımı ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir [12].

Doymaz, incirin güneşe sererek kurutulmasını incelemiştir. Çalışmada 5.42 cm çapında ve yaklaşık 50.2 g ağırlığındaki numuneler kullanılmıştır. Kurutmada yaklaşık 300 g numune tek tabaka halinde tepsiye yerleştirilerek kurutma gerçekleştirilmiştir. Deneyler 35 ve 47°C sıcaklığında yapılmıştır. İncirin kuruma davranışını açıklamak için yedi farklı model kullanılmış ve bunlardan Verma ve ark. modelinin deney verilerine uygun olduğu bulunmuştur. Model sonuçlarına göre; R^2 0.9945, X^2 0.00043 ve RMSE 0.062857 olarak belirlenmiştir. Efektif nem difüzyon katsayısı 2.47×10^{-10} m²/s olarak hesaplanmıştır [13].

Mutlu, güneş enerjisinden yararlanılarak tarımsal ürünlerin kurutulması için raflı tip bir güneşli kurutucu ile, Tokat ilinde yoğun olarak üretimi yapılan domatesin değişik dönemlerde kurutulma koşullarını araştırmıştır. Kurutulan domatesler renk açısından incelenmiş ve kuruma süresinin uzaması ile birlikte renkteki değişme daha da artmıştır. Üst raflardaki domates örneklerinin daha uzun sürede kurudukları ve daha yavaş nem kaybettikleri için havadaki oksijenle reaksiyona girerek renklerde değişmelere neden olan oksidasyon reaksiyonlarına daha fazla maruz kaldığı tespit edilmiştir [14].

2.2. ISI POMPALI KURUTMA

Ceylan ve vd., ısı pompalı bir kurutma fırınının elma kurutulmasında kullanılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmada, ayarlı kapak (damper) ile bağıl nemi daha düşük olan dış hava sisteme alınarak, sistem havasının neminin düşürülmesini sağlamışlardır. Elmalar; 40°C'de, ortalama % 20 bağıl nemde, 2.8 m/s hava hızında, 4.8 (g su / g kuru madde) su oranından 0.18 (g su / g kuru madde) su oranına kadar 3.5 saatte kurutmuşlardır. Araştırmacılar, bağıl nemin düşük olduğu bölgelerde yapmış oldukları ısı pompalı kurutma sisteminin verimli bir şekilde çalışabileceğini ifade etmişlerdir. Elmaların kurutma sonrası su aktivitesi değerini 0.65 olarak bulmuşlardır. Böylelikle elmalarda düşük su aktivitesinden dolayı bazı

toksijenik küflerin faaliyetlerinin ve toksin üretiminin engellenmiş olduğunu tespit etmişlerdir [15].

2.3. VAKUMDA KURUTMA

Jaya ve Das, mango pulpunu vakumla kurutmuşlardır. Kurutmada 30-50 mmHg mutlak basınç, 2, 3, 4 mm pulp kalınlığı ve 65, 70, 75°C vakum odasındaki ısıtıcı yüzey sıcaklık değerleri dikkate alınmıştır. Mango tozundan yapılan pulpun renk değişimi, ısıtıcı yüzey sıcaklığından çok pulp kalınlığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Renk değişiminin az olması için vakumlu kurutmada, vakum odasındaki ısıtıcı yüzey sıcaklığının 72.3°C ve pulp kalınlığının da maksimum 2.6 mm olması gerektiği belirtilmiştir [16].

Jaya ve Das, mango pulpunun vakumla kurutulmasında; maltodekstrin, gliserol monostearin ve trikalsiyum fosfatın kurutulan mango tozu özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Sistemde istenen 710-730 mmHg vakumu (30-50 mmHg mutlak basıncı) oluşturmak için 3.7 kW, 0.0236 m³/s kapasiteli sulu vakum pompası kullanılmıştır. Yapışma derecesi, akıcılık, renk gibi özellikler dikkate alınarak optimum besleme bileşimi, 1 kg katı mangoya 0.43-0.57 kg maltodekstrin karıştırılması ile elde etmişlerdir. Trikalsiyum fosfat ve gliserol monostearin için en uygun koşul ise 1 kg katı mango başına 0.015 kg olmuştur [17].

Cui ve vd., havuç dilimlerini mikrodalgalı vakumla kurutmuşlar ve teorik bir model geliştirmişlerdir. 3-5 mm olarak dilimlenen havuçlar; 336.5, 267.5, 162.8 W mikrodalga güçlerinde ve 30, 51, 71 mbar vakum altında kurutulmuşlardır. Teorik ve deneysel veriler, kurutma oranının mikrodalga çıkış gücü ile doğrusal ve o andaki suyun vakum basıncının, buharlaşmanın gizli ısı ile ters orantılı olduğunu belirlemişlerdir [18].

Madamba, vakumla kurutmada ise havucu seçmiştir. Vakumla havucun kurutulmasında en uygun koşullar 1,6 mm kalınlığındaki havuç dilimlerinin 10 kPa basınçta, 68°C'de kurutulmasıdır. Vakumla havucun kurutulmasında basınç, sıcaklık, dilim kalınlığı gibi bütün özellikler havucun son nem miktarını büyük oranda (% 90

seviyelerinde) etkilemiştir. Ortalama kurutma oranı sadece ürün kalınlığından etkilenmiştir. Nemi geri alma oranı ve renk, bağımsız hiçbir parametre ve koşuldan etkilenmemiştir [19].

2.4. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA

Nitz ve Taranto, taze carioca fasulyelerinin çekirdeklerini kurutmak için titreşimli akışkan yatak kurutucu (pulsed fluidized bed dryer) tasarlamışlardır. Bu çalışmada, Page eşitliğinin kinetik parametreleri olan hava giriş sıcaklığı, hava akımı oranı ve titreşim frekansının sürece etkileri analiz edilerek geliştirmişlerdir. Tek önemli değişken havanın giriş sıcaklığı olmuştur. Kurutma 60°C'de geleneksel akışkanlaştırma ile yapılmıştır. Titreşimli (pulsed) ve geleneksel akışkanlaştırma arasında hiçbir fark gözlemlenmemiştir. Sıvı-dinamik değerlendirmesi göstermiştir ki en fazla basınç düşmesi iki rejimde de yaklaşık aynı olmuştur. Oysa ki titreşimli akışkanlaştırma altında en yüksek değer başlangıçtaki yatak yüksekliğinden etkilenmiştir [20].

Yüzgeç, biyolojik bir ürün olan ekmek mayasının (*Saccharomyces cerevisiae*) kesikli bir akışkan yataklı kurutma süreci için iki model geliştirilmiştir. Birinci model, enerji ve kütle denkleğine dayanan homojen matematiksel modeldir. Bu model yapısında yatak sıcaklığı birinci dereceden adi bir diferansiyel denklem olarak bulunmuş ve çözümü ayrık zamanda dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ile yapılmıştır. Ekmek mayasının endüstriyel akışkan yataklı kurutma sürecinden alınan veriler ile model test edilmiştir. İkinci model, kurutma süresince granül içerisindeki nem kesri ve sıcaklık değişimlerini hesaplayan model denklemlerinden oluşmaktadır. Granül içerisindeki nem difüzyonu ve sıcaklık değişimleri ikinci dereceden parabolik doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ayrık zamanda Crank-Nicolson yöntemi ile çözülmüştür. Kurutma süresince kurutulan granülün yapısındaki fiziksel değişimler göz önüne alınarak, model büzülen granül tabanlı kurutma modeli olarak geliştirilmiştir [21].

Heinrich ve ark., bir püskürtmeli akışkan yatak kurutma süreci için ısı ve kütle aktarım modelleri geliştirmişlerdir. Granül içerisindeki nem kesri eğilimi bulunmaya çalışılmıştır [22].

Vitor ve vd., “tapioca” biyolojik ürününün kesikli bir akışkan yatak kurutucusundaki kurutma sürecinin, gaz ve katı fazlarına bağlı olarak ısı ve kütle aktarma katsayılarının bulunmasını amaçlamışlardır. Bir katı, iki sıvı faz olmak üzere üç faz ele alınarak matematiksel model geliştirmişler ve sonuçları değerlendirmişlerdir [23].

Topuz ve vd., fındığın akışkan yatakta kurutulmasının sayısal ve deneysel çalışmasını yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, sayısal ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve sayısal değerlerin deneysel sonuçlara yakın olduğunu belirlemişlerdir [24].

Romero ve vd., akışkan yatak ve ısı taşınımı tepsi kurutucuda mangonun viskoelastik parametrelerini ile rehidrasyon kapasitelerini incelemişlerdir. İlk olarak, mango soyulmuş, 6 mm (± 3 mm)'lik küçük küpler şeklinde kesilerek ve kurutma sürecine verilmeden osmotik eriyiklerle işlenmiştir. Glikoz osmotik eriyikleri kullanılarak ve CaCl_2 ana yapıya eklenmiştir. 40°C ($\pm 0,9^\circ\text{C}$)'deki eriyiklerin mango küplerinin işlem öncesi osmotik işlenmesi için 6 saat en ideal olduğu görülmüştür. Sıkıştırma bırakma testleri iki elementli Maxwell metodu kullanılarak rehidre edilmiş mangolarda iyi işlediği görülmüştür. Tepsi kurutucu ile kurutulmuş mangolar akışkan yatak kurutucuda kurutulmuş mangolardan sıkıştırma baskısını daha hızlı yadıklarını tespit etmişlerdir. Kurutma öncesi işlem ve kurutma türünün her ikisinin de mangoların çekme-büzülme verimini etkilediğini gözlemlemişlerdir. Mangoların nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak birkaç denklemin çekme-büzülme veriminin önceden kestirebildiği sunulmuştur. Beklenildiği gibi, ön işlem görmüş mango küplerinin minimum akışkanlaştırma hızı ön işlemsiz numuneler için olan hava hızından daha yüksek çıkmıştır [25].

Temple ve vd., akışkan yataklı çay kurutma için direnç çalışması yapılmıştır. Çalışmalarda, kontrolör biçimleri tasarlamışlardır. Normal işletme koşulları altında, doğrulanmış bir benzetim modelinin sıklık (frekans) eğiliminden tahmin edilen bir

transfer işlevi kullanılarak bu kontrolörlerin ayarını yapmak mümkün olmuştur. Bu çalışmada standart koşullardan sapma gösteren Cohen, Coon ya da Zeigler-Nichols metotlarıyla belirlenen kontrolör ayarına yeterli kazanç ve çevre farklarını sağlarken minimal integral kare hatası veren bir dizi kontrolör ayarları yapmak için kurutucu modellemeye dayanan farklı bir metot geliştirmişlerdir. Bu ayarların test edilen tüm koşullar için uygun olduğunu belirlemişlerdir. Sadece sonuçsal hesaplayıcılardaki tüm transfer işlevlerinden ziyade, sadece kazançları kullanarak, kontrolörlere bir basitleştirme yapılmasının doğrulandığını göstermişlerdir [26].

Soponronnarit, Tayland'daki akışkan yatakta pirinç kurutulması anlatılmıştır. Bu çalışmada akışkan yatakta pirinç kurutucusunun matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Akışkan yatakta pirinç kurutucusu birçok ülkede tamamen ticari olup ekonomik bir pazar oluşturmaktadır. Özellikle çok yüksek nem içeren tahıllar için pirinç kalitesi sağlanmasına karşın, enerji tüketiminin nispeten düşük olduğunu belirtmiştir [27].

Hajidavalloo ve Hamdullahpur, akışkan yataklı kurutma sisteminin hidrodinamik ve ısı analizini yapmışlardır. Akışkan yataklı kurutma sisteminin deney düzeneğini kurmuşlar ve geliştirdikleri üç fazlı matematiksel model ile deneysel sonuçları karşılaştırarak iyi bir uyum içinde olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmalarında üç fazlı modelin iki fazlı modellere göre gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [28].

Hajidavalloo, tanecikli materyalin akışkan yatakta kurutma sürecindeki karakteristiklerini incelemiştir. Deneysel çalışma, laboratuvar boyutlarında bir akışkan yatak sisteminde gerçekleştirmiştir. Dağıtıcı eleğin havayı sirkülasyon etmesiyle ortaya çıkan değişiklikler ve taneciklerin girişteki nem oranının akışkan yatağın hidrodinamiğine etkisinin nasıl olacağını incelemiştir. Teorik kısmında, akışkan yatakta ısı ve kütle transferine benzetim sağlayacak bir matematiksel model geliştirilmiş ve düzeltme parametresi olmayan doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Çözüm sonucu, geliştirilen model ile deneysel veriler arasında oldukça iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Püskürtmeli ve hareketsiz yatakta da bu modelin kullanılabileceği tespit edilmiştir. Akışkan yataklı kurutma

sürecinde her bir karakteristiğın, hava hızı, tanecik çapı vs. nasıl bir etkinlik gösterdiğini tespit etmiş, ayrıca, akışkan yatağın ısıl etkinliğinin nasıl artırılabilceğı üzerinde çalışmalar yapmıştır [29].

Soponronnarit ve vd., mısırın küçük bir akışkan yatakta kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır. Yatağın ısıl verimini artırmak üzere çıkan havanın bir kısmını tekrar akışkan yatağa vermişlerdir. Deneysel sonuçlar ile korelasyon yapmak için birçok deneysel ince tabaka kurutma eşitliklerini deneyerek Wang ve Singh denkleminin iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir [30].

Kiranoudis ve vd., akışkan yatak ve döner kurutucuların ürün kapasitesine göre her birinin toplam maliyetini optimize edecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Her iki kurutucu için ısı taşınımı kurutma sürecini belirleyen basit bir matematiksel model kullanmışlardır. Kurutucuların tasarım yapısı incelendiğinde, döner kurutucu, akışkan yatak kurutucuya göre oldukça pahalı olduğu belirtmişlerdir [31].

Grabowski ve vd., laboratuvar boyutlarındaki akışkan yatakta ve püskürtmeli yatakta mayanın kurutulması sürecini deneysel olarak incelemişlerdir. Püskürtmeli yatağın akışkan yatağa göre % 25 daha fazla havaya ihtiyacı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, akışkanlaşma, püskürme davranışları, kurutma kinetiğı ve hesaplamalar açısından püskürtmeli yatağın ve akışkan yatak ile püskürtmeli yatak kombinasyonunun yalnız akışkan yaktan daha iyi olduğunu belirlemişlerdir [32].

Abid ve vd., akışkan yatakta mısır kurutma sürecinde ısı ve kütle transferinin deneysel çalışmasını ve teorik analizini yapmışlardır. Modellerinde tersinmez termodinamik prensiplerini kullanmışlardır. Modellerinde nem transferinin; sıcaklık değişimi etkisi altındaki ısıl yayınım ile nem oranı değişimi etkisindeki difüzyon ile sağlandığını dikkate almışlardır. Sonuç olarak; gaz hızının ve neminin kurutma oranı üzerinde küçük bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. ısıl değişim katsayısının analizi sonucunda, suyun ısıl yayınım ile transferinin, difüzyona oranla ihmal edilebileceğini belirlemişlerdir [33].

Uçkan ve Ülkü, kesikli akışkan yatakta mısır kurutma işleminde, hava hızı ve hava sıcaklığının kurutmaya olan etkisini incelemişler ve difüzyon teorisine dayalı bir model ortaya koymuşlardır. Model ve deneysel verilere dayalı olarak mısırın kuruması için bir deneysel formül önermişlerdir. Kurutma işleminde, gazın hızının kurutma oranı üzerinde tek başına etkisi olmadığını ve mısırın kurumasında sürecin difüzyon kontrollü olduğunu tespit etmişlerdir [34].

2.5. TÜNEL TİPİ KURUTUCU İLE KURUTMA

Yıldız ve vd., tane mısırın düşük sıcaklıkta kurutulmasında enerji tüketimi ile ilgili çalışmalarında, tane mısırın kurutulmasına ilişkin bazı özellikleri belirlemişlerdir. Mısırların % 17-25 (yaş baz) nemde hasat edilebileceğini, bu mısırların bozulmadan depo edilebilmesi için % 11-13 (y.b.) neme kadar kurutulması gerektiği belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kurutma yapan kurutucularda enerji tüketiminin 4000-5000 kJ/kg-su arasında değiştiği belirtilmiştir. Bu çalışmada kurutucuda, tane mısırın düşük sıcaklıkta kurutulmasına ilişkin bazı özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışma sonuçları, mısırdan 1 kg suyun alınması için 2112.87 – 6114.52 kJ enerji tüketildiğini, uygun bir ısıtıcının kullanımı ile bu miktarın azaltılabileceğini belirtmişlerdir [35].

Johnson ve vd., bir muz çeşidi olan Plantain (Musa AAB)'in hava kurutma karakteristikleri ile ilgili çalışmalarında, bir sıcak hava kurutucusu ile çeşitli kalınlıklardaki Plantain silindir parçalarını, farklı hava sıcaklıklarında kurutma davranışlarını, büzülme ve nem dağılımını incelemişlerdir. Sonuç olarak hava sıcaklığının görünüş metodoloji etkisi ve kuruma oranlarındaki parçaların kalınlığını bulmuşlardır. Sıcak havanın kurutma davranışında en büyük etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Plantain'in hava kurutması için hareket enerjisinin 38.81 kJ / g mol olarak hesaplamışlardır. Kurutma süresince büzülen parçaların hacim ve boyutlarındaki değişiklikleri izleyerek hacimdeki değişiklikleri bir çekirdek kurutma modeli ile çok iyi tanımlarken boyutlardaki değişiklikleri doğrusal nem içeriği ile tanımlamışlardır. Fick'in yayılım denklemini kullanarak kurutma süresince Plantain parçaları içindeki nemin yayılımını engellemek için kullanmışlardır. Bu model ile yiyecek parçalarındaki ortalama nem içeriğinden çok, yerel nem içeriklerine karar

vermek için kullanarak yiyeceklerin çürümesinin hassaslığını tam olarak tahmin etmişlerdir [36].

Boudhrioua ve vd., Muzun kurutulması süresince yapısındaki değişiklere olgunluk ve hava sıcaklığının etkisi ile ilgili çalışmalarında, sıcak hava kurutma süreci süresince muz dilimlerinin reolojik özelliklerini karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Kurutulmuş muzdaki önemli değişiklik, depolama süresince oda sıcaklığı ve havadaki nem oranında reolojik özelliklerinin olgunluk derecesine etkisi olarak gözlemlenmiştir. Bu çalışma, muzun sert meyve kabuğundaki şeker içeriği ile meyve olgunluk derecesi arasında belirlenen kabuk (s) ve kabuk rengi (a) parametrelerine karar vermeyi mümkün kılmıştır. Depolama süresince birbirleriyle orantılı olmayan s ve a bağlantılarıdır. Glikoz içeriği ile güvenli nem içeriği değerleri çoğu kez tüketimden kaçınmak için aralarında uygunluk sağlamıştır. Reolojik özelliklerdeki değişiklikler deneyler süresince penetrometre ile baştan sona izlenmiştir. Bu çalışma sonucunda muz dilimlerinin 80°C de kurutulması 4, 6 ya da 8 saatten sonra muz meyvelerinde radikal bir değişiklik meydana getirdiğini, muzun bozulabilirlik ve ani kırılabilirlik özelliklerinin kaybolduğunu belirlemişlerdir. Muz dilimlerinin termik ve termodinamik özelliklerinin analizleri sonucunda muzun kuruduktan sonra soğuma geçiş sıcaklığında ani değişikliği gösterdiğini ortaya koymuşlardır [37].

Maskan ve vd., üzüm pestillerinin sıcak hava ve güneşle kurutulması ile ilgili çalışmalarında, geleneksel teknikler kullanılarak kaynatılan üzüm suyu ve nişasta karışımı hazırlamışlardır. Pestillerin kurutulmasını sıcak hava ve güneş kurutması yöntemleri ile yapmışlardır. Sıcak hava kurutmasında hava sıcaklığı (55°C, 65°C ve 75°C), örnek kalınlığı ($S_1=0.71$ mm, $S_2=1.53$ mm $S_3=2.20$ mm ve $S_4=2.86$ mm) ve hava hızı ($V_1= 0.86$ m/s $V_2=1.27$ m/s ve $V_3=1.82$ m/s) olarak belirlemişlerdir. Pestilin kurutma süresince kuruma zamanının, sıcaklık ve dilim kalınlığının, nem içeriğinin önemli ($P<0,05$) iken hava hızının önemli olmadığını tespit etmişlerdir. Sıcak hava ile kurutmada pestil (0.12 kg H₂O/kg DS)'in ticari nemi için örnekteki kalınlık ve hava sıcaklık derecesine bağlı olarak kuruma zamanını 50–140 dakika olduğunu tespit ederlerken, güneş ile kurutmada 180–1500 dakika olduğunu tespit etmişlerdir. Tüm örnekleri değişik periyot oranlarında güneş kurutmasının S_1 , S_2 , S_3

ve S₄ oranları hariç 55°C de kurutmuşlardır. Etkin yayılma değerini Fick'in yayılım modelinden almışlardır. Bu değerler sıcak hava kurutması için $3.00-37.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ güneş kurutması için $1.93-9.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ arasındadır. Su yayılımının hareket enerjisi değerini bir Arrhenius tipi denklem kullanarak hesaplamışlardır. Bulunan değerler S₁, S₂, S₃ ve S₄ için sırasıyla 10.3, 12, 16.5 ve 21.7 kJ/mol'dür [38].

Doymaz ve Pala, kırmızıbiberin sıcak hava ile kurutma karakteristikleri ile ilgili çalışmalarında, farklı işlem ve hava kurutma şartları altında kırmızıbiberlerin kurutulmasının teorik ve deneysel bir çalışmasını sunmuşlardır. Parçalanmış biberlerin kuruyan kavisleri üstel denklem ve Page denklemi kullanılarak elde etmişlerdir. Her iki denklemin R² değerleri karşılaştırılarak üstel denklemden daha iyi kurutma karakteristiklerini hazırlayan denklemin Page denklemi olduğu sonucuna varmışlardır [39].

Arıcı, mantarın (*Agaricus bisporus*) farklı kurutma havası sıcaklığı ve hava hızı şartlarında kurutma karakteristikleri belirlemiştir. Deneysel olarak hava sıcaklığı olarak 50°C, 60°C ve 70°C, hava hızı olarak 1, 2 ve 3 m/s alınmıştır. Mantarın (*Agaricus bisporus*) kuruma süresinin belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek amacıyla Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Papis, Logaritmik, iki terimli, iki terimli ve eksponansiyel, Wang ve Sign, Thompson, difüzyon yaklaşım, Geliştirilmiş Henderson ve Papis, Verma ve ark. ve Midilli ve ark. modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Midilli ve ark. modelinin mantarın (*Agaricus bisporus*) kuruma davranışını diğerlerinden daha iyi açıkladığı belirlenmiştir [40].

İzli, mısırın sıcak hava akımıyla kurutulmasında kurutma parametreleri belirlemiştir. Deneysel sonuçlarda karıştırıcılı ve karıştırıcısız kurutmada kurutma süresi, enerji tüketimi ve maliyet açısından 75°C sıcaklıktaki kurutmadan en iyi sonuçlar elde edilirken çimlenme hızı ve çimlenme gücü açısından en iyi sonuçlar karıştırıcılı kurutmada 55°C'de, karıştırıcısız kurutmada 45°C'deki sıcaklık değerlerinde elde edilmiştir [41].

Akosman ve Kalender, soya fasulyesinin kuruma karakteristiğini tepsili kurutucuda incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında laboratuvar tipi bir tepsili kurutucu kullanılarak soya fasulyesini 30 - 50°C aralığındaki değişik sıcaklıklarda ve değişik hava akış hızlarında (0.5, 1.0 ve 1.5 m/s) kurutmuşlardır. Tüm katı örnekleri için kuruma hızının sıcaklık ve hava akış hızı ile arttığını belirlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda katı neminin denge nemine çok kısa sürede ulaştığını gözlemişlerdir. Deneysel verileri kararsız hal difüzyon eşitliğinin çözümlenmesi ile analiz etmişlerdir [42].

2.6. KABİNLİ KURUTUCU İLE KURUTMA

Yılmaz ve vd., kabin tipi bir kurutma sistemi kullanmışlardır. Bu kurutma sistemi bir hava kolektörü, kurutma odası ve hava dolaşım sisteminden oluşmaktadır. Kurutma havasının dolaşması için fotovoltaiik panellerden üretilen 45 W'lık güç, fanı çalıştırmak için kullanılmıştır. Hava kolektörü 27.50 m²'lik alana sahiptir ve kabin içerisinde 8 tane 2.8 m²'lik raf bulunmaktadır. Soğurucu değişik tip siyaha boyanmış alüminyum telefon telinden yapılmıştır. Kurutucunun kapasitesi 25 kg taze domates alacak şekildedir. Buna göre yük oranı 9 kg/m² dir. Bu kurutucuda materyalin nem içeriğinin kurutma mevsimi sırasında 5 günde % 95 ten % 17 ye düşürüldüğünü ifade etmişlerdir [43].

2.7. MİKRODALGA İLE KURUTMA

Tuncer, araştırmasında sebzelerin yüksek frekanslı mikrodalga manyetik alanının etkisine konulunca, ürünün gösterdiği davranış ve uğradığı değişikliklerin belirlenmesini ve en uygun kurutma yönteminin deneysel olarak bulunmasını amaçlamıştır. Araştırma sonuçlarına göre; mikrodalga alanına konulan pırasa, kırmızı ve yeşil biber, patlıcan, soğan ve patatesin uygun mikrodalga güç kademesi seçilerek, mikrodalga ile sebzelerin reaksiyona girmesini önleyen düzenlemelerle hiç bir kalite kaybı olmaksızın, konveksiyonlu kurutmaya kıyasla, 1/5 -1/12 arasında değişen daha kısa sürede kurutmanın mümkün olabileceğini belirlemiştir [44].

Pappas ve vd., mikrodalga kurutma yöntemi ile kurutulan mantarlarda ürün büyüklüğünün kurutma süresine ve farklı kurutma yöntemlerinin ürünün yeniden su alma kapasitesine etkilerini incelemiştir. Deneyle 25, 36 ve 54 mm çapındaki mantarları kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre, kurutmada 425 W güç seviyesinde kurutmada örnek büyüklüğünün küçülmesi ile kurutma süresinde azalma meydana geldiği bildirmişlerdir. Yeniden su alma kapasitesi ise mikrodalga kurutma yönteminde geleneksel kurutmaya göre daha yüksek olduğunu bulmuşlar ve sürenin artmasıyla ürünün su alma oranını belirli seviyeye kadar arttırmış ve daha sonra değişmemiştir [45].

Özkan ve Işık, mikrodalga ve sıcak hava ile kurutmanın kombinasyonunu kullanarak kayısıyı ve kirazı kurutmuşlardır. % 82,8 neme sahip kayısılar % 12,7 nem değerine kadar 32 dakika 6 mikrodalga kademesinde, sonraki 13 dakika ise 100°C'ye ısıtılmış fanlı fırında kurutmuşlardır. % 86,5 neme sahip kayısılar % 13,2 nem değerine kadar 40 dakika mikrodalga ile, sonraki 10 dakika ise fanlı fırında kurutmuşlardır. Kurutma süreçleri sonunda materyallerin renk, koku, tat gibi özelliklerini kaybetmedikleri gözlemlenmiştir [46].

Özkan ve Işık, çalışmada % 88.12 nem değerine sahip domatesi maksimum ayarında 30 dakika fanlı fırında, sonra sırasıyla 90 W mikrodalga kademesinde 6 dakika, 160 W mikrodalga kademesinde 10 dakika, 350 W mikrodalga kademesinde 5 dakika, 500 W mikrodalga kademesinde 5 dakika, 650 W mikrodalga kademesinde 9 dakika olmak üzere toplam 65 dakikalık kurutma periyodu ile sıcak havayla kurutmuşlardır. Fanlı fırında kurutmada materyal merkez sıcaklığı 1. dakikada 24°C, 30 dakikada 160°C'dir. Mikrodalga kurutma periyodunun başladığı 31 dakikada 166°C, 65 dakikanın sonunda ise 393°C'dir. Kurutma sonunda domateslerin renk, koku, tat gibi özelliklerini kaybetmedikleri belirlenmiştir [47].

Koç, Kabaası kayısı çeşidi kullanarak mikrodalga ve endüstriyel kurutma metotları uygulamıştır. Püre ve bütün haldeki kayısının iki farklı metotla kurularak fiziksel ve kimyasal incelemeler yaparak kurutma yöntemlerinin etkisini incelemiştir. Endüstriyel kurutma metodu ile kurutulmuş püre halindeki kayısındaki nem miktarının mikrodalga ile kurutulmuş püre halindeki kayısındaki nem miktarına göre daha

yüksek olduğunu belirlemiştir. Bu çalışmada kayısı çekirdeği çıkartılmış ve kükürtlenmiş olup fabrikasyon (endüstriyel) kurutma ve ev tipi (20 lt iç hacimli) mikrodalga fırında kurutma tekniklerine uygun olarak kurutmuştur. Metotlarında mikrodalga kurutma ile SO₂ ve nem miktarlarında endüstriyel kurutmaya göre daha fazla azalma olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak mikrodalga ve endüstriyel yöntemlerle kurutulan kayısının fiziksel ve kimyasal olarak genelde benzer sonuçlar aldığı ve mikrodalga uygulamasının kayısılar üzerinde olumsuz etkisinin olmadığını bulmuştur [48].

2.8. INFRARED İLE KURUTMA

Toğrul ve vd., çalışmalarında, 0.5, 1.0 ve 1.5 cm kalınlığında küp şeklinde dilimlenmiş mantarların kuruma davranışlarını infrared kurutucuda 50, 60, ve 80 °C kurutma havası sıcaklığı değerlerinde incelemiştir. Sıcaklığın 50°C den 80°C'ye çıkarılmasıyla 0.5, 1.0 ve 1.5 cm dilim kalınlıklarının kuruma süresinde sırasıyla 170, 140, 104 dakikalık azalma olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca mantar kalınlığının difüzyon katsayısına etkisini incelemişler ve sonuçta sıcaklık ve dilim kalınlıktaki artışın difüzyon katsayısı artışına sebep olduğunu belirlemiştir [49].

Toğrul ve vd., dört farklı kalınlıkta kestikleri muz dilimlerini infrared kurutucuda 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklık değerlerinde kurutarak muz dilimlerinin kuruma kinetiğini incelemiştir. Araştırmacılar sonuçta, artan kurutma havası sıcaklığı ile hem kuruma hızının hem de difüzyon katsayısının arttığını, muz dilim kalınlığının artmasıyla da kuruma hızının azaldığını tespit etmişlerdir [50].

Yaldız, çalışmasında havuç ve pırasanın kuruma karakteristiklerinin belirlenmesini ve kuruma süresinin belirli bir anında ürünün nem içeriğinin saptanması için mevcut kuruma modellerinin uygulanabilirliğini amaçlamıştır. Bu ürünler 30, 40, 50, 60 ve 70°C kurutma havası sıcaklıklarında ve 0.5, 1.0 ve 1.5 m/s kurutma havası hızlarında kurutularak kurutma süreleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Pabis, Logaritmik, iki terimli, iki terimli eksponansiyel, Wang ve Singh, Thompson, Difüzyon Yaklaşım, Verma ve ark.,

Geliştirilmiş Henderson ve Pabis matematiksel modellerine uygulayarak en uygun modeli belirlemiştir [51].

2.9. SIKLON TİPİ KURUTUCU İLE KURUTMA

Akpınar ve Biçer, kabağın kuruma davranışını siklon tipi bir kurutucuda deneysel olarak incelemiştir. Deneylede, 60, 70 ve 80°C 'lik üç değişik hava giriş sıcaklıkları kullanılırken, seçilen kurutma havası hızları 1 ve 1.5 m/s'dir. Araştırmacılar deneysel sonuçlardan elde edilen kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrilerini lineer olmayan regresyon analiz kullanılarak matematiksel olarak modellemiştir. Deneyle sonuçlarına göre, siklon tipi kurutucuda dönel akış ortamında kurutulan kabak örneklerinin kuruma hızının yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek kuruma hızı 80°C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1.5 m/s kurutma havası hızında, en düşük kuruma hızı ise 60°C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1.0 m/s kurutma havası hızında elde edilmiştir. Farklı giriş sıcaklıklarında ve hızlarında kurutulan örneklerde kuruma hızında, hava hızından ziyade hava sıcaklığının etkisinin daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca araştırmacılar, kurutma havası sıcaklığı ve hızı arttıkça, kabak örneklerinin nem içeriğinde belirgin bir şekilde hızlı bir azalmanın görüldüğünü ve kuruma hızının arttığını ifade etmişlerdir [52].

2.10. DONDURARAK KURUTMA

Mellor, dondurarak kurutma süresindeki basıncın ısı ve kütle transferine olan etkisini incelemiştir. Alçak basıncın kütle transferinin itici gücü arttırdığını ancak ısı transfer katsayılarının basınçla olan ilişkilerinden dolayı kurumuş yüzeydeki ısı akışını azalttığını kaydetmiştir. Araştırmacı, bu problemi aşmaya çalışan döngüsel basınçlı dondurarak kurutma işlemini geliştirmiştir. Bu süreçte, ısı akışını artırmak için kısa süreliğine basıncı arttırmış ve daha sonra buhar akışını artırmak için kısa süreliğine azaltmıştır [53].

Nail, kurutma hücresindeki basıncın kurutmaya olan etkisini incelemiştir. Çalışmasında, Nail, sıvı solüsyon halindeki ilacı dondurarak kurutmuştur. Cam

şişeler içinde bulunan donmuş ilacı kurutma hücresi içinde bulunan ısıtıcı raf üzerindeki bir metal tepsiye yerleştirmiştir. Nail, bazı durumlarda kütle transferi hızını sınırlayan bir faktör olabileceğini belirlemiş ve ısı kaynağından süblimleşme yüzeyine olan ısı transferine karşı bir direnç olduğunu belirtmiştir. Isı transferine karşı olan bu direncin tepsi ile şişe ve tepsi ile ısıtıcı raf arasındaki hava boşluğundan olduğunu ve düşük basınç ortamında daha belirgin olduğunu bulmuştur. Bu durumu, serbest moleküllerin ısı akışının meydana geldiği basınç aralığında, gazın ısıl iletkenliğinin düşmesi ile açıklamıştır. Kurutma oranlarını 1.3, 0.25 ve 0.04 Torr basınçlarda ölçerek incelemiştir. Sonuçlar, kurutma oranının azalan basınçla birlikte azaldığını göstererek Nail'in teorisini doğrulamıştır [54].

Wolf ve Gibert, cam şişe içindeki sütü dondurarak kurutulması işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada dondurarak kurutma işlemini kısıtlayan faktörleri belirlemişlerdir. Kendi modellerini, ölçüm verilerine uygulayarak, modellerinde üç transfer parametresini belirlemişlerdir. Bunlar, kurutulmuş katmandaki su buharının yayılımı, üründeki kütle transfer katsayısı ve ısıtılmış raftan buza doğru olan ısı transferinin karşılaştığı dirençtir. Cam şişe ve raf arasındaki temas direnci ısı transferine karşı önemli bir engel olduğu için bu direncin tam bir kontrol parametresi olduğu ve bu yüzden kuruma kinetiklerini kontrol ettiğini belirlemişlerdir [55].

Pikal ve vd., dondurarak kurutma işlemi sürecinde kurutulmuş yüzey katmanının oluşturduğu direnci incelemişlerdir. Çalışmada kurutulmuş yüzey katman direncinin azalan basınçla birlikte azaldığını belirlemişlerdir. Kurutulmuş katmanın direncini doğrudan süblimleşme oranının verilerine göre belirlemişlerdir. Bu yüzden Pikal ve arkadaşları düşük basıncın süblimleşme oranını arttırdığını belirlemişlerdir. Deneyleri özel olarak dizayn edilmiş basit bir kap ve ısıyı iletimle değil, ışıma yoluyla gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, süblimleşme oranlarını deneysel olarak ölçerek model geliştirmişlerdir. Verilerden buhar akışına normalleştirilmiş kuru ürün direncini tahmin yoluyla belirlemişlerdir. Kuru ürün direncini daha sonra kurutma oranlarını sayısal olarak tahmin etmede önemli veri olarak kullanmışlardır [56].

Pikal ve vd., dondurarak kurutma işlemindeki ısı ve kütle transferini incelemişlerdir. Isıtıcı raf üzerine içinde donmuş ürün bulunan birkaç şişe yerleştirerek kurutma

oranlarını ölçmüşler ve ısı akısını tahmin etmişlerdir. Çalışmaya göre kurutma hücresindeki basınç azaldıkça süblimleşme oranı düşmektedir. Ayrıca, farklı kısmen kapatılmış şişe tipleri ile ilişkili direnci analiz edilmiştir. Kütle transfer katsayıları daha önce bahsedilen çalışmada belirlenen kuru ürün dirençleri ile birleşik basit ölçümleri üzerinden belirlenmiştir. Isı transferini iletim ve radyasyon ile değerlendirmişlerdir. Denklemlerde ölçülmüş sıcaklık farklarına dayalı etkin ısı transferi katsayılarını kullanmışlardır [57].

Zamzow ve Marshall, dondurarak kurutmanın ilk matematiksel modelini geliştirdiler. Yaptıkları model için gerçek olmayan bir sabit durum varsayımı yaparak, radyasyon ve iletim sınır koşulların durumlarını incelemişlerdir. Gerçek olmayan sabit durum varsayımı, sabit durum koşulları altında ürüne doğru olan ısı iletiminin belli bir zaman dilimi içerisinde hesaplanmasına izin vermektedir. Bu modelin geçerliliği belli bir zaman aralığı boyunca ürünlerdeki gerçek sıcaklık profillerinin varsayılan sabit durum koşullarıyla ne kadar örtüştüğüne bağlıdır. Geleneksel dondurarak kurutma işlemi çok yavaş olduğu için ürünlerdeki sıcaklık profili neredeyse hep aynı seviyededir ki bu da sabit durum varsayımını doğrulamaktadır [58].

Hill ve Sunderland, sahte sabit durumu modelini kullandılar. Ancak serbest moleküller, devam ve geçiş akış rejimlerinden momentum denklemlerinden değerlendirdiler. Sahte sabit durumu varsayımı nedeniyle akış oranını kurutulmuş katman boyunca sabit olarak düşünmüşlerdir. Modelin teorik tahmin verilerinin ve özelliklerinin mevcut olması nedeniyle, sığır eti için yayınlanan verilerle karşılaştırdılar. Tahminler ve deneysel veriler arasındaki küçük farkları deneysel hatalar olarak kabul ettiler [59].

Liapis, kurutulmuş bölgede hem buzun süblimleşmesini hem de suyun desorpsiyonunu içeren bir model geliştirdi. Daha önce açıklanmış modellerden farklı olarak bu modelde hem süblimleşme hem de desorpsiyonun aynı anda oluşmasına olanak tanıyan geçici bir analiz kullanıldı. Bu model, sorpsiyon-süblimleşme modeli olarak adlandırılır [60].

Liapis ve Bruttini'nin geçici süblimleşme modeli nem atımının ilk % 60-90'lık kısmını tahmin eden hassas bir modeldir. Ancak, ikincil kurutmayı tahmin etmediği sonucuna varmışlardır [61].

Dyer ve Sunderland, sorpsiyon-süblimleşme modelinde kurutulmuş bölgedeki buhar akışı ve kurutulmakta olan materyal arasındaki nem transferini dikkate almışlardır. Kurutma sürecinin bu yönü önceki dondurarak kurutma modellerinde göz ardı edilmiştir ve bu nedenle tahmin edilen verilerde hatalara neden olmuştur [62].

Copson, klasik dondurarak gıda kurutmanın modellenmesinde kullanılmış olan yaygın gerçek olmayan sabit durum varsayımı ile mikrodalga dondurarak kurutma işlemini modellemiştir. Ancak Ma ve Peltre (1973) yaptıkları çalışmayla, bu varsayımın daha hızlı mikrodalga dondurarak kurutma durumu için geçerli olmadığına karar vermişlerdir. Copson çalışmasında kurutulmuş katmanda hidrodinamik akış olduğunu varsaymışlardır. Buhar akısının hesaplamaları, hareketli süblimleşme arayüzü ve kurutulmuş katmanın dış yüzeyi arasındaki basınç farklılığına dayalıydı. Tahmin edilen veriler ve deneysel veriler arasındaki önemli farklar oluşmuştur. Bu oluşan farklar sahte sabit durum varsayımının ve bilinmeyen taşıma özelliklerinin olduğunu ortaya koymuştur [63].

Ma ve Peltre, mikrodalga ısıtma ile geçici bir boyutlu dondurarak kurutma analizi sunmuşlardır. Mikrodalga ısıtmalı dondurarak kurutmanın ilk geçici analizi idi. Geçici kütle ve enerji denklemlerini kurutulmuş ve dondurulmuş bölgeler için yazmışlardır. Isının dondurulmuş bölgede iletim, kurutulmuş bölgede ise iletim ve taşınımıyla incelemişlerdir [64].

Jennings, buzun süblimleşme oranlarını ölçmüştür. Ölçüm sonuçları, Nikal ve Pikal'in yaptığı çalışmaların elde ettikleri sonuçlar, tersine basınç düştükçe süblimleşme oranının arttığını bulmuştur [65].

Litvin ve vd., havuç dilimlerini, dondurarak kurutmaya, kısa süreli mikrodalga uygulaması ve havalı ya da vakumlu kurutma ile birleştirilerek kurutmuşlardır. Havuçları deneylerde, 7 ila 10 mm kalınlığında dilimlenmişler, 1 dakika süreyle

buharla haşlanmışlar, akan su altında soğutulmuşlar, -18°C 'de dondurulmuş ve daha sonraki işlemlere kadar -18°C 'de depolanmıştır. Kısmen dondurarak kurutulmuş numuneler 50 saniye mikrodalgayla ısıtma uygulanmış ve sonra %5'lik nem değerine kadar vakumla ve hava ile kurutulmuştur. Kısmen dondurulmuş, mikrodalga uygulanarak ve havayla kurutulmuş ürünün rengi, boyutları ve nem geri alma oranı, ulaşılan son nem değerine ve aynı kalite parametrelerine sahip dondurarak kurutulmuş ürünle aynıdır. Vakum fırınında yapılan son kurutmanın renk üzerine yararlı bazı etkileri olduğu belirlenmiştir. Dondurarak kurutmanın, mikrodalga uygulanmasını takiben havayla kurutma işlemiyle birleştirilmesi, dondurarak kurutma zamanında önemli bir kazanç sağlanmıştır. 3.5 – 3.75 saatlik kısmi dondurarak kurutmayı takiben kısa bir mikrodalga uygulaması ve 3.75 saatlik havayla kurutma olmak üzere toplam 7.25 – 7.50 saat sürerken sadece dondurarak kurutmada toplam süresi 30°C 'de 9.5 saat sürmektedir [66].

Khalloufi ve vd., çilek, yaban mersini ve mantarı deneysel olarak dondurarak kurutulmuşlardır. Çalışmada, ürünler 72 saat dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulmuş ve bağıl nem oranı % 11'den % 87'ye kadar doymuş tuz çözeltileri ile yükseltilmişlerdir. Kurutma işlemi sırasındaki meyvelerin ağırlık değişimleri ve su aktivitesi incelemiş ve deneysel veriler için GAB modelinin daha iyi olduğu belirtilmişlerdir [67].

Shishegarha ve ark., 5 mm, 10 mm dilimlenmiş ve tüm haldeki çileklerin dondurarak kurutma işlemindeki kurutma kinetikleri, renk ve hacim değişiklikleri, farklı raf sıcaklıklarda ($30, 40, 50, 60$ ve 70°C) deneysel olarak incelemişlerdir. Dondurarak kurutma işlemi sonucunda çileklerin kurutma süreleri, 5 mm için 5 saat, 10 mm için 10,7 saat ve tüm halindeki çilekler için ise 50 saate olmuştur. 50°C 'den daha düşük sıcaklıklarda çileklerin iyi kaliteye sahip olduğunu ve 50°C 'den yüksek sıcaklıklarda ise çileklerin yapısında çökme olduğunu bulmuşlardır [68].

Araki ve vd., dondurarak kurutma işleminde 15 mm kalınlığında dilimlenmiş ve ezilmiş elmaları -10 ile 70°C 'lik ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve 20 ila 30 Pa basınç aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Ezilmiş elmanın kuruma oranını dilimlenmiş elmaya göre 2.5 daha yüksek gerçekleştiğini belirlemişlerdir [69].

Carapelle ve vd., donmuş ıslak kağıtların dondurularak kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çeşitli fiziki parametrelerde (basınç, ısıtıcı gücü v.b.) incelenerek çalışma için gerekli olan dondurarak kurutma sistemini kurmuşlardır. Çalışmada dondurarak kurutmanın süre ve maliyetini azaltmak için optimal parametreler belirlemiş ve bu alanda yapılan araştırmalara yardımcı olmak için basit bir örnek geliştirmişlerdir [70].

Sadıkoğlu ve Özdemir, dondurarak kurutma işleminin prensibini, kurutmada dondurma işleminin önemi üzerinde durarak dondurarak kurutmada dikkat edilecek önemli noktaları, klasik dondurarak kurutma yöntemine göre kurutma hızını arttıran bir metot olan mikrodalga ile kurutmanın daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir [71].

Krokida ve vd., elma, muz, havuç ve patatesi 5 farklı yöntemle kurutmuş ve kurutmanın renk üzerine etkisini incelemişlerdir. Taze elma, muz, havuç ve patatesler, 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında kesilmiştir. Hava ile kurutmada, kurutma sıcaklığı $70 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ve havan nispi nemi % 7 ve basınç 1 ± 0.03 bar'dır. Vakumlu kurutmada, sıcaklık $70 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ve basınç 33 ± 0.03 mbar'dır. Mikrodalga ile kurutma atmosfer basıncında, 810 W gücünde yapılmıştır. Dondurarak kurutmada, numuneler 20 mm çapında ve 8 mm kalınlığında kesilmiştir. Numuneler 48 saat -35°C 'de dondurulmuş ve laboratuvar tipi dondurarak kurutma hücresinde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Havayla, mikrodalgayla ve vakumla kurutulmuş ürünler önemli derecede esmerleşme oluşmuştur. Dondurarak kurutmada ise numunelerin renginde esmerleşme olmamıştır [72].

Marques ve Freire, ananas, guava ve mango'nun dondurarak kurutma olayındaki kurutma kinetiğini "Chen ve Douglas", "Van Meel" ve "Page" modelleri ile modellemişlerdir. Deneysel sonuçlar için en iyi açıklayan modelin Page model olduğunu bulmuşlardır [73].

Sadıkoğlu ve Liapis, birincil kurutma sırasında bağlı suyun çıkarılmasını tanımlamak için kullanılabilir mekanizmanın işlevsel formunu belirlemek üzere parametre tahmini ve model ayrımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Birinci kurutma safhasının deneysel verileriyle teorik modelleri karşılaştırmışlar

ve bağılı suyun çıkarılmasının birinci kurutma safhası sırasında toplam kütle akışını önemli ölçüde etkilemediğini göstermişlerdir [74].

Sadıkoğlu ve Liapis, yaptıkları deneysel çalışmada yağsız sütün erime sıcaklığında 2°C'lik bir artışın birinci kurutma safhasındaki kurutma süresini % 8.28 oranında azaltabileceğini göstermişlerdir [75].

Duran ve vd., taze, donmuş ve liyoilizasyon işlemine tabi tutulmuş tavuk ve sığır etlerinin su ve yağ oranları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucu tavuk ve sığır etlerindeki su ve yağ oranları liyoilizasyon uygulamasında daha düşük olduğunu bulmuşlardır [76] .

Kwok ve vd., saskatoon berry meyvesini dondurarak kurutma (DK), vakumlu mikrodalga kurutma (VMK), hava ile kurutma (AK) ve AK ve VMK'nin kombinasyonu olan CD yöntemiyle kurutmuşlardır. Diğer kurutma yöntemleri, tazeyken dondurulmuş meyveler ile karşılaştırıldığında, diğer yöntemlerde toplam fenol ve antosiyanin içeriği önemli derecede azalmıştır, ayrıca antioksidant aktivitesi de azalmıştır. DK ile kurutulanlar en yüksek antosiyanin ve antioksidant aktivite seviyelerini göstermiştir, bunu VMK takip etmiştir. CD kurutma VMK ile AK'nin ortalaması şeklinde sonuç vermiştir [77].

Sham ve vd., kalsiyum ön işleminin, vakum düzeyinin ve elma cinsinin; hava ile ve vakumlu mikrodalga ile kurutulmuş elma krakerlerinin yapısı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yerel marketlerden satın alınan Golden Delicious, Red Delicious ve Fuji cinsi elmalar örnek miktarı 1 kg olacak şekilde tartılmış, yıkanmış, 4 mm kalınlığında dilimlenmiş, 2 dakika buharda haşlanmıştır. Elma dilimleri nem içeriği kuru baza göre % 5 olana kadar 70°C'de, yaklaşık 3.5 saat, hava akış hızı 1.1 m³/dk olan hava ile bantlı kurutucuda kurutulmuştur. Dondurarak kurutma, 100 µmHg vakum altında, oda sıcaklığı 20°C'de, kondenser sıcaklığı -55°C'de 10.5 saat kurutulmuştur. Vakumlu mikrodalga ile kurutmada yüksek vakum uygulaması yoğunluğu düşürmüş ve gevrekliği arttırmıştır. Ayrıca Fuji cinsi elmaların, Red ve Golden Delicious cinsi elmalara göre daha yüksek kalsiyum içeriğine ve gevrekliğe sahip olduğu belirtilmiştir [78].

Rahman ve vd., havayla, vakumla ve dondurarak kurutulan ton balığının gözenek karakteristiklerini incelemişlerdir. Hava ile kurutma 70°C’de, 1 m/s hava hızında ve % 3.4 bağıl nemde, vakumla kurutma ise vakum fırınında 70°C’de ve 2 kPa’dan küçük basınçlarda yapılmıştır. Dondurarak kurutmada balıklar en az 24 saat – 40°C’de dondurulmuştur. Kondenser yüzey sıcaklığı –65°C, odanın levha sıcaklığı – 20°C ve vakum 108 Pa’dır. Taze ton balığının et kısmının hacim ağırlığı 1098 kg/m³, havayla, vakumla ve dondurarak kurutulmuş ton balığının hacim ağırlıkları ise sırasıyla 960, 709 ve 317 kg/m³ ölçülmüştür. Dondurarak kurutulmuş örneğin gözenekliliği hava ve vakumla kurutulmuş örneklere göre daha yüksek bulunmuştur [79].

Tsami ve vd., pektin–şeker jellerini dondurarak, mikrodalga ile, vakumla ve sıcak hava ile kurutmuşlardır. Vakumla kurutma, bir vakum fırınında, 25 mbar ve 70°C’de, 16 saat sürmüştür. Mikrodalga kurutma, atmosfer basıncında, 595 W gücünde, 30 dakika boyunca 10–15 saniye aralıklarla yapılmıştır. Hava ile kurutmada ise 1.5 dakikalık 595 W gücündeki mikrodalga ön işleminden sonra, örnekler 36 saat, 70°C’de konveksiyonel kurutucuda kurutulmuşlardır. Dondurarak kurutmada, örnekler ön işlem olarak –195.8°C’deki sıvı nitrojene 2 saat batırılmıştır. Daha sonra 0.04 mbar vakum altında, -30°C kondenser sıcaklığında, 72 saat laboratuvar tipi dondurarak kurutucuda kurutulmuştur. Dondurarak kurutulmuş örnekler ve vakumla kurutulmuş örnekler daha düşük hacim ağırlığına ve daha yüksek gözenekliliğe sahiptir. Vakumla kurutulmuş ürünlerin parlaklığı daha iyidir. Nemi geri alma kapasitesindeki farklılıklar ise kurutulmuş ürünün hacim ağırlığı ve gözenek büyüklüklerindeki farklılıkla açıklanabilir. Dondurarak kurutmada gözenek büyüklüğü küçük fakat gözeneklilik fazladır. Bu da diğer kurutma yöntemlerine göre daha çok su tutmasını sağlamaktadır. Vakumla kurutulmuş ürünler yüksek gözenekliliğe sahipse de dondurarak kurutulmuş ürünlere göre daha az suyu bünyesine almaktadır. Bunun nedenini dondurarak kurutulanlara göre daha az, ancak daha büyük boyutta gözeneklere sahip olması şeklinde açıklamışlardır [80].

Kırmacı, dondurarak kurutma sisteminin tasarımı ve imalatını yapmış ve bu sistemde 5 ve 7 mm’lik dilimlenmiş çilekleri kurutmuştur. Kurutma işlemi süresince herhangi bir t anındaki nem oranını belirlemek amacıyla deneylerden elde edilen verileri

Newton, Page, Geliştirilmiş Page I, Geliştirilmiş Page II, Henderson ve Papis, logaritmik, iki terimli, iki terimli-eksponansiyel, Wang ve Sing, ve Difüzyon yaklaşım modelleri ile karşılaştırmıştır. Tahmini standart hatası (RMSE), ki-kare (χ^2) ve regresyon katsayısı (R^2) kullanılarak modellerin sonuçlarının hata analizleri yaparak elde edilen sonuçlara göre Page modelinin diğer modellere göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlemiştir[81].

Bu çalışmanın amacı, Dünyanın en değerli baharatı olan ve Ülkemizde de Safranbolu'da yetişen safran çiçeğinin dondurarak kurutma işleminin yapılması ve geleneksel güneşte kurutmaya göre kalite farkının ortaya konmasıdır. Bununla birlikte dondurarak kurutulmuş safranın kurutma süresince ağırlık kaybı bilgileri kullanılarak MATLAB programı yardımı ile regresyon analizi yapılması ve bu analizler sonucunda 10 farklı matematik modelden, bu çalışmaya en uygun olanının belirlenmesidir.

BÖLÜM 3

GIDALARIN MUHAFAZA YÖNTEMLERİ

Gıdaların muhafazasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları soğutma ve kurutma uygulamalarıdır.

3.1. SOĞUTMA İLE GIDA MUHAFAZA TEKNİKLERİ

Soğutma, bir maddenin veya bir ortamın sıcaklığını onu çevreleyen hacim sıcaklığının altına indirmek ve o sıcaklıkta muhafaza etmek üzere ısının alınması işlemidir [82-84] . Soğuk muhafaza işlemi ile gıdalar 5 ile 50 kat arasında daha uzun dayanma süresi elde edilebilmektedir. Gıdaların dondurulması işlemi gıdanın içerdiği suyun buz kristali oluşturabileceği sıcaklığa düşürülmesi temeline dayanan bir koruma tekniği olarak tanımlanmaktadır. Dondurulmuş gıdalarda mikrobiyolojik gelişme durdurulmaktadır.

Gıdanın sıcaklığı -18°C ile -30°C arasındaki sıcaklığa indirilerek ürünün oda sıcaklığında uğrayabileceği olası zararlar bu yolla önlenmekte veya asgari düzeye indirilmektedir. Bu sıcaklık seviyeleri mikrobiyolojik bozulmayı engellemekte ve ürünün dayanma süresini uzatmaktadır. Genel olarak dondurma işlemi dört aşamadan oluşur:

1. Ön soğutma olarak adlandırılan ürünü başlangıç sıcaklığından donma noktasına kadar yapılan soğutma,
2. Üründeki ilk buz kristallerinin oluşmaya başlaması ve donma sıcaklığının üründeki suyun önemli bir bölümünün donmasına kadar sabit kalması,

3. Ürün sıcaklığının düşmesi sonucu geri kalan suyun donması,
4. Son aşamada serbest suyun tamamen donmasından sonra faz değişimi meydana gelmeden ürün sıcaklığının düşmesidir.

Dondurma işleminin temel amacı gıdaların doğal yapısının mümkün olduğu oranda korunmasıdır. Gıdaların içerdiği su oranıyla bağlantılı olarak sıcaklığın düşürülmesi ile gıdanın yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir.

Ürünün donma sıcaklığı ve donma sıcaklığının 5°C den az olan sıcaklık arasındaki donma işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştirildiğinde, üründe oluşan kristal yapı küçük olmaktadır. Eğer bu süreçte donma işlemi yavaş gerçekleştirilirse, üründe oluşan kristalin boyutu büyümektedir. Bu durum özellikle meyve ve sebzelerin hücre duvarını bozmakta ve ürün tekrar çözülduğünde yapısında değişiklik meydana geldiği için ürün taze halindeki kalitesini koruyamamaktadır.

Aynı zamanda uzun süren donma işlemi sırasında meyve ve sebzelerin hücreleri içinde bulunan su, konsantrasyona da bağlı olarak, hücre dışına yayılma ve bu durum hücrenin dehidrasyonuna yol açmaktadır. Bu yüzden hızlı bir şekilde gerçekleştirilen donma işlemi ürün yüzeyinin pürüzsüz kalmasını sağlamakta ve hücre yapısını bozmamaktadır [85]. Aşağıda maddeler halinde gıda endüstrisinde kullanılan dondurma metodları verilmiştir.

3.1.1. Soğuk Hava ile Dondurma

Soğuk hava ile dondurma, durgun (tabii konveksiyon) havada dondurma ve hızlandırılmış havada (cebri konveksiyon) dondurma olarak başlıca iki farklı uygulaması vardır [86,87].

3.1.1.1. Durgun Havada Dondurma

Metodun isminden de anlaşıldığı gibi, dondurma işleminde kullanılan soğuk hava hareketsizdir. Böyle bir dondurucunun esası, tam olarak izole edilmiş bir soğuk

odadır. Soğutma ekipmanının buharlaştırıcısı tavanda, duvarda veya odanın ortasında yukarıdan aşağı doğru uzanan boru demeti şeklinde bulunabildiği gibi, dikine raflar şeklinde de olabilir. Dondurulacak ürünler bu raflar arasına istif edilir [87].

Bu tip dondurucular kullanılan ekipman açısından basit ve ucuzdur. Durgun havalı dondurma odalarında hava hareketini sağlayan bir düzenek yoktur. Hava sadece doğal konveksiyona maruz kalır. Ancak bunu bir hava hareketi olarak görmek olanaksız olduğundan havanın durgun olduğu kabul edilmektedir. Hatta bazı durgun havalı dondurucularda bir fan yardımıyla, sınırlı bir hava hareketi sağlanmaktadır. Ancak bu düşük hava hızı nedeniyle böyle bir düzenlemeyi “hava akımında dondurma” yöntemiyle karıştırmamak gerekir. Çünkü hava akımında dondurmada hava, cebri bir sirkülasyonla yüksek bir hızla dolaştırılarak yüksek bir donma hızı sağlanabilmektedir.

Durgun havada dondurma yönteminde soğuk odanın sıcaklık derecesi -15°C ile -30°C arasındadır. Hareketsiz veya çok yavaş hareketli havanın ısı iletkenliği çok düşük olduğundan, gıda maddesinin donması uzun süre alır. Donma süresi, dondurulan materyalin büyüklüğüne, ambalaj şekline, dondurulan birimler arasındaki boşluğa ve bunlar gibi değişik faktörlere bağlı olarak birkaç saatten birkaç haftaya kadar değişebilir. Bu metot esas olarak balık dondurma amacıyla uygulanmış olup halen aynı amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır [87].

3.1.1.2. Hızlandırmış Havayla Dondurma

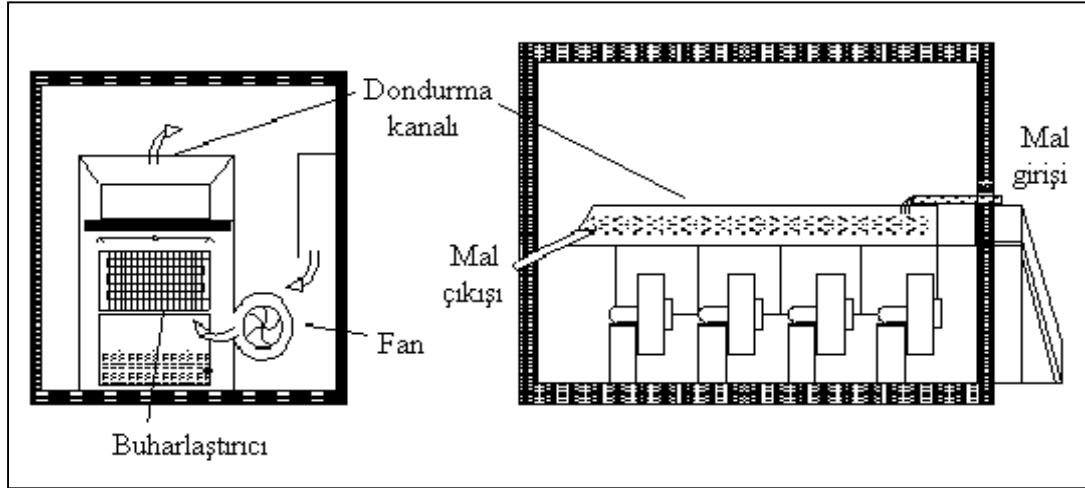
Bu tip dondurucuların genel ilkesi, havanın dondurulan gıda maddesi ile buharlaştırıcı arasında hızlı hareket etmesidir. Güçlü fanlar yardımıyla hareket ettirilen hava, soğutma spiralleri (buharlaştırıcı) üzerinden geçerken soğur ve sonra dondurulan ürün üzerinden 10 - 15 m/s hızla geçer. Isı transfer katsayısı hava hızına bağlı olarak arttığından, gıda maddesinin hızla dondurulması sağlanır. Hava dolaşımında dondurmada hava sıcaklığı -30°C ile -45°C arasında değişmektedir. Hava akımı ile gıda dondurma işlemi tünelli veya bantlı olarak tasarlanabilmektedir. Buna göre tünel dondurucular bantlı veya vagonlu olabilmektedir. Bant veya vagonların tüneldeki hızı, donma süresine göre ayarlanır. Diğer taraftan dondurulan ürün ile soğuk

havanın tünel içindeki hareketleri paralel akımlı veya zıt akımlı olabilir. Zıt akımlı tünellerde, dondurulacak ürün tünelin bir tarafından, soğuk hava ise diğer taraftan verilir. Buna göre en soğuk hava, tünel çıkışında, donmuş ve sıcaklık derecesi çok düşmüş ürünle karşılaşır. Sonra tünel girişine doğru yoluna devam eder. Bu sistemde ürünü soğutan havanın nem miktarı artar. Bu durumda da tekrar buharlaştırıcıya geldiğinde, buharlaştırıcı yüzeyinde karlanma meydana gelir.

Özellikle uzun tünellerde fazlaca beliren bu sakınca nedeniyle, tünellerde hava hareketi ürün hareketine çapraz olarak düzenlenir. Yani hava tünelin yanlarından verilir. Bu uygulamada soğuk havanın tüneldeki dağılımı homojendir. Soğuk hava çoğunlukla bantın altından yukarı doğru üflenir. Bu üfleme ile bant üzerindeki madde, hava hızı ve parçacık iriliğine bağlı olarak hafif bir titreşim kazandığından donma hızını arttırır.

Ancak bu sınırlı titreşim, dondurulan parçacıkların birbirine yapışmasına ve böylece bir kitle haline dönüşmesine donmalarını sağlamaktan uzak bulunmaktadır. Halbuki günümüzde, birçok ürünün bir blok haline gelmeden tek tek parçalar halinde dondurulması istenmektedir. Bu nedenle bantlı donduruculardan, bantın altından verilen çok yüksek hızlı havanın, bant üzerindeki parçacıkları adeta havada yüzer halde tutmasına dayanan akışkan yatak dondurucu denen yeni bir sistem geliştirilmiştir.

Akışkan yatak dondurucularda, hava içinde yükselen ve geri düşen adeta kaynamaya benzer bir hareket yapan parçacıkların her biri, tüm yüzeylerinden soğuk hava ile tam olarak temas sağlayarak süratle donar. Akışkan yatak dondurucular gerçekte bir bant dondurucudurlar. Bununla birlikte çok değişik akışkan yatak dondurucular vardır. Şekil 3.1’de bir akışkan yatak dondurucu görülmektedir [86].



Şekil 3.1. Akışkan yatak dondurucu.

3.1.2. Dolaylı Temas Metoduyla Dondurma

Bu metodun çalışma prensibi, içten soğutulan iki plaka arasına yerleştirilmiş ambalajlı ürünlerin, plaka ile teması sonucu dondurulmasıdır. Dondurulan ürün ile soğutmayı gerçekleştiren soğutucu akışkan arasında plaka bulunduğundan bu yöntem dolaylı temas metoduyla dondurma denir. Evlerde buzdolaplarının buzluk bölümünde bazı gıdaların dondurulması, tek taraftan etki eden bir plakalı dondurma yöntemi olarak görülebilir.

Gıdaların dolaylı temas metoduyla dondurulmasında tek koşul, dondurulacak ürünün dikdörtgen prizması şeklinde bir ambalajda bulunmasıdır. Ambalajlı ve yüzey teması sağlanmayan bir kitlenin bu sistemde dondurulma hızı düşer. Çünkü ambalajın düzgün bir yüzeyle, plakaya tam olarak değmesi, donma süresi açısından çok önemlidir. Buna göre düzgün şekilli ve aynı kalınlıktaki ambalajlar plaka üzerine yan yana yerleştirilip, diğer plaka da üstten oturunca, iki yönden hızlı bir dondurma sağlanabilmektedir. Plakalar dört köşe, içi boş alüminyum raflardan ibaret olup, içinde soğutma kanalları yani soğutucu akışkan buharlaştırıcı üniteler bulunur.

En yaygın plakalı dondurucular, “birdseye çoklu plakalı” (Birdseye multilplate) dondurucu tipinde olanlardır. Bunlarda, iyi izole edilmiş bir kabin içinde, raf şeklinde birçok plaka üst üste yer almaktadır. Her plakanın bir ucu kauçuk bir boru

ile soğutucu akışkan ana besleme hattına, diğer ucu ise yine kauçuk bir boru ile soğutucu akışkan ana dönüş hattına bağlanmıştır.

Böylece kauçuk boru bağlantılar ile plakaların aşağı yukarı hareketi gerçekleşmektedir. Nitekim hidrolik bir düzenle en alttaki iki plaka arası açılır. Paketlenmiş gıda maddesi buraya tek sıra olarak dizilir. Sonra yukarı doğru diğer plakaların araları aynı şekilde dondurulur. Nihayet raf dizisi hidrolik bir düzenle az bir basınçla (0.05 – 0.1 bar) yavaş bir şekilde sıkıştırılır.

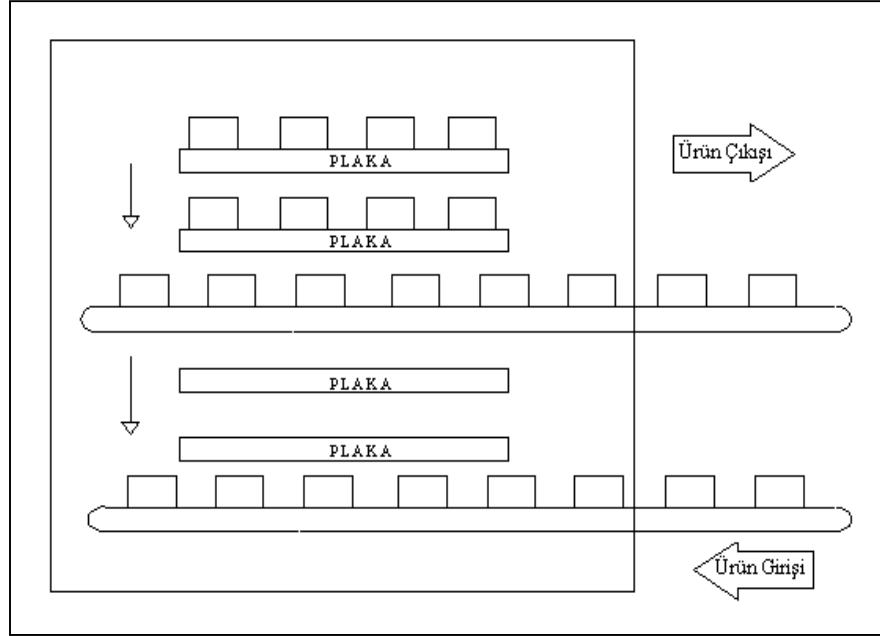
Plaka dondurucularının etkinliği plaka ile gıda arasındaki temas derecesine bağlı olduğundan, bu sıkıştırmanın büyük önemi vardır. Yine aynı nedenle, ambalajların, içinde boşluk kalmaması için ambalajlar biraz daha fazla doldurulur ve sıkıştırma sonucu içeriği iyice yerleşip ısı iletimi hızlanır [87].

Et ve balık gibi ambalaj içinde bütün bir kitle oluşturan ürünlerin aralarında boşluk kalan parçacık halindeki sebze ve meyvelerden daha çabuk donmasının nedeni de budur. Ancak plakaların sıkıştırılmasında ambalajın patlamaması gerekir. Bunu sağlamak için plakalar arasına iki taraflı boydan boya ağaç engeller konur. Bunların kalınlığı ambalaj kalınlığından biraz az olduğundan sıkıştırma ancak ağaç parçalarının kalınlığına kadar gerçekleşir [88]. Ağaç parçacıkları sıkıştırması sınırlıdır.

Plakalar dondurulduktan sonra kabin kapıları kapatılır ve soğutucu istenen derecede çalıştırılır. Ürün, sıcaklığı -18°C ' ye erişene kadar burada bırakılır. Donma süresi, başta ambalajla plakanın temas derecesine bağlı olmak üzere, ambalaj materyalinin cins ve kalınlığına, dondurulan ürünün çeşidine sıcaklık derecesine ve tüm ambalajlı gıdanın kalınlığına göre değişir. Bu yöntemle 5 cm kalınlıktaki ambalajlı kitleler 90 - 120 dakikada donmaktadır.

Kontinü çalışan plakalı dondurucular da vardır. Bu düzenlerin birinde, bir seri çift "raf-plaka" bulunur. Raf çiftinin, dondurucunun önünde yanı açıkta bulunduğu sırada, bantla taşınan ambalajlı ürünler otomatik olarak buraya doldurulur. Bu istiflenmiş raf dondurucuya girip yukarı doğru hareket ederken, boşta kalan rafa yeni bir yerleştirme başlar. Her raf (veya buna istasyon da denebilir) dondurucuda bir

devir yapıp donma tamamlanır ve donması tamamlanmış her istasyon sıra ile boşalır. Şekil 3.2’de kontinü plakalı dondurucu verilmiştir.



Şekil 3.2. Kontinü plakalı dondurucuda dondurulacak ürün girişi ve donmuş ürün çıkışı.

Kontinü yüklemeyle çalışan başka bir plakalı dondurma sisteminde ise dondurma, biri sabit diğeri hareketli iki plaka arasında bulunan ambalajların, sabit plaka üzerinde hareketli plaka yardımıyla kaydırılmasıyla tamamlanır.

Dolaylı temas metodu sadece düzgün yüzeyli, ambalajlanmış ürünlere uygun olmakla birlikte, sıvı halindeki gıdaların süratle dondurulmasında da yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak bu amaçla kullanılan cihazların ilkesi farklıdır. Bu amaçla kullanılan plakalar silindir şeklinde olup, dış kısmı yalıtılmıştır. Tubular kazıyıcılı soğutucu denen bu cihazların eksenine konumundaki mil (Mutator) ile soğutma silindirinin iç yüzeyi arasında çok az bir boşluk bulunur.

Mil üzerinde, silindir iç yüzeyini adeta kazıyan kazıyıcılar bulunmaktadır. Soğutucuya verilen sıvı veya yarı sıvı haldeki ürün, silindir iç yüzeyi ile mil arasındaki boşlukta çok ince bir film oluşturur. Bu sırada donma gerçekleşirken milin dönüşüyle mil üzerindeki kazıyıcılar silindir yüzeyini kazıyarak temizler. Bu suretle

donma yüzeyi, ısı iletimini engelleyen buz tabakasından temizlendiği gibi, bu sırada dondurulan ürünün hızla karıştırılması donmayı çabuklaştırmaktadır. Donma sadece birkaç saniye sürer.

Dondurucuya sıvı veya püre halinde verilen ürün burayı terk ederken sıvı-kar karışımı halindedir. Esasen böyle bir sistemde daha ileri düzeyde bir dondurma ne doğrudur ne de olanaklıdır. Aksi halde soğutucu tıkanıp blok halde kalır, işte bu sıvı-kar karışımı halindeki bu kitle ambalajlandıktan sonra ikinci aşama olarak soğuk hava dondurucularında istenen dereceye kadar dondurularak depolanır [87].

3.1.3. Daldırarak Dondurma

Ürünlerin su bazlı olmayan soğutucu akışkan içerisine daldırılması ile hızlı dondurma işlemine tabi tutulmasıdır. İlk uygulanan daldırarak dondurma işleminde soğutucu akışkan olarak R-12 ve diğer halokarbonlar kullanılmaktaydı ve bu durum da bu maddelerin atmosfer emisyonlarını arttırmaktaydı. Günümüzde ise bu tip soğutucu akışkanların yerini tamamen sıvı azot almıştır. Sıvı azot sahip olduğu korkunç kaynama özelliği türbülansa neden olur, dolayısıyla ürünlerin ayrılmasını ve çok büyük yüzey ısı transfer katsayısı elde edilmesini sağlar.

Bu yöntemle uygulanan hızlı dondurma ile minimum düzeyde nem kaybı, kokunun iyi şekilde saklanması, aşırı donmanın engellenmesi ve sıvı azot yaklaşık oda sıcaklığında gaz halinde çıkmasıyla sıvı azot tüketimini minimuma indirmesi sağlanır [89].

3.1.4. Kriyojenik Sıvılarla Dondurma

Ürünlerin direkt olarak sıvı azota daldırılmaları ürünlere zarar verebilmektedir. Sıvı azotun ürünlerin üzerine püskürtülmesi ile ürünlerin zarar görme riski azaltılır. Bundan dolayı 1960'dan sonra taşıyıcı bantlardan geçmekte olan ürünlere sıvı azot püskürtülmesi ilkesi ile çalışan dondurucuların tasarımları yapılmıştır [90].

Gıdaların dondurulmasında en fazla kullanılan kriyojenik sıvıların başında sıvı azot ve sıvı karbondioksit gelmektedir. Çilek ve bazı üzümsü meyvelerle, dilimlenmiş domates ve mantar gibi bazı hassas gıdalar çok hızlı bir dondurma ile kusursuz ürün elde edilebilmektedir. Kriyojenik dondurma yöntemi de esas olarak bu tip için geliştirilmiş olup uygulaması da halen bu ürünlerle sınırlıdır [87].

Spiral püskürtmeli kriyojenik dondurucular ve püskürtmeli kriyojenik dondurma tüneli dondurucuları bu yöntemle çalışmaktadır. Küçük sıvı azot damlacıkları ürünlerin üzerinde buharlaşırken, ürünü hızla soğutup dondurur. Bu tip dondurucularda kullanılan küçük sıvı azot damlacıkları buharlaşma yüzey ısı transfer katsayısını yüksek düzeyde olmaktadır. Bunun nedeni de sıvı-katı temasının çok iyi gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak kriyojenik dondurma tüneli dondurucularında üç kısım bulunmaktadır. İlk kısımda giren ürünlere buharlaşmayla oluşan azot gazını fanlar yardımıyla tünelde hareketi sağlanarak ön soğutma uygulanır. İkinci kısımda bant üzerindeki ürünlere sıvı azot püskürtülerek donma işlemi gerçekleştirilir. Son kısımda ise ürünün sıcaklığı dengelenerek tünelin sonundan dışarı alınır [91].

3.1.5. Kriyomekanik Dondurma

Kriyomekanik dondurma sistemlerinde spiral, akışkan yataklı gibi mekanik donduruculardan önce ürünün kriyojenik daldırmalı dondurucularda ön soğutma yapılır. Üzümsü meyvelerin dondurulmasında akışkan yataklı mekanik dondurucular en uygun gibi görülmektedir. Kriyojenik daldırmalı dondurucu kullanıldığında, sıvı azot yardımıyla ürünün dış kısmında birkaç saniye içerisinde kabuk oluşur.

Kriyojenik dondurucudan çıkan ürününde oluşan kabuk bu dondurucuya kıyasla daha sıcak olan mekanik dondurucunun ortamına dayanacak kalınlıkta olmaktadır. Bu tabaka ürünün mekanik dondurucuda donması esnasında oluşan hareketten dolayı ürünün zarar görmesini engelleyerek, ürünlerin şekillerini korumalarını sağlar [92].

3.2. GIDALARI KURUTMA TEKNİKLERİ İLE MUHAFAZA YÖNTEMLERİ

Gıda maddelerinin muhafazasında bilinen en eski metotlardan birisi de kurutmadır [93]. Kurutma, temel olarak su ve kuru maddeden oluşan bir ürünün içindeki suyun çeşitli yöntemlerle uzaklaştırılma işlemi olarak tanımlanabilir [21]. Sebze ve meyvelerin kurutulması için uygulanan yöntemler, ısı ve kütle transferini aynı anda uygulayarak, kurutulacak ürünün içerdiği suyun buharlaştırılmak suretiyle ortamdan uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır [94]. Teknik kurutmada, kuruma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem değişik metotlarla alınır. Bu nedenle kurutma, kuruyacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine getirilmesi olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) ünitelerin bütününe de “kurutma sistemi” denir. Kurutma işlemi sanayinin bir çok dalında (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak uygulanmaktadır [95].

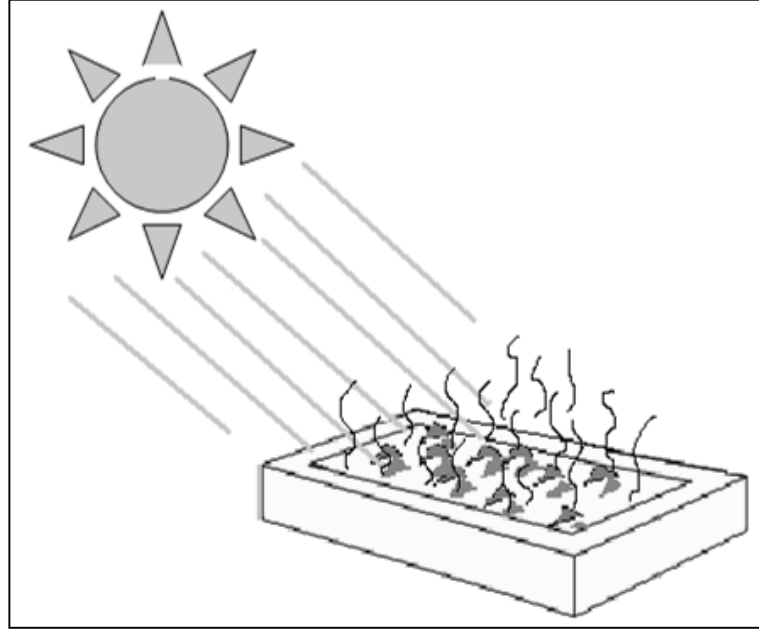
Gıda maddelerine uygulanan kurutmanın bir çok amacı vardır ve bunların belki de en belirgin olanı, uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma işlemi sonunda ürünün bozulmadan uzun süreli depolanabilmesi, ürünün nemini mikrobiyal gelişme veya diğer reaksiyonları sınırlamaya yeterli seviyeye düşürülerek sağlanır. Buna ek olarak ürünün nem miktarının düşürülmesi ile aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin muhafazası da sağlanmaktadır. Aynı zamanda kurutma işlemi sonunda ürün hacmi azaltılarak, gıda maddesinin taşınmasında ve depolanmasında verimliliğini artırır [96]. Gıdaların kurutulmasında uygulanan birçok yöntem vardır. Bu yöntemleri iki grupta toplanmaktadır.

Bunlar sırasıyla;

1. Doğal kurutma (güneşle kurutma),
2. Yapay kurutma.

3.2.1. Doğal Kurutma

Hiçbir teknik müdahale yapılmadan ürünün güneş altında kurutulmasıdır. Eskiden beri kullanılan yöntemdir. En önemli husus sıcaklıktır. Çünkü ürün içinde bulunan nem, ürün deforme olmadan sıcaklık etkisiyle havaya atılır. Ürün, toprak veya beton zemine branda, naylon ve bez üzerine serilerek kurutulur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Doğal kurutma.

3.2.2. Yapay Kurutma

Kurutma süresini kısaltmak, kalitesini yükseltmek, ürünü güneşin radyasyon etkilerinden korumak için yapay kurutma metotları geliştirilmiştir. Doğal kurutmaya göre en büyük üstünlüğü kontrollü bir kurutma ortamı sağlanmasıyla görünüş bakımından doğal kurutmadan daha iyi ürün elde edilmesidir [97]. Aşağıda bazı yapay kurutma teknikleri sıralanmıştır.

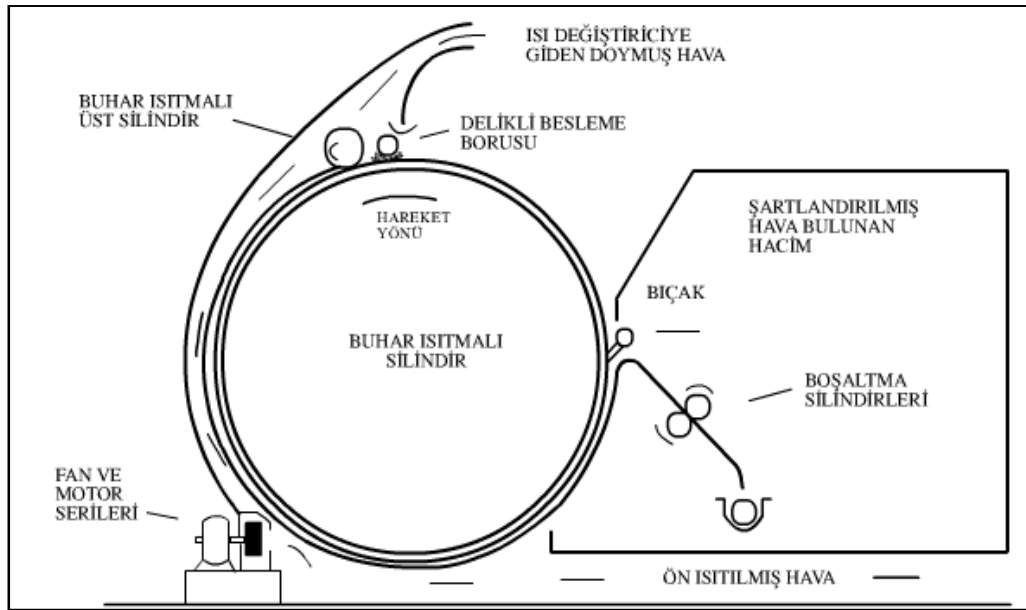
3.2.2.1. Morötesi Radyasyon Kurutma

Morötesi kurutmada elektromagnetik radyasyon kullanılır. Monomer yapılı kaplamalar ve boyar maddeler UV radyasyon etkisinde kurutulmuş olarak işlenirler.

Morötesi kurutmanın uygulanmasında en büyük sorun yüksek yatırım maliyetidir [98].

3.2.2.2. İletimle Kurutma

Kurutma silindirleri veya topları (Şekil 3.4), düz yüzeyler, açık kazanlar ve daldırma ısıtıcılar iletimle kurutmaya örnek verilebilir. Kurutulacak malzeme ısıtma yüzeyi ile temas halinde olmalıdır. Bu sistemlerde nem miktarı aşırı ısınmayı önlemektedir. İletim ile kurutma sistemleri genel olarak kağıt ürünlerinin kurutulmasında kullanılmaktadır. İletim ile kurutmada; yüksek kurutma hızı, sabit ısı ve kütle transferi koşulları sağlanamaz, sistem istenildiği gibi kontrol edilemez, işletilmesi genelde pahalıdır, makine etrafında istenmeyen çalışma koşulları oluşur [99].



Şekil 3.4. İletim kurutma sistemi.

3.2.2.3. Kızılötesi Işınımlı Kurutma

Kurutma, ısı ışınım, kızılötesi lambalar, buhar ısıtıcı kaynaklar, gaz ısıtıcı akkor yansıtıcılar ve elektrikle ısıtılmış yüzeyler ile sağlanır. Kızılötesi sadece malzemenin yüzeyi ve yüzeye yakın bölgelerinde etkilidir. Bu sebeple ince tabakaların kurutulması için uygundur. Kızılötesi ısıtma, kâğıt, tekstil gibi materyalin

kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak malzemenin yanabilir olması durumunda ürün ısı kaynağına yakın tutulmamalıdır [98,99].

3.2.2.4. Vakumda Kurutma

Bu kurutucularda kurutma vakum altında, düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu yöntemle ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmalarında veya nem miktarının düşük seviyelere düşürülmesi gereken ürünlerde uygulanmaktadır [100].

3.2.2.5. Karıştırmalı Yatakta Kurutma

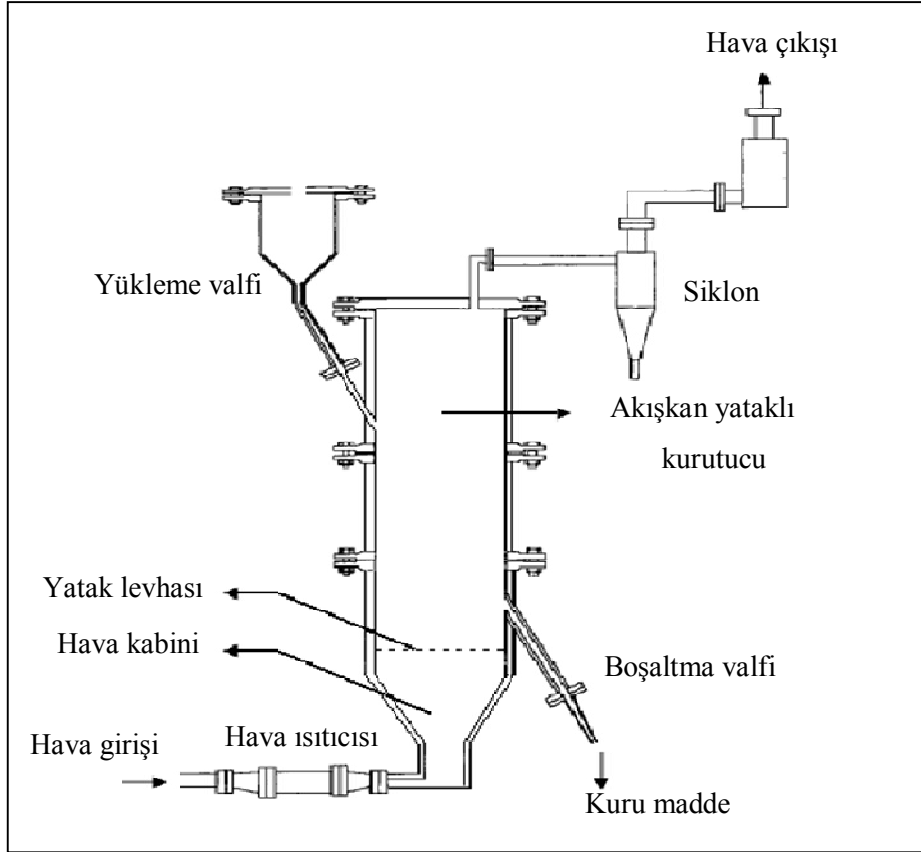
Titreşimli raf veya konveyör kullanılarak malzemenin sürekli ve belli aralıklarla titreştirilmesi sonucu homojen bir kuruma elde edilir. Aynı sonuç delikli raf veya konveyör üzerindeki yatağın bir miktarı akışkanlaştırılması ile de elde edilir. Tahıl kurutulması için uygundur [98].

3.2.2.6. Akışkan Yataklı Kurutma

Bu tip kurutucuların çalışma prensibi sıcak kurutma havasının kurutulacak olan katı parçacıklara alttan belli bir hızda verilmesine dayanır. Bu hız katı parçacıkların havada asılı kalacağı şekilde seçilmiştir. Isıtılmış havanın görevi hem kurutma hem de akışkanlaşma için gerekli olan yerçekimine karşı etkiyi oluşturmaktır.

Bu tip kurutucular ürünü yığın halinde kurutacak şekilde tasarlanabilirler. Akışkan yataklı kurutucularda sıcaklık 100°C'ye kadar çıkabilmektedir. Bazı tiplerde kurutulacak maddenin hareketini sağlamak için vibrasyon üniteleri de mevcuttur. Akışkanlaştırılmış yatakta tane yapılı maddeler arasından kurutma havası geçirilir. Hava hızı çok dikkatli ayarlanmalıdır. Toz veya taneli yapıdaki kurutucular malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olduğundan, kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir. Bu mekanizma ile büyük sıcaklık farkları sakıncası olmaksızın malzemelerin kurutulması mümkündür.

Otomatik yükleme ve boşaltmanın mümkün olduğu bu sistemin en önemli avantajı kurutma işleminin kısa sürede tamamlanmasıdır. Bu tip kurutucularda kömür, kireçtaşı, fosfat, plastik ve ilaç tabletleri kurutulması için uygundur [87,98,99]. Şekil 3.5'te akışkan yataklı kurutucunun yapısı görülmektedir [21].



Şekil 3.5. Akışkan yataklı kurutucu.

3.2.2.7. Kızgın Buhar Ortamında Kurutma

Kızgın buhar ortamında kurutma işleminde, katı maddelerin hava veya bir başka gaz ile kurutulması işlemi sırasında buharlaştırılan çözücü (su veya organik sıvı) yığın gaz akımına ulaşmak için durgun gaz filmine yayılmalıdır. Gaz filmi, kütle transferine karşı direnç ve kurutma miktarı, çözücü buharın yayılım oranına bağlı olarak değişir.

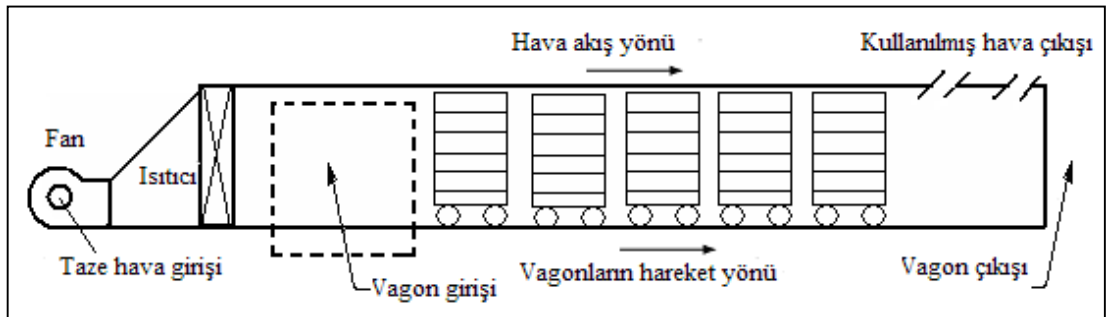
Bu yöntemin ısı verim yüksektir, çözücünün sisteme geri kazanımı da kolaydır. Ayrıca aşırı kurutma ve havanın oluşturduğu oksitlenme ve diğer kimyasal reaksiyonlar gözlenmez [99].

3.2.2.8. Flaş Kurutma

Flaş kurutma sistemlerinde düzgün bir şekilde bölünmüş katı parçacıklar, sıcak gaz akımı içerisinde yayılarak hızlı ve düzgün bir şekilde kurutulabilir [99]. Pigment, sentetik, reçine, gıda ürünleri, kağıt üretiminde uygulama örnekler vardır [98].

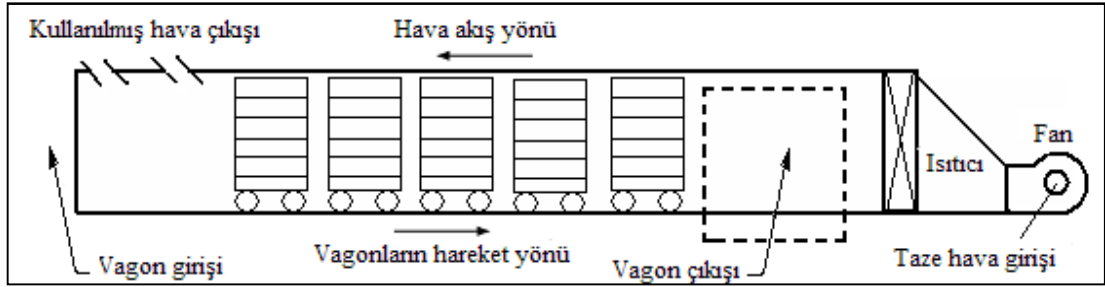
3.2.2.9. Tünel Kurutucu

Kurutulacak ürün miktarının çok olması ve ürünün genel özellikleri ile kuruluk derecesi yönüyle özdeş ise, sürekli tip kurutucuların kullanılması daha uygun olur. Kurutulacak madde vagonlar üzerindeki tepsilere yerleştirilerek uzun olan tünelin içerisinden geçirilir. Bu işlem ya devamlı vagonlar şeklinde veya bir vagon tüneli terk ederken yüklenmiş diğer bir vagon tünele girecek şekilde düzenlenir. Çeşitli tipteki tünel kurutucularda hava ve ürünün birbirlerine göre hareket yönleri farklıdır. Eğer vagonlar ile sıcak hava aynı yönde hareket ederse bu tip tünellere “paralel akış tüneli” denir. Bu tip tünel kurutucularda kurutma havası, önce yeni ürünle karşılaşır. Kurutma havasının süreç içinde soğuyup nemi artarken daha ileri düzeyde kurumuş olan ürünle temas eder. Bu durum kurutulan ürünün az da olsa tekrar nem almasına neden olur. Bir paralel akış tünel kurutucunun şeması Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.6. Paralel akış tünel kurutucu.

Kurutma havası ile vagonların hareketi birbirine zıt yönde ise, bu tip tünellere “zıt akış tüneli” denir. Bu tip tünellerde sıcak ve kuru hava ilk önce en fazla kurumuş olan ürünle temas eder. Bu tiplerde de sıcak ve kuru hava önce en kuru olan ürünle, daha sonra da gittikçe soğuyarak nemi artarken, en sonunda nem oranı yüksek ürünle temas eder. Şekil 3.7’de zıt akış tünel kurutucunun şeması görülmektedir.



Şekil 3.7. Zıt akış tünel kurutucu.

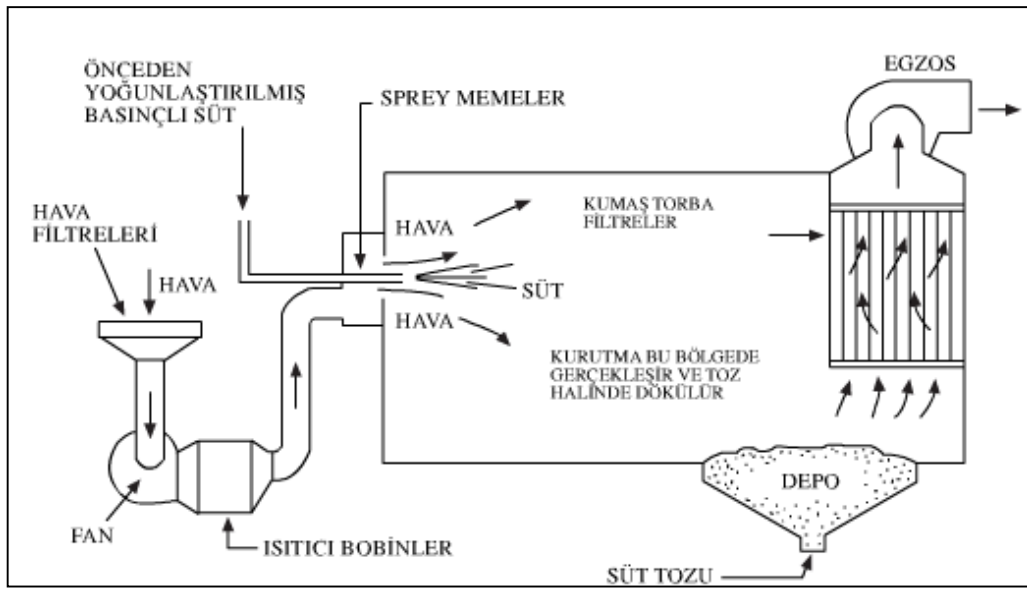
Meyve ve sebzelerin kurutulmasında en yaygın olan sistemler paralel veya zıt akış tünelleridir. Zıt akış tüneli ile paralel akış tünelinin kurutma karakteristikleri farklıdır. Paralel akış tünellerinde başlangıçta kuruma hızı çok fazladır. Ürünün yüzeyi çok hızlı kuruduğu için, üründe çok az bir büzülme-buruşma meydana gelir. Fakat tanecikli ürünler içinde, boşluk ve çatlaklar oluşur. Kurutma tünelinin sonunda kurutma havası nispeten soğuk ve fazla nemli olduğu için, kurutmanın son aşaması çok yavaş gerçekleşir. Zıt akış tünellerinde ise madde, kurudukça daha uygun kurutma şartları ile karşılaşır. Kurumanın ilk aşaması daha soğuk ve daha nemli kurutma havası ile gerçekleşir ve kurutulan ürün içinde nem dağılımındaki farklılık fazla olmadığından, tam ve engelsiz bir buruşma olur. Zıt akış tüneli özellikle erik gibi yumuşak meyvelere çok uygundur. Aksi halde kurumanın ilk aşamasında bunlarda öz suyu dışarı akar. Bunların yanında çapraz akışlı tünellerde kullanılmaktadır [101].

3.2.2.10. Püskürtmeli Kurutucular

Püskürtmeli kurutucular süttozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılmaktadır. Çünkü kurutulmuş malzeme damlacık veya tanecik yapısı olarak aynı yapıdadır ve kurutma süresi oldukça kısadır. Sıvı malzemeler, püskürtmeli

kurutucularda kurutulduğunda yüksek miktarlarda kurutulabilir. Püskürtmeli kurutucular iki akışkanlı meme, yüksek basınçlı meme veya dönen disk şeklinde olabilir.

Hava sıcaklığı 93 - 760°C arasında değişirken yüksek sıcaklıklar için özel yapı malzemeleri kullanılır. Hava sıcaklığı yükseldikçe ısı verim artar, bu nedenle yüksek sıcaklıklar tercih edilir. Sıcaklığa duyarlı ürünler bile düşük kuruma zamanı sayesinde kurutulabilir. Dönen tip püskürtmeli kurutucu Şekil 3.8’de verilmiştir [99].



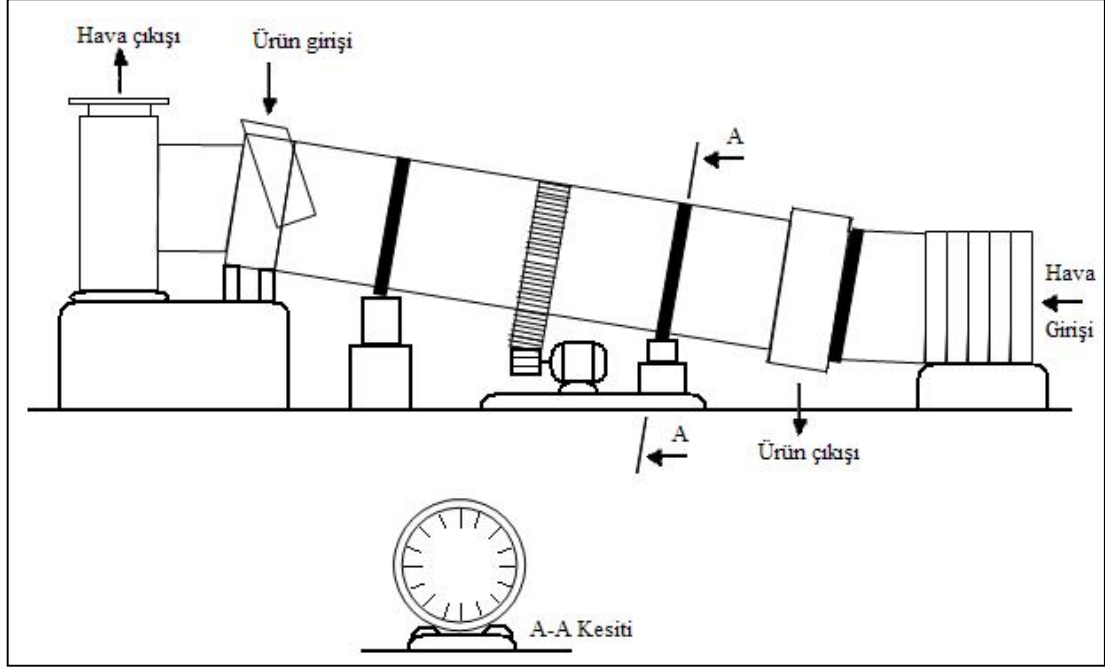
Şekil 3.8. Döner tip püskürtmeli kurutucu.

3.2.2.11. Döner Kurutucular

Döner kurutucularda kurutulacak olan ürünler tanecik halinde veya kristal yapıda, kurutma öncesinde genellikle uygulanan taşıma metotlarından birisi ile taşınabilecek kadar kuru olmalıdır. Ayrıca ürün, kurutucunun duvarlarında birikmeye sebep olmayacak kadar az yapışkan olmalıdır. Bütün döner kurutucular, eksenleri yatayla küçük bir açı yapacak şekilde kurulmuş ve kendilerini eksenleri etrafında döndürecek tekerlekler üzerine yerleştirilmiş, silindirik bir gövdeye sahiptirler.

Kurutulacak ürün kurutucunun yüksekte olan ucundan kurutucuya verilir, kurutucunun dönme hareketi yardımı ile yavaş yavaş kurutucunun alçakta olan ucuna

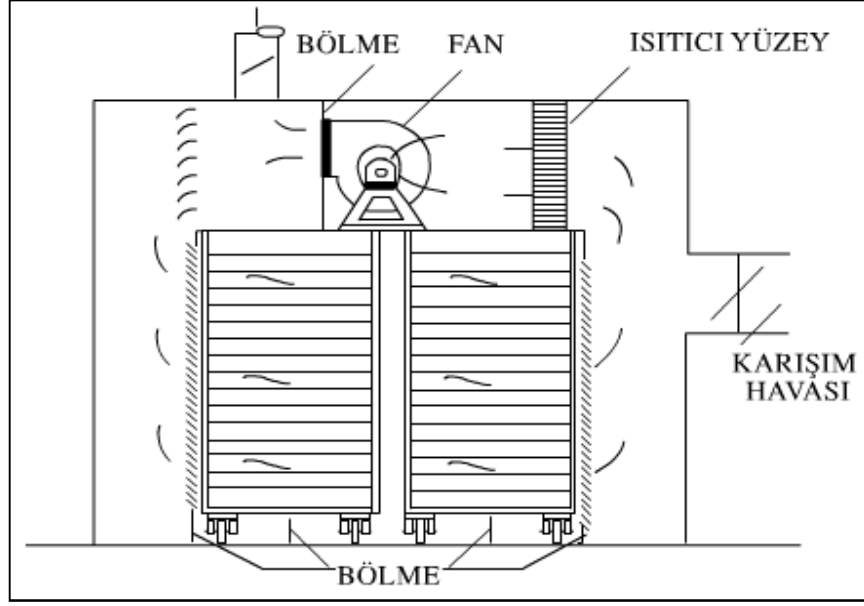
doğru ilerler ve buradan boşaltılır. Kurutulacak ürünün kurutucu içerisinde ilerlemesi, karışması ve kurutma havası ile daha iyi bir şekilde temas etmesi, kurutucu içerisinde yer alan raf ve kanatlarca sağlanır [101]. Döner kurutucunun şeması Şekil 3.9’da görölmektedir.



Şekil 3.9. Döner kurutucu.

3.2.2.12. Kabinli ve Bölmeli Kurutucular

Kabinli kurutucular, ısıtılan tavanlı sistemler (bu sistemlerde sadece doğal taşınım ve genelde zayıf ve düzensiz bir kurutma sağlanır), zorlanmış taşınımlı ve özel olarak tasarlanmış bölmeli daha karmaşık sistemler gibi birçok modeli vardır. Bu tip kurutucularda kurutma işlemi, kurutulacak malzemenin yüzey alanını arttırmak için tepsilere serilerek yapılır. Şekil 3.10’da, ürünlerin kurutulması işleminde kullanılan kabin kurutucusu verilmiştir [99].



Şekil 3.10. Kabin kurutucu.

3.2.2.13. Dielektrik Kurutma

Bu tip kurutmada, radyo frekansı veya mikrodalga bölgesinde çok yüksek frekansa sahip bir elektromanyetik alana yerleştirilen malzemenin içerisinde termal enerji üretilir. Elektromanyetik alan yönündeki hızlı değişimler yüzünden moleküler sürtünmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan ısı kutup akışını değiştirir. Sıvı haldeki suyun dielektrik sabitinin birçok katı malzemeninkinden çok yüksek olmasından dolayı ısı malzemenin su içeren kısmında üretilir. Bu olayla malzemeden suyu buharlaştırarak uzaklaştırılır [102].

3.2.2.14. Mikrodalga Kurutma

Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına uygulandığından bir dielektrik ısıtma formu olarak nitelenebilir. Mikrodalga kurutma şerit şeklindeki ince malzemelere uygulanır. Sistem giriş ve çıkışında alınması gerekli koruyucu önlemler sürekli çalışmayı zorlaştırır. Sistemi çalıştırmak için gerekli emniyet önlemleri mikro dalga kurutmaya, dielektrik kurutmaya göre daha pahalı hale getirir [98].

3.2.2.15. Apphertizasyon

Gıda maddeleri hermetik kaplar içinde 110°C ile 115°C arasında 10 ila 15 dakika sterilizasyonuna tabi tutularak saklanmaları sağlanır. Bilhassa çocuk mamaları, diyet gıdaları ve meyve nektarlarını işlemek için bu yöntem kullanılmaktadır [97].

3.2.2.16. Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutmanın temelinde süblümleşme vardır. Süblümleşme, üçlü noktanın yani 0.6113 kPa basınç ve 0.01°C sıcaklığın altında kapalı ortamda dondurulmuş üründen suyun buharlaşarak uzaklaşması işlemidir. Bu işlem esnasında su sıvı hale geçmediğinden dolayı üründe bozulma gerçekleşmez. Dondurulmuş üründeki su kristalleri ürünün gözeneklerinde buharlaşır ve üründeki hücre çeperini bozmaz. Bu işlem ürünün rengini, yapısını ve görünüşünü bozmadığı gibi ürünün taze görünmesini sağlar.

Dondurarak kurutma ısıya duyarlı çok hassas malzemelerin kurutulmasında kullanılır. Dondurarak kurutma öncelikle serum, bakteri ve virüs kültürlerin kurutulmasında olmak üzere ecza endüstrisinde ve gıdaların (kahve, süttozu v,b.) kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak malzeme ilk önce özelliğine göre -20 ile -40°C arasında dondurulur. Bu dondurma işlemi, herhangi geleneksel bir dondurma düzeninde gerçekleştirilebilir. Daha sonra hızlı bir şekilde kurutma hücrelerine alınır. Kurutma hücreleri vakum pompası yardımıyla vakumlanır ve donmuş malzemede bulunan buzun süblümleşmesi sağlanarak malzemenin kurutma işlemi gerçekleşir. Dondurarak kurutmanın avantajları, kurutulmuş malzemeye tekrar su ilave edildiğinde kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşması, kurutulan malzemenin raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve oda sıcaklığında muhafaza edilmesidir.

BÖLÜM 4

KURUTMA TERİMLERİ VE MEKANİZMASI

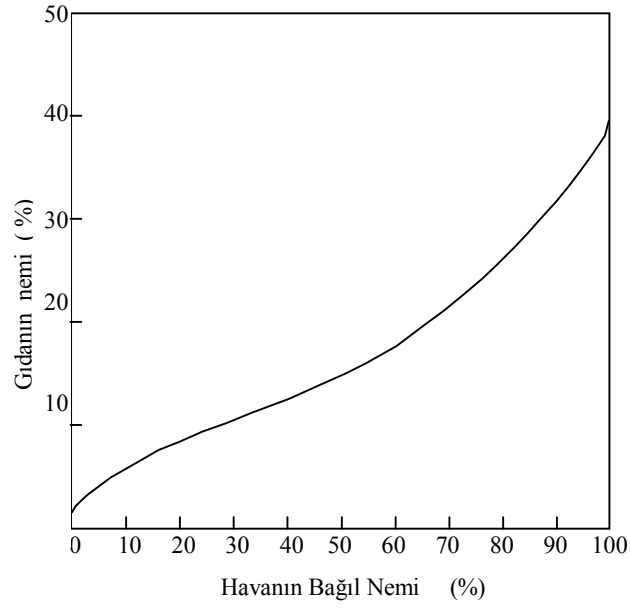
Kurutma, nemli materyal ile çevresi arasında gerçekleşen karmaşık bir nem alıp verme işlemidir [103]. Bu işlem sırasında materyalin nemi, çevresindeki katı veya akışkan (sıvı veya gaz) fazdaki ortama geçer. Kurutma işlemlerinde çevre ortamı olarak genellikle hava kullanılmaktadır. Bu nedenle kurutma nemli materyal ile hava arasındaki bir madde transferi olarak ele alınmaktadır [104].

4.1. DENGİ NEMİ

Bir kap içindeki su buharlaşarak kendisini çevreleyen atmosferle dengeye eriştiği gibi, herhangi ıslak bir madde de aynı davranışı göstererek bulunduğu sıcaklıkta kendisini çevreleyen atmosferle nem açısından bir dengeye ulaşır. Şekil 4.1’de belli bir sıcaklık derecesinde farklı bağıl nem içeren şartlarda tutularak dengeye ulaşmış bir gıdada, gıdanın nem içeriği ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu ilişkiye “sorpsiyon izotermi” denir.

Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi % 80 bağıl neme sahip olan bir gıdanın, atmosfer altında belli bir sıcaklıkta daima % 20 su içerdiği, yani bu şartlarda denge neminin % 20 olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla her gıdanın belli şartlarda ulaştığı denge nemi farklıdır ve kendine özgüdür. Ürünün sorpsiyon izoterminin belirlenmesi için uygulanan en basit yöntemde, sorpsiyon izotermi saptanacak gıda maddesi, bağıl nemi sabit kalabilen kavanozlarda belli sıcaklıkta, dengeye erişilene kadar tutulur.

Kavanozda istenen düzeyde nem içeren bir atmosfer oluşturmak için, kavanozun içine konan değişik tuzların çözeltilerinden yararlanılır (Çizelge 4.1). Böylece, içindeki atmosfer havasının bağıl neminin sabit kaldığı kavanozlara gıda maddesi uygun bir şekilde yerleştirilip, 20°C’deki sorpsiyon izotermi bulunmuş olur (Şekil 4.1) [105].



Şekil 4.1. Nem sorpsiyon izotermi.

Çizelge 4.1. Sudaki doymuş çözeltileri, bulunduğu ortamı farklı bağıl nemde tutan maddeler [39].

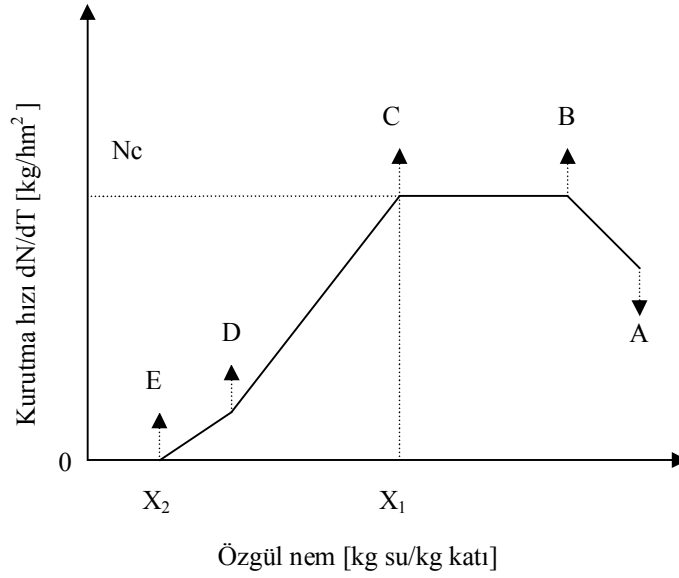
Tuz Adı	Kimyasal formülü	Bağıl nem (%)	Madde miktarı (gr)	Su miktarı (ml)
Potasyum asetat	CHCOOK	22	200	65
Magnezyum klorür	MgCl ₂	32	200	25
Potasyum karbonat	K ₂ CO ₃	41	200	30
Magnezyum nitrat	Mg(NO ₃) ₂	53	200	80
Sodyum bromit	NaBr	57	200	50
Sodyum nitrat	NaNO ₃	66	200	50
Stronsyum klorür	SrCl ₂	70	200	60
Sodyum klorür	NaCl	75	200	60
Amonyum sülfat	(NH ₄) ₂ (SO) ₄	90	200	60
Potasyum klorür	KCl	67	200	90
Baryum klorür	BaCl ₂	90	250	70
Lidyum klorür	LiCl	11	200	70

Gerçekte gıdaların sorpsiyon izoterm eğrilerinin belirlenmesinde gıdanın yaş veya kuru olmasının etkisi vardır. Yaş gıdanın nemini vermesi (desorpsiyon) ile kuru gıdanın nem alması (adsorpsiyon) olgusu tam olarak aynı yolu izleyen bir dönüşüm değildir. Buna göre, ıslak maddenin farklı bağıl nemli atmosferde tutulup, dengeye erişmesi beklendikten sonra tartılarak, ağırlık kaybının saptanmasıyla elde edilen eğriye “desorpsiyon izotermi” denir.

Başlangıçta tam anlamıyla kuru olan bir materyalin, yine değişik bağıl nemli ortamlarda tutularak elde edilen eğriye “adsorpsiyon izotermi” denir. Sorpsiyon izotermelerinden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır. Nitekim desorpsiyon izotermi, ürünlerin kurutulma işleminin izlenmesi ve incelenmesinde yararlı bilgiler vermektedir. Adsorpsiyon izotermi ise kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma koşullarını ortaya koymaktadır [105].

4.2. KURUTMA HIZI

Kurutmacılıkta esas, kurutulacak üründeki suyu buharlaştırmak ve oluşan buharı ortamdan uzaklaştırmaktır. Bu durumda buharlaşma ısısını sağlamak gereklidir. Bu ısı normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak 1 kg su için 2470 kJ'dür. Kurutma işlemi Şekil 4.2'de verilmiştir [105]. Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını belirler. Kaliteli ürün elde edilmesi ve ısı ekonomisi açısından kurutma hızı büyük önem taşımaktadır. Bir ürünü kuruturken en elverişli kurutma hızını elde etmek için, örnek kurutma çalışmaları yaparak kurutma eğrilerini belirlemek gerekmektedir.



Şekil 4.2. Özgül nemin bir fonksiyonu olarak kurutma hızının değişimi.

Şekil 4.2'deki C değeri, kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın oluştuğu duruma “kritik nokta” adı verilir. Kritik nokta, sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgeler. Şekil 4.2’de AB bölgesi kurutucu ve ürünün ısınma süresini göstermektedir. BC bölgesinde buharlaşma ürünün yüzeyinde oluşan sıvı film tabakasıyla gerçekleşmektedir. Şekil 4.2’de gösterilen kurutma hızı eğrisi kurumadaki çeşitli periyotları içermektedir.

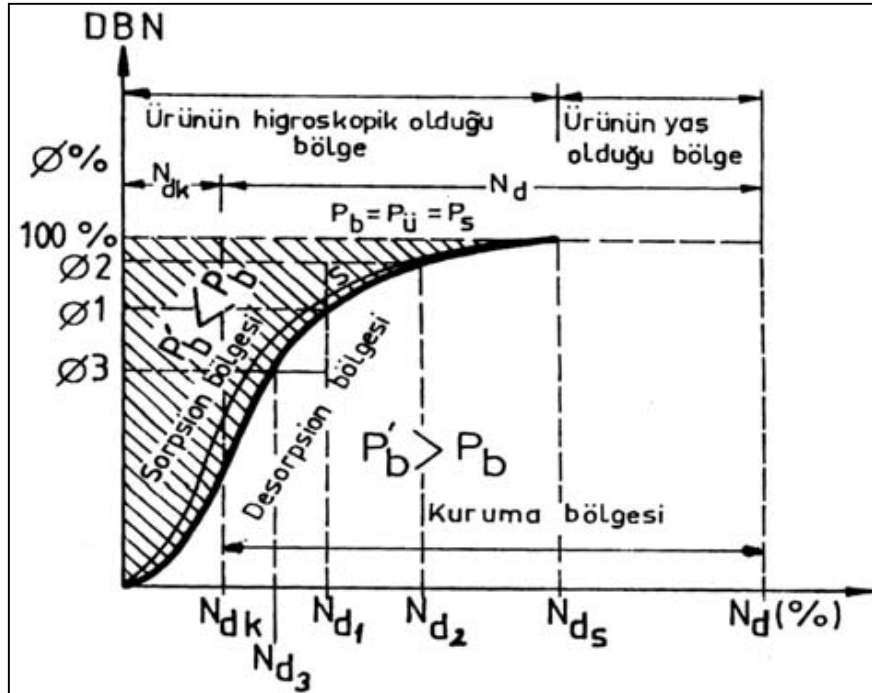
Başlangıçta nem, doymuş halde bulunan yüzeyden buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Kurutma ilerledikçe doymuş halde bulunan yüzey alanı kademeli olarak azalır. Bunu maddenin iç kısmındaki suyun buharlaşması izler. CD bölgesinde ise ürün yüzeyine difüze edilebilen su buharlaşmaktadır. Bu nedenle BC bölgesinde kurutma hızı sabit kalmakta ve CD bölgesinde ise doğrusal olmaktadır. DE bölgesi, ürün içindeki suyun yüzeye çok yavaş difüze edildiği bölgedir. Şekil 4.2’deki AB kararsız durumu, BC ise sabit hız periyodunu göstermektedir [96].

4.3. Kurumanın Statığı

Hava ile materyal arasındaki nem dengesi, zaman dikkate alınmadan irdelenmektedir. Nem dengesi iki olayla gerçekleşebilir;

1. Desorpsiyon (materyalin çevre havasına nem vermesi),
2. Sorpsiyon (materyalin çevreden nem alması).

Denge durumunda; havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı (P_u) birbirine eşittir. Materyalin yüzey sıcaklığı yaklaşık çevre havası yaş termometre havası sıcaklığına eşit olduğundan ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ile (P_u), havanın yaş termometre sıcaklığındaki su buharının kısmi buhar basıncı (P'_b) eşit alınabilmektedir. Bu nedenle denge durumunda materyalin ulaştığı nem (N_d), havanın kısmi buhar basıncına yani bağıl nemine (ϕ) bağlıdır [106].



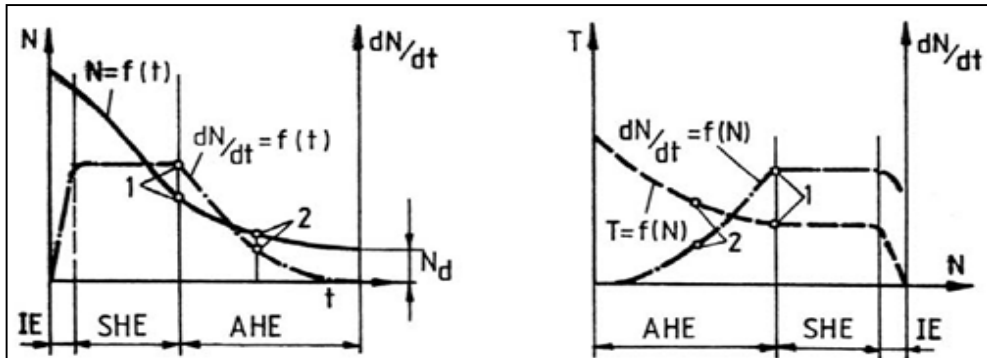
Şekil 4.3. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statığı açısından anlamı.

Herhangi bir materyalin sorpsiyon izoterm eğrisi kurutma açısından incelendiğinde sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 4.3'te gösterildiği gibidir. Şekilde

görüldüğü gibi, izotermin denge bağıl nemi (DBN) eksenini ile arasında kalan bölge içindeki her noktada ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı havada bulunan suyun buhar basıncından daha küçük olduğundan bu bölge, materyalin bünyesine nem aldığı şartları belirtmektedir. İzotermin denge nemi eksenini ile arasında kalan bölge içinde ise durum tam ters olduğundan bu bölge materyalin çevreye nem verdiği şartları belirtmektedir. Kuruma bölgesi ürünün ulaşabileceği en küçük denge nemi N_{dk} değerinden geçen bir eksenden başlatılarak gösterilmektedir.

4.4. KURUMANIN KİNETİĞİ

Kurumanın kinetiğinde, materyal ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zaman dikkate alınarak incelenir. Şekil 4.4'te tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri görülmektedir [104].



Şekil 4.4. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri.

Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı üzere kuruma olayının kinetik olarak incelenmesi sırasında aşağıdaki ilişkiler dikkate alınmaktadır;

Materyalin nemi ile kuruma süresi: $N=f(t)$

Kuruma hızı ile materyal nemi: $dN/dt=f(N)$

Kuruma hızı ile kuruma süresi: $dN/dt=f(t)$

Materyal sıcaklığı ile nemi: $T=f(N)$

Kuruma olayının gerçekleşmesi sırasında üç evre ile karşılaşmaktadır. Bu evreler;

Materyalin ısınma evresi (IE),
Sabit hızla kuruma evresi (SHE),
Azalan hızla kuruma evresi (AHE)'dir.

Kuruma işleminin başlangıcında görülen ısınma evresi (IE), kurutulacak ürünün sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığı ile dengeye gelinceye kadar devam etmektedir. Bu evrede kuruma hızı giderek artar ve bu evrenin sonunda en yüksek değere ulaşır. IE süresi, toplam kurutma süresine göre çok kısa olduğundan kuruma eğrilerinde gösterilmemektedir [107,108].

Sabit hızla kuruma evresinde (SHE), kurutulacak materyalin yüzeyi başlangıçta ince bir su tabakası ile kaplıdır. Öncelikle bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Ürünün özelliklerine bağlı olmayan bu buharlaşma tamamen dış hava koşullarınca belirlenmekte ve nem materyalin yüzeyinden, herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden buharlaşan su ile aynı davranışı göstererek buharlaşmaktadır.

Yüzeydeki serbest su tabakası sabit bir kuruma hızı ile buharlaşırken devamlı olarak hücre aralarındaki hava boşluklarının meydana getirdiği kılcal borularla beslenmektedir. Diğer bir ifadeyle, sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, suyun materyal yüzeyine iletim hızı ile yüzeyden buharlaşan suyun hızı birbirine eşit olmaktadır [109].

Sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, materyalden yüzeye doğru bir nem taşınması söz konusu olduğundan, materyalin iç katmanlarındaki nem miktarı giderek azalmaktadır. Bu durum nedeniyle, kurumakta olan materyalin yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktarda su, artık iç kısımlardan yüzeye taşınmamaktadır. Bunun sonucunda, materyalin yüzeyinin tamamen serbest su ile kaplı olması durumu sona ermektedir. Bu anda materyalin sahip olduğu nem düzeyine birinci kritik nem ve kuruma eğrilerinde bu durumu belirleyen noktaya ise birinci kritik nokta (BKN) adı verilmektedir.

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, sabit hızla kuruma evresi (SHE), ısınma evresinin (IE) sona erdiği nokta ile birinci kritik nokta (BKN) arasında yer almaktadır. Tarım ürünlerinin, özellikle tahılların, hasat sırasında sahip oldukları nem genellikle BKN değerinden daha az olmaktadır. Bu nedenle, sebze ve meyvelerin dışında kalan çoğu tarım ürününün kurutulmasında sabit hızla kuruma evresine (SHE) rastlanmamaktadır.

Birinci Kritik Nokta (BKN) değerinden sonra, kuruma eğrisinin eğimi azalan yönde hızla değişim göstermektedir. Bu noktadan itibaren, kuruma hızının zaman içinde giderek azaldığı başka bir evre başlamaktadır. Bu evre, birim zaman aralıklarında buharlaşan nem miktarının bir önceki zaman dilimine göre azalma göstermesi nedeniyle, azalan hızla kuruma evresi (AHE) olarak tarif edilmektedir.

Materyalin yüzeyindeki su filmi kaybolmaya başlayınca, kuruma hızı da ıslak alan miktarı ile orantılı olarak azalma göstermektedir. Bu evreye “1. azalan hızla kuruma evresi” denilmektedir. Bu evre sonunda, suyun materyalin iç kısımlarından yüzeye iletim hızı, yüzeyden meydana gelen buharlaşma hızında daha küçük olduğundan, materyalin yüzeyinin tamamen ince su tabakası ile kaplanması durumu ortadan kalkmaktadır. Bu andan itibaren kuruma hızı daha da yavaşlamakta ve bu noktadan itibaren “2. azalan hızla kuruma evresi” başlamaktadır.

Bu evre sonunda, materyal ile çevrenin sıcaklığı eşit duruma gelerek, $N=f(t)$ eğrisi N_d değerine, $dN/dt=f(N)$ eğrisi ise sıfır değerine ulaşarak birbirlerine asimptot olmaktadır. Azalan hızla kuruma evresi (AHE) sırasında, kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı noktaya, ikinci kritik nokta (İKN) ve materyalin bu andaki nem değerine ise “ikinci kritik nem” adı verilmektedir.

Bu evre sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla;

Teorik

Yarı teorik,

Deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden, yararlanmak mümkündür [108].

4.5. ÜRÜNÜN SU AKTİVİTESİ

Bir gıdanın su aktivitesi (a_w), onun mikrobiyolojik veya kimyasal-biyokimyasal yollarla bozularak kalitesini kaybetmesi üzerinde rol oynayan önemli bir faktördür [110]. Gıdaların su aktiviteleri saf suyun su aktivitesi olan $a_w=1.0$ değerine çok yakındır. Gerçekte meyve ve sebzelerin su aktiviteleri çoğunlukla $a_w=0.970-0.996$ arasında bulunmaktadır. Meyvelerin su aktiviteleri sebzelerinkinden biraz daha düşüktür.

Mikroorganizmalar su aktivitesine duyarlılıkları açısından farklılıklar göstermektedir. Genellikle su aktivitesi 0.6'nın altında tüm mikrobiyolojik faaliyetlerinin sona erdiği kabul edilmektedir. Gıdalarda bozulmaya neden olan bakterilerin çoğu $a_w=0.90$ altında faaliyette bulunmazken, küflerlerin faaliyetlerinin sona erdiği su aktivitesi alt sınırının $a_w=0.70-0.75$ arasında olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte $a_w=0.65$ düzeyinde iken dahi faaliyette bulunan bazı kserofilik küfler vardır. Mayaların faaliyetleri ise minimum su aktivitesi $a_w=0.85$ düzeyinde olması gerektiği bildirilmektedir.

Çeşitli kaynaklarda mikroorganizmaların faaliyeti ile ilgili olarak belirtilmiş bulunan minimum su aktivite değerlerinin birbirinden farklı değerler vardır. Bu durum su aktivitesinin mikroorganizmalar üzerindeki inhibishon etkisinin ortalamın diğer koşulları ile çok ilişkili olmasındandır. Bazı mikroorganizmalar zamanla düşük su aktivitesine adapte olabilmekte ve bu nedenle faaliyetlerini engelleyen minimum su aktivite değeri beklenen düzeyden sapmaktadır.

Mikroorganizmaların faaliyetleri için öngörülen minimum su aktivite değerleri çeşitli araştırmacılarca farklı değerler bulunmaktadır. Çizelge 4.2'de bazı mikroorganizma gruplarının üreyebileceği en düşük su aktivite değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Gıdalarda önemli olan bazı mikroorganizmaların faaliyeti 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
Önemli mikroorganizmalar		Önemli mikroorganizmalar	
Clostridium, E tipi	0.97	Candida zeylanodites	0.90
Pseudomonas spp.	0.97	Geotrichum candidum ca.	0.90
Acinetobacter spp.	0.96	Trichothecium spp. ca.	0.90
Escherichia coli	0.96	Byssochlamys nivea ca.	0.87
Enterobacter aerogenes	0.95	Staphylococcus aureus	0.86
Bacillus subtilis	0.95	Alternaria citri	0.84
Clostridium botulinum, A ve B tipi	0.94	Penicillium patulum	0.81
Candida utilis	0.94	Eurotium repens	0.72
Vibrio parahaemolyticus	0.94	Aspergillus glaucus	0.70
Botrytis cinerea	0.93	Aspergillus conicus	0.70
Rhizopus stolonifer	0.93	Aspergillus echinulatus	0.64
Mucor spinosus	0.93	Zygosaccharomyces rouxii	0.62
Candida scottii	0.92	Xeromyces bisporus	0.61
Trichosporon pullulans	0.91		

Su aktivitesinin 0.6 nın altında bulunması durumunda bile gıdalarda bozulmaya neden olan bazı reaksiyonların gerçekleşmesi mümkündür. Ancak su aktivitesinin daha aşağı düzeye inmesi durumunda bu reaksiyonların bir kısmının hızı yavaşlamaktadır.

Su aktivitesi mikroorganizmaların sadece çoğalma ve faaliyetleri üzerine değil; metabolit üretme yetenekleri üzerinde de etkilidir. Örneğin herhangi bir küfün belli bir su aktivitesinde bir gıdada çeşitli değişmelere ve bozulmalara neden olabilmesine rağmen, mikotoksin oluşturabilmesi için bundan daha yüksek düzeyde bir su aktivitesine gereksinim duymakta oluşu bilinen bir gerçektir. Bu durum Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Mikroorganizmaların düşük su aktivite değerlerinde üremelerine ve faaliyet göstermelerine karşın toksin oluşturabilmeleri için daha yüksek su aktivitelerine gereksinim duymaları “orta nemli gıdaların” bu açıdan güvenli olmalarının başlıca nedenidir.

Çizelge 4.3. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi (a_w) değerleri [25].

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 altra</i>	0,94	0,94

Su aktivitesi sadece mikroorganizma faaliyeti üzerinde etkili olmamakta, ayrıca çeşitli reaksiyonların hızları üzerinde de etkilidir. Su aktivitesinin gıdalarda oluşan reaksiyonlar üzerine etkisi, mikroorganizmalar üzerine olan etkisinden çok daha karmaşıktır. Bunun nedeni suyun çeşitli reaksiyonlarda çok farklı rollere sahip olmasıdır. Su, reaksiyona giren bileşikler ve reaksiyon sonucu oluşan ürünler için bir çözücü olarak, hidroliz reaksiyonlarında olduğu gibi bizzat reaktan olarak, enzimatik esmerleşme reaksiyonlarında olduğu gibi bir reaksiyon ürünü olarak ve bazı bileşiklerin katalitik etkisini engelleyici bir unsur olarak çeşitli fonksiyonlara sahip önemli bir maddedir.

Çizelge 4.4’de bazı gıda gruplarının su aktivite değerleri gösterilmiştir. Su aktivite değerlerindeki değişim sınırları, söz konusu gıdaların farklı bileşimlerinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.4. Bazı gıda gruplarının su aktiviteleri.

Gıdalar	Su aktivitesi (a_w)
Kuru meyveler	0.60 – 0.75
Kuru sebzeler	0.30 – 0.40
Reçel-marmelat	0.80 – 0.91
Meyve suyu konsantreleri	0.79 – 0.84
Tahıllar ve baklagiller	0.65 – 0.75
Baharat çeşitleri	0.40 – 0.58
Bal	0.75
Kek ve kuru pasta	0.60 – 0.90
Şekerlemeler	0.60 – 0.65
Meyveli kekler	0.73 – 0.83
Ekmek	0.96
Dondurulmuş gıdalar	0.60 – 0.90

Su aktivitesinin düşük olduğu kurutulmuş gıdalarda gerçekleşen en önemli reaksiyon “enzimatik olmayan esmerleşme”, yani Maillard reaksiyondur. Maillard reaksiyonu suya bağımlı bir reaksiyondur. Reaktanların mobilitelerinin kısıtlanmasına neden olan çok düşük su aktivitelerinde bu reaksiyon yavaşlarken su aktivitesinin yükselmesiyle hızlanmaktadır. Bu nedenle orta nemli gıdalarda hızlı bir esmerleşme gerçekleşmektedir. Nitekim kurutulmuş üzümde esmerleşme reaksiyonunun, $a_w=0.8$ düzeyinde iken en hızlı şekilde gerçekleştiği bulunmuştur. Buna karşın su aktivitesinin çok düşük olduğu aşırı kurutulmuş ürünlerde bu reaksiyon çok yavaşlamaktadır.

Gıdanın içerisindeki su oranının bulunduğu çevre havası bağıl nemi (ÇBN) ile dengeye ulaştığında, çevre havası bağıl neminin 100'e bölünmesi ile o gıdaya ait mevcut su oranındaki su aktivitesi (a_w) bulunur [87].

$$a_w = \frac{\text{ÇBN}}{100} \quad (4.1)$$

BÖLÜM 5

DONDURARAK KURUTMA

5.1. DONDURARAK KURUTMAYA GİRİŞ

Liyofilizasyon olarak da bilinen dondurarak kurutma biyoteknolojik ürünler, bazı hassas kimyasallar ve ecza endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ayrıştırma işlemidir [111-116]. Dondurarak kurutma yöntemi çok düşük basınç altında donmuş materyalden ya da donmuş çözeltilerden çözücünün (serbest su) süblimasyonla, bağlı suyun uzaklaştırılması (desorpsiyon) işlemidir [117,118]. Dondurarak kurutma işlemi yavaş ve pahalıdır [119-121]. Ancak kurutma sonunda diğer kurutma teknikleriyle karşılaştırıldığında en kaliteli ürün elde edilmektedir [122,123]. Dondurarak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde, büzülmüş ve gözenekli yapısı sayesinde su alarak (rehidrasyon), kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşır [71,124]. Ürünün raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve soğukta saklamaya gerek kalmadan oda sıcaklığında muhafaza gibi avantajları vardır [76,125].

5.2. SÜBLİMLEŞME TEORİSİ

Dondurarak kurutma işleminin temeli süblimleşmedir. Dondurarak kurutmadaki süblimleşme işlemi, bir maddedeki donmuş suyun erime olmaksızın doğrudan buhar fazına geçmesi işlemidir [126]. Bazı durumlarda maddenin üç fazı (katı-sıvı-gaz) bir arada bulunabilir. Bu denge halleri birlikte üçlü noktayı oluşturur [127].

Saf madde bu durumda aynı sıcaklık ve basınçta, fakat farklı özgül hacimlere sahip olur. Su için üçlü noktanın koşulları 0.01°C ve 0.6113 kPa 'dır. Su ancak bu koşullar altında üçlü noktada bulunabilir. Hiçbir madde üçlü nokta basıncının altında bir basınçta sıvı fazında denge halinde kalmaz. Aynı sıvı donduğunda hacimleri küçülen maddeler kapsamında sıcaklık için de geçerlidir. Fakat yüksek basınçta maddeler üçlü faz sıcaklığının altında da sıvı fazda bulunabilirler. Su atmosfer basıncı altında sıvı olarak bulunamaz, fakat 200 Mpa basınçta -20°C sıcaklıkta sıvı olarak bulunabilir.

Bir madde katı fazından buhar fazına iki yolla geçebilir. Birinci yolda önce sıvı faza sonra buhar fazına geçer. İkinci yolda ise katı madde doğrudan buhar fazına geçer. Doğrudan geçiş ancak üçlü nokta altındaki basınçlarda olabilir. Çünkü maddenin bu basınç noktasının altında sıvı halde bulunması söz konusu değildir. Katı fazdan doğrudan buhar fazına geçiş süblimasyon olarak adlandırılır. Üçlü nokta basıncı atmosfer basıncından büyük olan maddeler, örneğin kuru buz (katı karbondioksit) süblimasyon atmosfer basıncı altında buhar fazına geçişin tek yoludur. Süblime olabilen her maddenin süblimasyon koşulları farklıdır [128].

Örneğin donmuş suyun normal basınçta, oda sıcaklığında süblimasyona uğrarken, buzun süblimasyonunun minimum koşullarında, sıcaklık 0°C basınç 4.579 mm Hg (0.610 kPa)'dır. Buz 0°C veya altında, basınç 4.579 mm Hg veya altında olunca süblime olabilmektedir. Daha kapsamlı bir tanımlamayla buzun süblimasyonu, su buharı basıncının onu çevreleyen ortamın su buharı basıncından daha yüksek olmasıyla olanaklıdır. Buzun buhar basıncı, sıcaklığına bağlıdır. Örneğin 0°C 'deki buzun buhar basıncı 4.579 mm Hg düzeyinde olduğu halde, -15°C 'deki buzun buhar basıncı 1.241 mmHg 'dir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı.

Sıcaklık (°C)	Basınc Değerleri (mmHg)				
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
-29	0.317	0.311	0.304	0.298	0.292
-28	0.351	0.344	0.337	0.330	0.324
-27	0.389	0.381	0.374	0.366	0.359
-26	0.430	0.422	0.414	0.405	0.397
-25	0.476	0.467	0.457	0.448	0.439
-24	0.526	0.515	0.505	0.495	0.486
-23	0.580	0.569	0.558	0.547	0.536
-22	0.640	0.627	0.615	0.603	0.592
-21	0.705	0.691	0.678	0.665	0.652
-20	0.776	0.761	0.747	0.733	0.719
-19	0.854	0.838	0.822	0.806	0.791
-18	0.939	0.921	0.904	0.887	0.870
-17	1.031	1.012	0.993	0.975	0.956
-16	1.132	1.111	1.091	1.070	1.051
-15	1.241	1.219	1.196	1.175	1.153
-14	1.361	1.336	1.312	1.288	1.264
-13	1.490	1.464	1.437	1.411	1.386
-12	1.632	1.602	1.574	1.546	1.518
-11	1.785	1.753	1.722	1.691	1.661
-10	1.950	1.916	1.883	1.849	1.817
-9	2.131	2.093	2.057	2.021	1.985
-8	2.326	2.285	2.246	2.207	2.168
-7	2.537	2.493	2.450	2.408	2.367
-6	2.765	2.718	2.672	2.626	2.581
-5	3.013	2.962	2.912	2.862	2.813
-4	3.280	3.225	3.171	3.117	3.065
-3	3.568	3.509	3.451	3.393	3.336
-2	3.880	3.816	3.753	3.691	3.630
-1	4.217	4.147	4.079	4.012	3.946
0	4.579	4.504	4.431	4.359	4.287

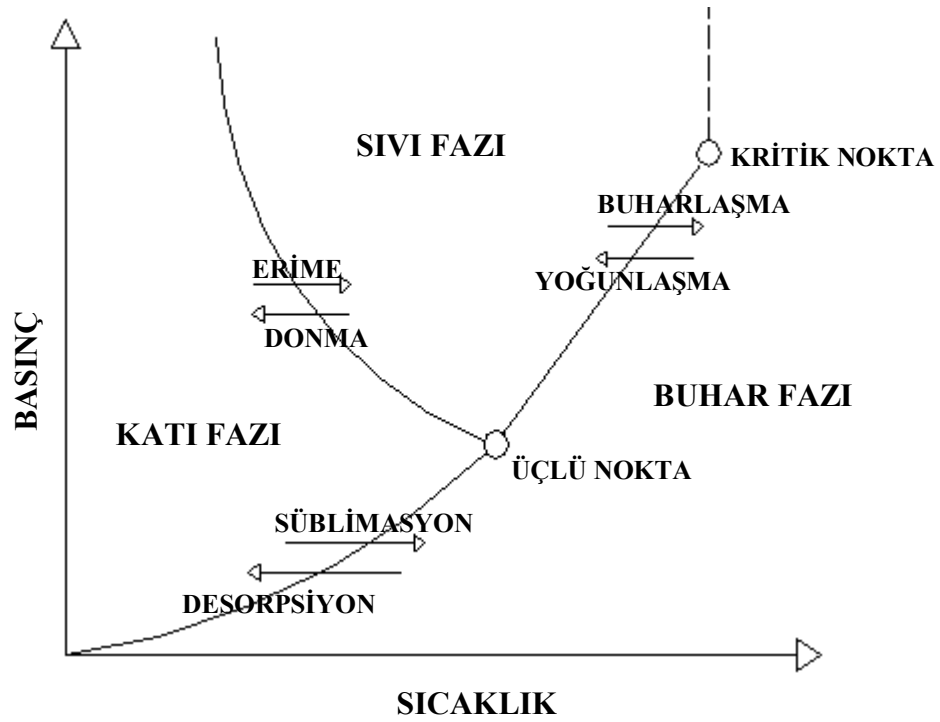
Bilindiği gibi 0°C'deki suyun 0°C'deki buz haline dönüşmesinde 335 kJ/kg düzeyinde "donma gizli ısı" serbest kalır. 0°C'deki su, 0°C'deki buhar haline dönüşürken 2500 kJ/kg'lık buharlaşma gizli ısı absorbe eder. 0°C'deki buz, 0°C'deki buhar haline dönüşürken 2835 kJ/kg (335 + 2500 = 2835 kJ/kg) ısı absorbe eder. Donma ve buharlaşma gizli ısılarının toplamı olan bu ısıya "süblimasyon gizli ısı" denir. Buzun süblimasyonu için gerekli ısı eğer buzdan alınırsa, buzun sıcaklığı düşer. Bu olay evaporatif yolla soğuma olgusundan başka bir şey değildir. Bu nedenle dondurarak kurutmada, ürünlerdeki buz süblime oldukça, ürün sıcaklığı gittikçe düşer [87]. Çizelge 5.2'de buz buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı, buhar basıncı ve sıcaklık dereceleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Buz buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basıncı sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi.

Sıcaklık (°C)	Mutlak basınç (mm Hg)	Süblimasyon ısı (kJ/kg)
0	4.576	2835.0
-1	4.178	2836.0
-4	3.309	2837.0
-7	2.621	2837.5
-10	2.047	2838.0
-12	1.597	2838.7
-15	1.241	2839.0
-18	0.956	2839.6
-21	0.734	2840.0
-23	0.558	2840.1
-26	0.424	2840.4
-29	0.320	2840.4
-32	0.237	2840.4
-34	1.811	2840.4
-37	0.129	2840.4
-40	0.098	2840.4

5.3. SÜBLİMLEŞMENİN TERMODİNAMİĞİ

Süblimleşme için şartları belirlemede, suyun denge faz diyagramına bakmak faydalıdır. Denge faz diyagramı (üçlü nokta), suyun tek bir bileşen sisteminde farklı fazların dengede olduğu basınç ve sıcaklığı gösterir. Bu diyagram, suyun süblimleşme olayında gerekli sıcaklık ve basınç aralıklarının belirlenmesi için kullanılabilir. Şekil 5.1’de su gibi donma ile genişleyen bir maddenin basınç – sıcaklık faz denge diyagramı verilmiştir.

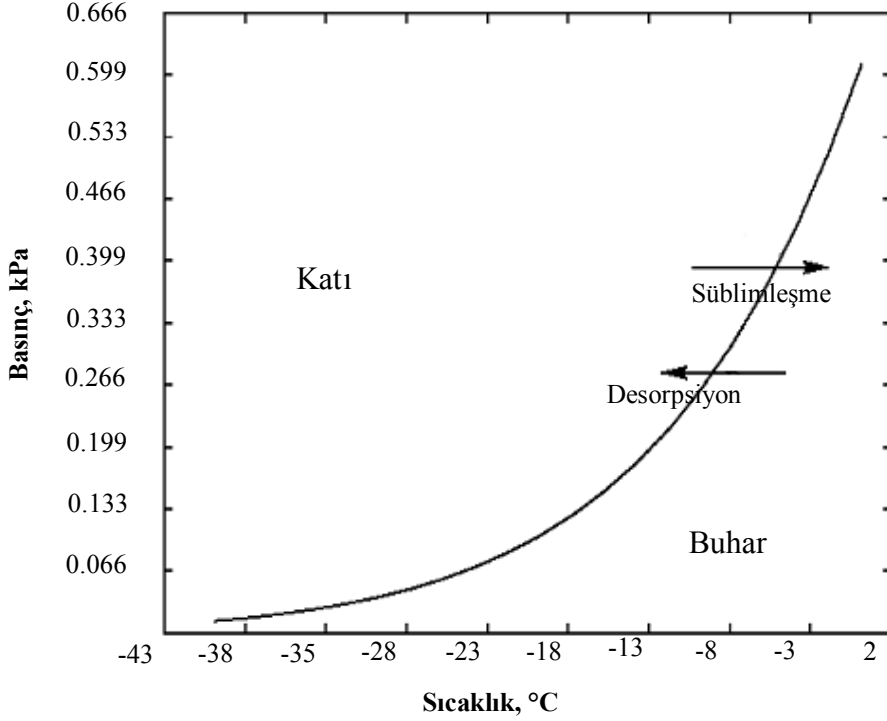


Şekil 5.1. Denge faz diyagramı (üçlü nokta).

Şekilden anlaşılacağı gibi maddenin katı halden sıvı hale geçmesi erime, sıvı halden katı hale geçmesi donma olduğu gibi sıvı halden gaz haline geçiş buharlaşma, gaz halinden sıvı hale geçiş yoğunlaşmadır. Dondurarak kurutma işleminde önemli olan katı halden gaz haline geçiş süblimasyon olayıdır, bunun tersi ise gaz halinden katı hale geçiş desorpsiyon (çökme) ’dır [125,126].

Şekil 5.2’de, su için katı fazı ile gaz fazı arasındaki doyumluk eğrisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi buzun süblimleşmesi için, buz sıcaklığının üçlü nokta

sıcaklığının 0°C ve buhar basıncı üçlü nokta basıncının altında 0.61 kPa olması gerekliliği görülmektedir.



Şekil 5.2. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi [57].

Süblimleşme işleminin sürdürülebilir olması için, süblimleşme aralığındaki buz ve gaz denge durumunda olmamalı. İki fazdan oluşan bir sistemde, bir fazın Gibbs enerjisi diğer fazın Gibbs enerjisine eşit olduğunda, verilen sıcaklık ve basınç için fazlar dengededir. Gibbs enerjisi, G , aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$G = H - T.S \quad (5.1)$$

Burada;

H : Entalpi, (kJ)

T : Sıcaklık, (K)

S : Entropi, (kJ/K)

dir [126, 129].

Süblimleşme durumunda, buzun G'si, gazın G'sine eşit olduğunda faz değişimi durur. Bu denge durumu Şekil 5.2'de doyumluk eğrisiyle gösterilmiştir. İki fazın Gibbs enerjileri arasındaki farkı (ΔG), sıfır değilse fazlarda biri görünmez. Süblimleşmenin gerçekleşmesi için, buzun G'si buharın G'sinden yüksek olmalıdır. Bu durum buzun sıcaklığının attırılması veya gazın basıncının düşürülmesiyle denge durumundan uzaklaştırılarak elde edilebilir [126]. Süblimleşme işlemi denge şartlarında veya denge şartlarına çok yakın gerçekleştiğinde, sıcaklık ve basınç arasındaki ilişki Clausius-Claperyon eşitliğiyle açıklanabilir.

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{sub}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (5.2)$$

Burada; P (basınç), T (mutlak sıcaklık) sıcaklığına bağlı olarak doymuş buhar basıncı, ΔH_{sub} süblimleşme gizli ısısıdır [126, 130]. Clausius-Claperyon eşitliği aynı zamanda süblimleşme gizli ısısının birinci durumdan, ikinci duruma kadar ki aralığın üzerinde sabit olduğunu varsayar.

Bu eşitlik ara yüzeyde buzun sıcaklığı verildiğinde süblimleşme ara yüzeydeki buhar basıncının belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak gizli ısı, sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu için, Şekil 5.2'deki eğri üzerindeki sıcaklık fonksiyonunun belirlenmesi ve Clausius-Clapeyron eşitliğinde yerine kullanmak daha uygundur [126].

5.4. KİNETİK TEORİSİ VE SÜBLİMLEŞME ORANI

Termodinamik, süblimleşme için gerekli koşullar hakkında bilgi sağlar, ancak denge koşullarında olmayan süblimleşmenin gerçek oranının belirlenmesi için bir yol göstermez. Bu bilgiyi elde etmek için kinetik teoriye bakılmalıdır.

Kinetik teoride, bir maddenin durumu moleküler seviye üzerinde tarif edilir. İç moleküler kuvvetler ve moleküllerin kinetik enerjisiyle belirlenir. Bir sistemdeki moleküllerin tümü farklı kinetik enerjilere sahiptir ve bir kinetik enerji dağılımı

vardır. Bir sistem, kinetik enerji dağılımı ve moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin sonucunda tarif edilebilir.

Katı maddede moleküllerin ortalama kinetik enerjisi (molekülleri birbirine bağlayan iç moleküler kuvvetlerle ilgili enerjisi) daha azdır. Ancak süblimleşen katının yüzeyinde kinetik enerji dağılımı bu iç moleküler kuvvetlerin üstesinden geçerek yüzeyden ayrılacak yeterli enerjiye sahiptir. Yüzeyden ayrılacak enerjiye sahip moleküllerin yüzdesi, katı maddenin sıcaklığı ile artar.

Süblimleşen katının, yüzeyinde gaz moleküllerine dönen moleküllerin miktarı gaz basıncı ile belirlenir. Gaz basıncı, gazdaki moleküllerin sayısı, gazın kapladığı hacim ve gazın sıcaklığı ile belirlenir. Daha yüksek basınçta, katıya dönüşen moleküllerin oranı artar.

Buzun süblimleşme oranını en üst seviyeye çıkarmak için kontrol edilebilecek iki uygun değişken vardır. Bunlar buzun süblimleşme yüzeyinin üst su buharının basıncı ve buzun sıcaklığıdır. Basıncın düşürülmesi, süblimleşme yüzeyinden daha fazla sayıda gaz moleküllerin ayrılmasını sağlarken, sıcaklığın arttırılması sonucu daha fazla molekül yüzeyden ayrılır. Bu durumda, süblimleşme ara yüzünden sürekli molekül akışına neden olur.

Yüksek buz sıcaklığı alçak basınçla birleştiğinde süblimleşme oranı artışı kinetik teoriden görülebilir. Knudsel, kinetik teoriden buzun süblimleşme oranı (G_{ks}) için bir denklem türetmiştir [126].

$$G_{ks} = k_b P_b \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 0 < k_b < 1 \quad (5.3)$$

Burada;

k_b : Buharlaşma katsayısı,

P_b : Buzun doymuş buhar basıncı, (kPa)

- M : Su buharının moleküler ağırlığı, (kg/kmol)
R : Gaz sabiti, (8.31441x10³ J/kmolK)
T : Buzun mutlak sıcaklığı, (K).

Bir çok araştırmacı çeşitli sıcaklıklarda buzun k_b 'sını bulmaya çalışmışlar ve genellikle 0.6 ile 1 arasında değişen değerlere ulaşmışlardır [53].

Suyun P-T diyagram eğrisinde bulunan veriler kullanılarak Eşitlik 5.3'te yerine konulduğunda, yüksek buz sıcaklıklarının, yüksek süblimleşme oranlarının meydana geldiğini göstermektedir. Bu yüzden dondurarak kurutma için ideal sıcaklığın, ürün için gerekli olan maksimum müsaade edilebilir sıcaklık olması beklenir. Bu durum dondurarak kurutma uygulamaları arasında en çok bilinenidir [56].

Gerçek bir sistemde, sadece buzun yüzeyini terk eden değil aynı zamanda buza dönen moleküller de olacaktır. Bu yüzden, su buharı kısmi basıncı süblimleşme oranı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Buhar basıncını düşük tutmak için vakum sisteminde yoğunlaştırıcı kullanılabilir. Vakum sistemi içindeki yoğunlaştırıcının etkisi Eşitlik 5.4 ile ifade edilebilir ve P'_k , buharlaştırıcı ortam basıncıdır [126].

$$G_{sub} = k_b (P_b - P'_b) \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

5.5. DONDURARAK KURUTMA İŞLEMİNİN SAFHALARI

Dondurarak kurutma işlemi üç önemli safhadan oluşur. Bunlar sırasıyla,

1. Dondurma safhası,
2. Birinci Kurutma safhası,
3. İkinci Kurutma safhası'dır [59].

5.5.1. Dondurma Safhası

Kurutulacak materyal özelliğine uygun olarak dondurulur. Gıdalardaki su saf halde bulunmaz. Suyun içinde bulunan maddenin özelliği ve konsantrasyonuna göre ötektik değeri değişir. Biyolojik dokular için bu sıcaklık genellikle NaCl'in ötektik değeri olan -21.6°C alınmaktadır. Dokular bu değer altındaki sıcaklıklarda dondurulur [71,125].

Ürün büyük ise ürünün dış kısmındaki çözücü donar fakat iç kısım donmamış olarak kalabilir. Bunun için ürünün içerdiği çözücünün ve katı maddenin tümünün donması gerekir. Çözücünün kristal hale geçmesi büyük önem taşır. Buz kristali oluşmadan sıvıdan camsı katı (camsı oluşum) hale dönüşüm olabilir [71,125]. Bu yapıdan suyun ulaştırılması zordur. Eğer doku ötektik değerinin üstündeki sıcaklıklarda dondurulursa kristalizasyon sağlanamayacak ve dokunun kurutulması oldukça zorlaşacaktır.

Buz kristallerinin büyüklüğü ile materyalde oluşan gözenekli yapı arasında bir ilişki vardır. Kristaller buhar fazına geçince işgal ettikleri kadar hacimde yer boşaltırlar. Küçük kristaller yapıda az ve küçük gözenekler oluştururlar. Buz kristali küçük olduğunda az gözenekli yapı oluşur. Buz çapı büyüdükçe gözenekli yapıda büyür. Hızlı dondurma işleminde, küçük buz kristalleri oluşur. Küçük buz kristalleri dondurarak kurutmak zordur fakat bunların süblimasyonu materyalin yapısına daha az zarar verir. Yavaş dondurma işleminde, büyük buz kristalleri oluşur. Büyük buz kristalleri dondurarak kurutmak, küçük buz kristallere göre daha kolaydır. Fakat materyalin yapısına daha fazla zarar verir [125]. Dondurma işleminin sonunda, başlangıçta sistemde bulunan suyun % 65-90'ı donmuş, geri kalan % 10-35 oranındaki su ise bağlı su (donmamış su) olarak bulunur. Materyali dondurma işlemi ya dondurarak kurutma cihaz içinde ya da başka bir dondurucuda yapılabilir.

5.5.2. Birinci Kurutma Safhası

Donmuş materyallerden çözücünün (genellikle su) düşük basınç altında, katı halde gaz haline geçmesi olayı süblimasyondur. Donmuş tabakadan suyun gaz halinde

uzaklaşması olayı buhar konsantrasyon farkı ile oluşur. Süblimasyon ile materyalde uzaklaştırılan su buharı kurutma hücresine yayılır [125]. Su buharının materyalden sürekli biçimde uzaklaştırılmasını sağlayacak dengesiz şartları oluşturmak için su buharı kurutma hücresinden yoğunlaştırıcıya vakum vasıtası ile sürekli şekilde taşınır. Böylece kurutma hücresinin buhar basıncı çözücünün süblimasyonunu sağlayacak şekilde düşük tutulur.

Su molekülleri süblime olurken çok yüksek süblimasyon ısısını (2840 kJ/kg) kurutulacak materyalden alır ve donmuş tabakanın sıcaklığı daha da düşer [71]. Eğer sisteme herhangi bir ısı kaynağından ısı sağlanmazsa ürünün içindeki su buharı kısmi basıncı ile dengeye gelir ve üründen suyun süblimasyonla ayrışması durur. Süblimasyonun devam etmesi için her hangi bir ısı kaynağından sisteme ısı verilmesi gerekir. Kurutulacak materyale ısı, kondüksiyon konveksiyon veya radyasyonla verilir. Kondüksiyon ile ürünün ısıtılması ürünün bulunduğu kabın altında bulunan plakaların ısıtılması ile sağlanır [71,131]. Sisteme sağlanan ısı gelişi güzel artırılmaz. Dondurarak kurutulmuş tabakanın maksimum sıcaklığı biyoaktiviteyi kaybetmeyecek, rengini değiştirmeyecek, kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlara sebep olmayacak şekilde seçilmelidir [71,125].

Süblimasyon oranı kısa zamanda hızlı bir şekilde artar. Süblimasyon sonucu kuruyan ve hala donmuş halde olan tabaka arasında bir ara yüzey meydana gelir. Kuruyan alandaki gözenekler buhar akışına karşı direnç oluşturur. Bu direnç süblimasyon oranını azaltır ve zamanla “0”a yaklaşır. Serbest suyun tamamen süblimasyonu ile birinci kurutma periyodu biter. Birinci kurutma periyodu bittiğinde nem miktarı % 7-8 dir [125].

5.5.3. İkinci Kurutma Safhası

Dondurarak kurutma işleminin en son safhası olan ikinci kurutma safhası donmamış (bağlı) suyun uzaklaştırılmasını içerir. İkinci kurutma safhasında, fiziksel adsorpsiyon, kimyasal adsorpsiyon ve kristalizasyon suyu olarak bulunan bağlı suyun desorpsiyonla uzaklaştırılması işlemidir [120]. İdeal bir dondurarak kurutma işleminde ikinci kurutma safhası hemen birinci kurutma safhasının sonunda başlar.

İyi tasarlanmış dondurarak kurutma işleminde birinci kurutma safhası boyunca yalnız donmuş suyun süblimasyonla uzaklaştırılmasını, ikinci kurutma safhası boyunca da yalnız bağlı suyun uzaklaştırılmasını temsil eder. Fakat gerçekte dondurarak kurutma sistemlerinde, az da olsa bir miktar bağlı su, birinci kurutma safhası süresince kurutulacak maddeden uzaklaştırılır.

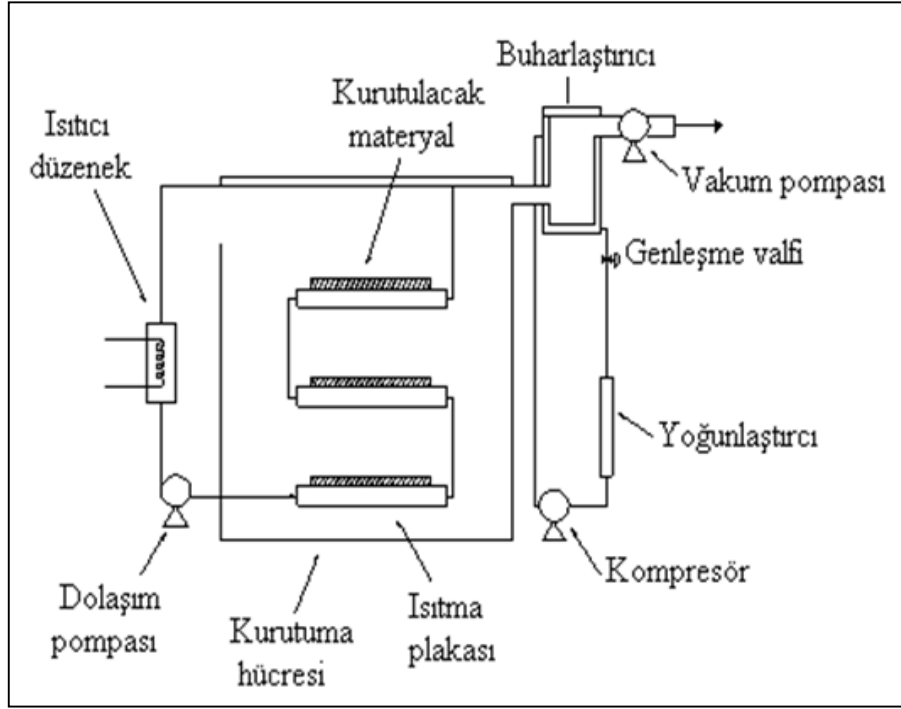
Dondurarak kurutma sistemlerinde, kurutulacak madde içerisindeki bütün donmuş çözücünün süblimasyonla uzaklaştırıldığı an (birinci kurutma safhasının sonu) ikinci safhasının başlangıcı olarak kabul edilir. Böylece ikinci kurutma safhası boyunca kurutulacak maddeden yalnızca bağlı haldeki su uzaklaştırılır.

Materyalde toplam suyun % 65-90'ı serbest haldeki su olup, birinci kurutma safhası boyunca süblimasyonla uzaklaştırılır. Toplam suyun %10-35'i bağlı sudur. Bağlı suyun uzaklaştırılması kurutma hızını ve toplam kurutma süresini etkiler. Bağlı suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zaman serbest suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zamana eşit veya daha uzun olabilir.

Kurutulacak materyalde bulunan bağlı su materyale vakum altında ısı verilerek uzaklaştırılır. Birinci kurutma safhasında olduğu gibi, ikinci kurutma safhasında da kurutma süresince materyale verilen ısı gelişigüzel artırılmaz. Bu ısı ikinci kurutma safhası boyunca ürünlerdeki nemin kontrasyonu sıcaklık ve zaman göre büyük değişiklikler gösterir. Sıcaklığa bağlı ürünler için genellikle 10-35°C arası, sıcaklığa daha az bağlı ürünler için ise 50°C ve üstündeki sıcaklıklar tercih edilir [71].

5.6. DONDURARAK KURUTMA SİSTEM ELEMANLARI

Şekil 5.3'de bir dondurarak kurutma sisteminin başlıca üniteleri ile çalışma prensibi görülmektedir. Dondurarak kurutma sistemi; soğutma sistemi, kurutma hücresi, vakum pompası ve ısıtma ünitesi olmak üzere dört kısımdan oluşur.

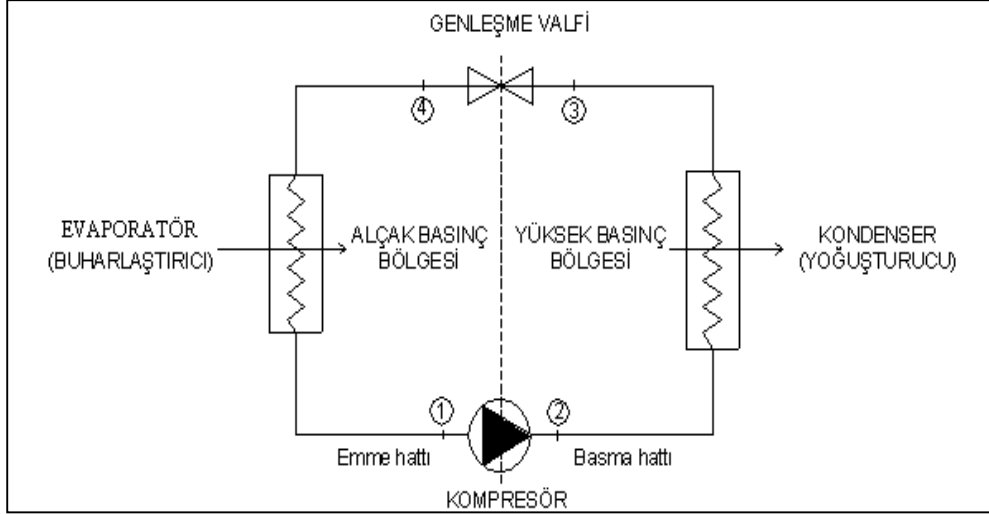


Şekil 5.3. Dondurarak kurutma sistemi şeması.

5.6.1. Soğutma Sistemi

Dondurarak kurutma sisteminde soğutma sistemi olarak buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi kullanılmaktadır. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi, kapalı bir devre içinde dolaştırılan soğutucu akışkanın, fiziksel durumunun değiştirilmesi ile yani sıvı halden gaz haline, gaz halinden sıvı haline geçirilmesiyle soğutma yapılan sistemlerdir [132]. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi, soğutma sistemlerinin en çok bilinen ve en yaygın olarak kullanılan sistemdir.

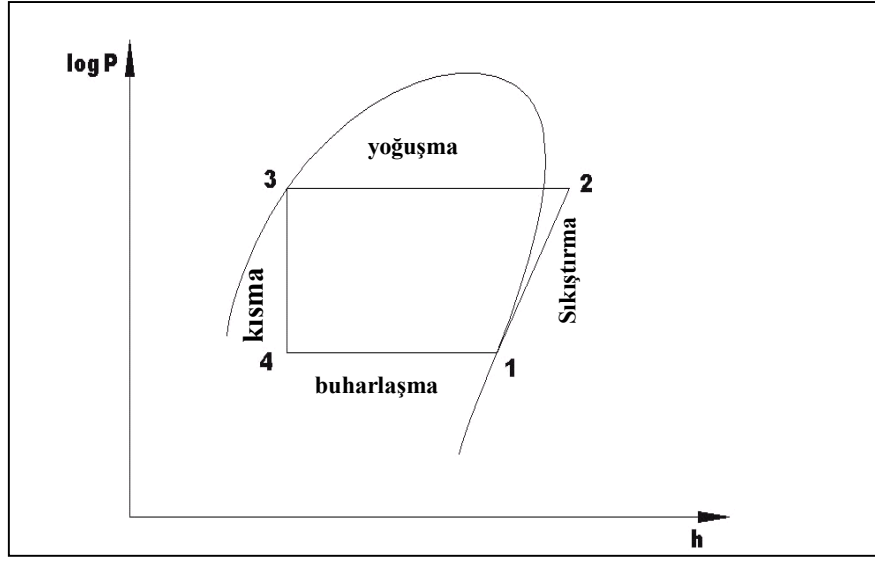
Buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde soğutucu akışkan buhar halinden sıvı hale, sıvı halden buhar haline dönüşmektedir. Bu dönüşüm, sistem çalışma süresince devam eder. Buhar sıkıştırımlı bir soğutma sisteminin temel bileşenleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemin temel elemanları; kompresör, yoğunlaştırıcı (kondenser), genleşme valfi veya kılcal boru ve buharlaştırıcı (evaporatör) dir [133,134].



Şekil 5.4. Buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminin elemanları.

Sistemde kompresör, buharlaştırıcıdan gelen düşük basınçtaki doymuş buhar halinde olan soğutucu akışkanı sıkıştırarak basıncını ve sıcaklığını yükseltir [135]. Kompresörden yüksek basınçta çıkan soğutucu akışkan yoğuşturucuya gelir, burada çevreye ısı (yoğunlaşma gizli ısısı) atarak yoğunlaşır. Yoğuşturucudan sıvı olarak çıkan soğutucu akışkan bir genleşme vanası veya kılcal borudan geçirilerek basıncı düşürülür.

Düşük basınçta buharlaştırıcıya giren akışkan burada buharlaşır. Buharlaşma gerçekleşirken soğutulan ortamdaki ısı (buharlaşma gizli ısısı) çekilir ve böylece soğutma olayı gerçekleşmiş olur. Buharlaştırıcıdan çıkan buhar fazındaki soğutucu akışkan düşük basınçta tekrar kompresöre girer ve çevrim devam eder. Buhar sıkıştırımlı ideal soğutma çevriminin Şekil 5.4 üzerindeki rakamlara göre, logP-h diyagramı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Buhar sıkıştırmalı ideal soğutma çevriminin P-h diyagramı.

Şekil 5.5'teki logP-h diyagramında buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimindeki soğutkanın çevrim sırasındaki safhaları diyagram üzerinde belirtilen sayılar yardımıyla aşağıda anlatılmıştır.

- 1-2 : Doymuş buharın bir kompresör yardımıyla buharlaşma basıncından yoğunlaşma basıncına sıkıştırılması (Tersinir adyabatik sıkıştırma)
- 2-3 : Sabit basınçta ısının dışarıya atılarak yoğunlaştırılması (doymuş sıvı haline kadar),
- 3-4 : Isı ve iş alışverişi olmaksızın, akışa direnç gösteren bir kısma elemanından genleşme geçirilerek, sıvının basıncının yoğunlaşma basıncından buharlaşma basıncına düşürülmesi (Sabit entalpide tersinmez genişleme) (kısma),
- 4-1 : Sabit basınçta ısının ortamdan çekilerek buharlaştırma (Tersinir ısı çekilmesi), olarak gerçekleşir [82,36,137].

Soğutulan ortamdaki (Q_s), buharlaştırıcı tarafından çekilen ısı, soğutma yüküne eşittir.

$$Q_s = Q_b \quad (5.5)$$

Buharlaştırıcının kapasitesi

$$Q_b = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (5.6)$$

\dot{m} : Soğutucu akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

Q_b : Buharlaştırıcı kapasitesi, (kW)

h_1 : Kompresör girişindeki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg)

h_4 : Buharlaştırıcı çıkışındaki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg).

eşitliği ile bulunur [138].

Soğutucu Akışkanın Kütleli Debisi

Eşitlik 5.6 kullanılarak buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisi bulunur. Bulunan soğutucu akışkan debisi Eşitlik 5.8 ve Eşitlik 5.9'da yerine konularak yoğuşturucu ve kompresör kapasiteleri bulunur. Buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisi;

$$\dot{m} = \frac{Q_s}{Q_b} = \frac{Q_s}{h_1 - h_4} \quad (5.7)$$

eşitliği ile bulunur [139].

Yoğuşturucu Kapasitesi

$$Q_y = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad (5.8)$$

Q_y : Yoğuşturucu kapasitesi, (kW)

h_2 : Kompresör çıkışındaki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg)

h_3 : Yoğuşturucu çıkışındaki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg)

eşitliği ile bulunur [140].

Kompresör için Gerekli İş

$$\dot{W}_k = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (5.9)$$

\dot{W} : Kompresör gücü, (kW)

eşitliği ile bulunur [134].

5.6.2. Kurutma Hücresi

Dondurarak kurutma işleminde, ürünün kurutma olayının gerçekleştirildiği ünedir. Kurutma hücresi kurutma işlemi süresince vakumlanmaktadır. Kurutma hücresinde kurutulacak ürünün yerleştirileceği tepsi ile süblimleşme işleminin gerçekleşmesi için gerekli olan ısıyı sağlayan ısıtma ünitesi bulunmaktadır. Kurutma hücre paslanmaz ve dış basınçtan etkilenmeyen malzemedendir yapılmalıdır. Ayrıca kurutma işlemini gözlemek için bir adet gözetleme camı bulunmalıdır.

5.6.3. Vakum Pompası

Donmuş materyalde bulunan buzun sıvılaşmadan buharlaşması (süblimasyon) için kurutma hücresindeki gerekli vakumu sağlayan elemandır. Vakum pompası ürünün içinde bulunduğu kurutma hücresindeki havayı vakumlayarak kurutma hücresinde düşük bir basınç meydana getirir. Bu düşük basınçta suyun üçlü faz dediğimiz durumundaki basıncından daha düşük bir basınç olmalıdır ki ürünlerdeki su sıvılaşmadan buharlaşmayı sağlamalıdır.

Vakum pompasının hacimsel hızı Eş. 5.10'a göre hesaplanır.

$$S = \eta \frac{V_k}{t_b} \ln \left[\frac{P_{atm}}{P_b} \right] \quad (5.10)$$

S : Vakum pompası hızı, (m³/s)

η : Vakum pompası verimi,

V_k : Kurutma hücresinin hacmi, (m^3)

t_b : Buharlaşma süresi, (s)

P_{atm} : Atmosfer basıncı, (Pa)

P_b : Buharlaşma basıncı, (Pa),

Vakum Pompası Debisi

$$\dot{m} = S \cdot \rho_k \quad (5.11)$$

\dot{m} : Vakum pompasının kütleli debisi, (kg/s)

ρ_k : Kurutma hücreesindeki havanın yoğunluğu, (kg/m^3)

eşitliği ile hesaplanır.

$$\rho_k = \frac{P_k \cdot M_k}{R \cdot T_k} \quad (5.12)$$

P_k : Kurutma hücresi basıncı, (Pa)

M_k : Kurutma hücreesindeki havanın molekül ağırlığı, (kg/mol)

R : Gaz sabiti, ($8,314 \times 10^3$ J/molK)

T_k : Kurutma hücresinin mutlak sıcaklığı, (K) [141,142].

5.6.4. Isıtma Ünitesi

Kurutma sırasında üründen süblimasyonla alınan ısı, bir ısıtma ünitesiyle devamlı olarak ürüne verilir. Gıda dıştan içeri doğru kurur. Merkezde en son kalan buz da süblimasyona uğrayınca ürün tümüyle kurumuş olur. Kurumanın bu şekilde gelişmesi nedeniyle dondurarak kurutmada derinlerde kalmış buz tabakasına ısının ulaştırılmasının oldukça zor olduğu görülmektedir. Isının, kurumuş bu yalıtkan tabakayı aşması oldukça zordur. Bu nedenle dondurarak kurutma yönteminde bir süre sonra kuruma hızı yavaşlamaktadır.

Daha iyi bir ısıtma için, iletimle ısıtmadan çok, derinliklere sızma özelliği olan infrared veya mikrodalga gibi, radyasyon kaynaklarından yararlanılmaktadır [87]. Basınç ve sıcaklık değerlerine göre verilmesi gereken süblümleşme ısı miktarları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi.

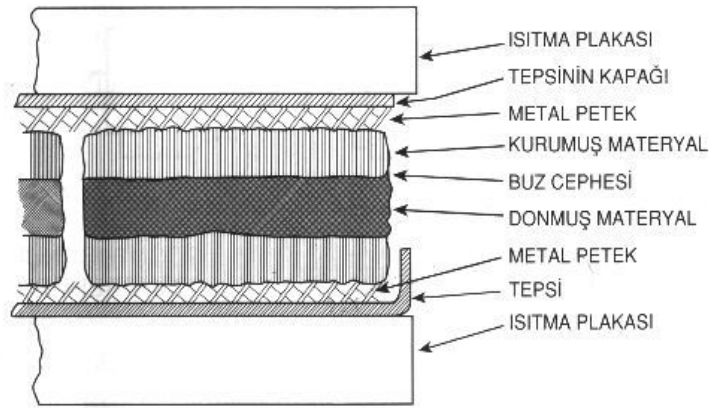
Basınç (kPa)	Buharlaşma sıcaklığı (°C)	Buharlaşma ısı (MJ.kg ⁻¹)
101.3 (atm)	100	2.27
2.5	21.1	2.45
1.3	1.1	2.47
0.7	0.1	2.49
0.29	-10	2.51
0.13	-19.8	2.51

5.7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bu yöntemde kurutulacak materyal önce dondurulmakta; böylece içindeki su buz olarak bağlanmakta daha sonra da bu buz uygun şartlar altında (vakum) buharlaştırılmaktadır. Dondurarak kurutma işlemi "dondurma" ve "kurutma" olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

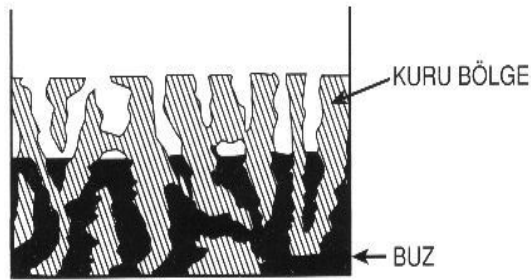
İlk aşamadaki dondurma işlemi, herhangi geleneksel bir dondurma düzeneğinde gerçekleştirilebilir. Uygulanan dondurma hızı, kurutulmuş ürünün rekonstitüsyon özellikleri son derece etkilidir. Dondurma işlemi ne kadar hızlı olursa, o kadar küçük ve fazla sayıda buz kristali oluşacağından, kurumuş üründe o kadar fazla gözenek ortaya çıkar. Böylece ürünün rehidrasyon hızı yüksektir ve rehidrasyon tamdır. Rehidrasyon, kurutulmuş ürüne tekrar su verildiğinde ürünün tekrar kurutma önceki haline dönüşebilmesidir. Bununla birlikte ön hazırlıklardan sonra kurutulacak ürünler, genellikle 0.5-3.0 cm/h hızla -20°C ile -30°C'ye kadar dondurulur.

Dondurarak kurutmada en önemli sorunlardan birisi kurutulacak ürüne ısı verilmesidir. Kurutulan ürünün sıcaklığı daima yoğunlaştırıcı sıcaklığından daha yüksek tutulmak zorundadır. Ancak bu koşulla kurutulan üründen yoğunlaştırıcıya doğru bir buhar akışı sağlanabilir. Dondurarak kurutmada kurutulan ürün devamlı ısıtılması gerekmektedir. Şekil 5.6’da dondurularak kurutulan bir ürünün kuruma sırasında plakalı ısıtıcılarla ısıtılması görülmektedir [87].



Şekil 5.6. Dondurarak kurutmada gıdanın iletimle ısınması.

Plakalı ısıtmada olduğu gibi iletimle ısıtmada, süblimleşmiş buharın çıkışını kapatmamak için, ısıtılan gıda doğrudan plaka üzerine yapışacak şekilde yerleştirilmez. Gıda ile plaka arasında daima ısıyı ileten fakat buharın hareketini engellemeyen, metalden yapılmış bir petek bulunur. Süblimasyon önce yüzeyde oluşur. Bu şekilde yüzeyin kuruması ile buz tabakası gittikçe içlere doğru geriler (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Dondurularak kurutmada gözenekli yapı oluşumu.

Bazı dondurarak kurutma cihazlarında ısıtıcı plakalar çivili olarak yapılmıştır. Böylece kurutulan maddenin derinlerine kadar ulaşan bu çivilerle daha iyi bir ısı transferi sağlanarak kuruma hızlandırılmaktadır [71,87].

5.8. DONDURARAK KURUTMANIN UYGULAMA ALANLARI

Geleneksel kurutma yöntemleri ile kurutulmaları zor olan kahve, soğan, çorba, bazı deniz ürünleri ve meyve gibi bazı gıda maddeleri dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulmaktadır.

İlaç sanayinde de dondurarak kurutma yöntemi uygulanmaktadır. Bazı ilaçlar solisyon halindeyken zamanla bozulmaya uğrayabilir. Bozulmaya eğilimli ilaçlar üretimin ardından dondurarak kurutulup molekülleri kararlı hale getirilir ve böylece biyoaktiviteleri korunur.

Seramik, süper iletkenler ve tarihsel dokümanlar gibi cansız maddeler de dondurularak kurutulabilir. Diğer bir örnek nükleer atıkların dondurularak kurutulmasıdır. Bu durumda, ortak aktivite kuru toz halinde nükleer atıklara uygun kimyasallar ilave edilerek cam tuğlaların içine eritilerek dökülür ve ucuz depolama imkanı sağlanır [71,125,143].

Biyolojik materyallerin uzun süre saklanması bu yöntemle daha kolaydır. Kan plazması, serum, hormon çözeltileri, nakil edilecek organ yada doku, yapay deri bu yöntemle uzun süre saklanabilecek biyolojik materyallerdir. Maya, virüs, bakteri gibi canlı hücrelerin saklanmasında da bu yöntem kullanılır [71].

Dondurarak kurutma işlemi histolojik çalışmalarda doku örneklerinin mikroskopik görüntüleme için uygun hale getirilmesinde, kimyasal ve biyokimyasal analizler için örnek hazırlanmasında kullanılır. Ayrıca Kemik greflerini oda sıcaklığında saklamak için dondurarak kurutma işlemi uygulanır [125,144].

5.9. DONDURARAK KURUTMANIN AVANTAJLARI

Dondurarak kurutulmuş ürünlerin kalitesine hiçbir kurutma yöntemi ile ulaşılmamaktadır. Bu nedenle oldukça değerli ve ısıya duyarlı pekçok biyolojik ürünün kurutulmasında dondurarak kurutma ticari boyutlarda uygulanabilmektedir. Diğer taraftan dondurarak kurutulmuş ürünlerin aroma ve beslenme değerleri oldukça yüksek düzeyde korunmaktadır.

Dondurularak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde bünyesine su alarak (rehidratasyon) kurutma öncesi yapısına yeniden kavuşur. Sıcaklığın düşürülmesiyle, mikroorganizmaların ve bakterilerin oluşumunu düşürülerek, gıda maddesinin bozulması önlenir. Ürün içinde bulunan suyun kristalizasyonu, sistemde bulunan suyun miktarının azalması, mikrobiyal gelişmeyi veya bakteri oluşumunu önler.

Dondurarak kurutmanın avantajlarından biri de sıcaklığın çok düşük olması, bağıl nemin düşük olması, lokal olarak su kaybının çok hızlı olması diğer geleneksel kurutma yöntemlerine göre enzimatik reaksiyonları ve proteinlerin bozulmasını en aza indirilmesidir. Ayrıca kurutulacak materyal soğukta saklamaya gerek kalmadan oda sıcaklığında saklanabilir [71,87,125].

BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOT

6.1. MATERYAL

6.1.1. Safran Çiçeği (*Crocus Sativus L.*)

Safran çiçeği, Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, sonbaharda çiçek açan, 20-30 cm boyunda çiğdeme benzer eflatun ve mor çiçekleri olan soğanlı bir kültür bitkisidir [145].



Şekil 6.1. Safran çiçeği.

Kısır olmaları nedeniyle safran bitkisinin mor çiçekleri üretken tohum üretmez ve çiçeğin üremesi insana bağlı kalır. Toprak altında kalan ve üreme organı görevini yapan soğanlar toprak kazılarak çıkartılır, bölünerek ayrılır ve tekrar dikilir. Soğan yalnızca bir mevsim yaşar, bölünerek yaklaşık on tane soğancık üretir ve bu soğancıklardan yeni bitkiler ürer.

Soğanlar yaklaşık 4.5 cm çapında küçük kahverengi yumrulardır ve sık bir hasır şeklinde paralel lifçiklerden oluşmaktadır [145]. Bir yaz uykusu geçirdikten sonra topraktan, 40 cm 'ye kadar büyüyen, beş ila onbir adet dar ve dik yeşil yaprak çıkar. Sonbaharda mor tomurcuklar kendini gösterir. Bitkinin taç yaprakları şeritimsi mor renklidir ve çiçek üç tepeciklidir [146,147].

Safran kelimesi Arapça sarı renk anlamına gelen asfar kelimesinden türetilen ve Arapça'da safran baharatı anlamına gelen za'feran kelimesinden kaynaklanarak, Fransızcaya safran ve oradan da İngilizceye saffron olarak aktarılmıştır [148]. Safran eski zamanlarda bazı hastalıkların tedavisinde ilaç olarak kullanılmasıyla yaygınlaşmıştır [149].

Safran kullanılması, çiçekte bulunan ve stigma olarak adlandırılan tepeciklerin taç yapraklardan ayrılması ve daha sonra bu tepeciklerin geleneksel yöntemlerle, güneşte kurutulmasıyla elde edilen baharatla sağlanır. Ağırlığına göre dünyanın en pahalı baharatı, (bir gramı 5 ile 6 € arası) olarak gösterilen safran dünya çapında yaklaşık 190 ton üretilmektedir [148,150-152].

Bu bitki içerdiği maddeler ve özellikle kansere karşı kullanımından dolayı değer kazanmıştır [146]. Böyle değerli olmasından dolayı "kırmızı altın" olarak adlandırılır [150,152]. Dünyanın en değerli baharatlarından biri olan safran, Irak, Hindistan, İspanya, Yunanistan, Meksika ve İtalya'da yetiştirildiği gibi ülkemizde de Safranbolu'da yetiştirilmektedir. Safranbolu'da Davutova köyünde yetiştirilen safran çiçekleri ekim ayının son haftası ile kasım ayının ilk haftası arasında çiçek vermeye başlar [153].

Safran çiçeğini değerli kılan, başlıca üç önemli etken maddeye sahip olmasıdır. Bu etken maddeler; krosin, pikrokrosin ve safranaldır [154]. Krosin, kendi ağırlığının 100.000 katı suyu sarı renge boyayabilen, altın sarısı rengi veren etken maddedir. Aynı zamanda içine konduğu yemeklere sarı bir renk vermektedir. Bununla birlikte güçlü renklendirme özelliğinden dolayı ipek, yün ve saç boyası olarak ta kullanılmaktadır [146,149]. Pikrokrosin, tat veren maddedir. Özellikle yemeklerde kullanıldığında yemeğe lezzet katar [146]. Safranaldır, çiçeğe koku veren etken

maddedir. Çiçeğin aromasıdır. Safranın kokusu bazen deniz havasına benzetildiği de literatürlerde vurgulanmaktadır [155].

6.1.2. Ölçüm Cihazları

6.1.2.1. Freeze Drying Cihazı

Dondurarak kurutma cihazı olarak Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde’de Kimya mühendisliği bölümünde proje kapsamında alınmış Liyofilizatör cihazı kullanılmıştır. Yapılan tez çalışması, bu dondurarak kurutma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın yaklaşık fiyatı 150.000 \$ değerindedir.

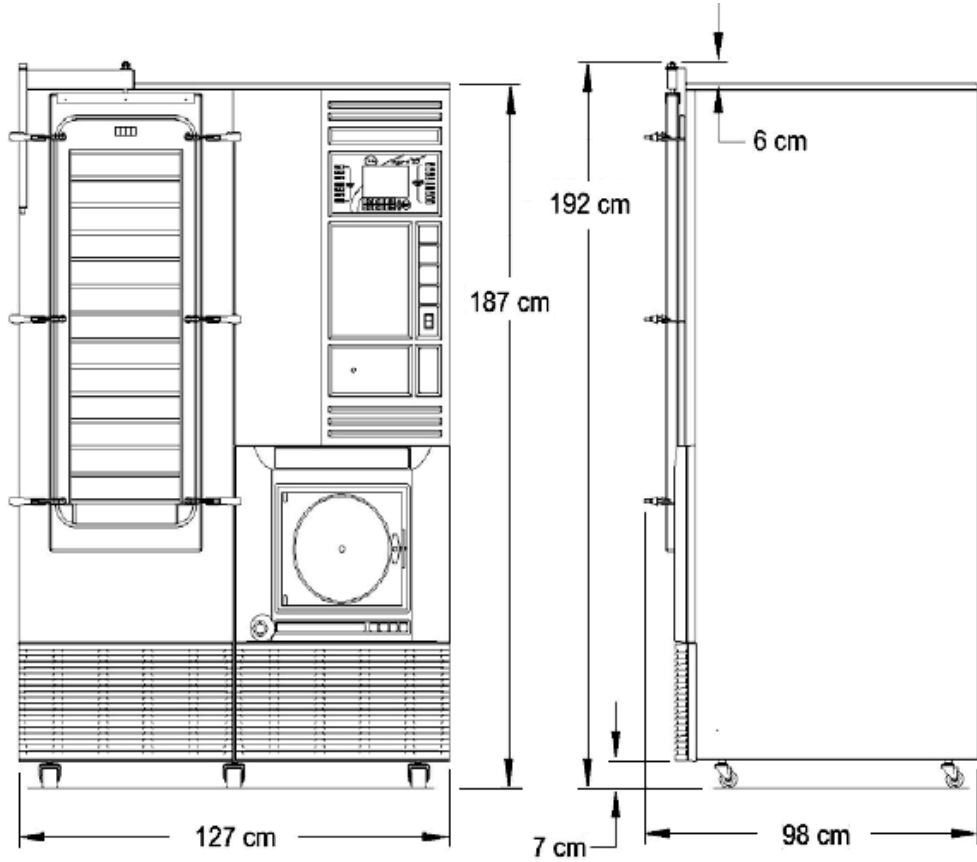


Şekil 6.2. Dondurarak kurutma cihazı.

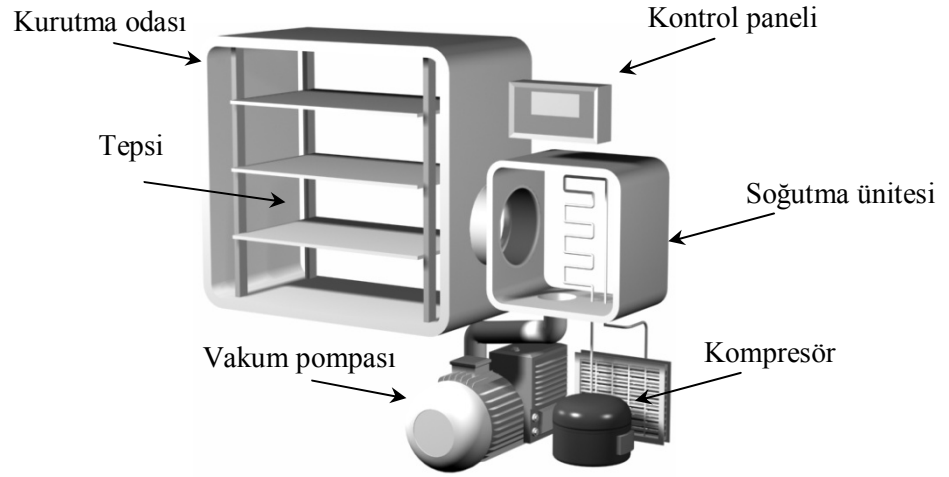
Deneyde kullanılan cihaz, Şekil 6.2’de görülen VirTis Ultra 25L marka dondurarak kurutma cihazıdır. Cihazın boyutları Şekil 6.3’de, şematik görünüşü ise Şekil 6.4’te verilmiştir. Cihaz ile ilgili özellikler aşağıda sunulmaktadır.

Cihaz özellikleri

1. Raf sıcaklık kontrol aralığı (°C)	-40 ile 60
2. En düşük raf sıcaklığı (50Hz/60Hz, °C)	-57 / -60
3. En düşük kondenser sıcaklığı (50Hz/60Hz, °C)	-67 / -70
4. Max. kondenser kapasitesi (L)	25
5. Kurutma odası basıncı (Pa)	50
6. Kondenser yüzey alanı (cm ²)	3264
7. 24 Saatte max. buz dondurma kapasitesi (L)	12
8. Kompresör sayısı	1
9. Kompresör gücü (KW)	1.12
10. Soğutucu akışkan	R245fa / R508B
11. Vakum zamanı (dakikada)	≤ 30
12. En düşük vakum sistemi (mT)	≤ 15



Şekil 6.3. Dondurarak kurutma cihazının boyutları.



Şekil 6.4. Dondurarak kurutma cihazının şematik görünüşü.

6.1.2.2. Hassas Terazi

Deneyde kullanılan numunelerin ağırlıklarını ve kurutma işlemi esnasında sürekli ağırlık değişimini ölçmek için METTLER TOLEDO MS303S marka hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 6.5). Bu terazi ile ilgili teknik özellikler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.5. Mettler Toledo marka hassas terazi.

Cihaz özellikleri

- | | |
|----------------------------|---------|
| 1. Max. kapasite | 320 g |
| 2. Okunaklık | 0.001 g |
| 3. Tekrarlanabilirlik (sd) | 0.001 g |

4. Doğrusallık	0.002 g
5. Sabitleşme zamanı	1.5 s
6. IP Koruma	IP54
7. Muhafaza alanı yüksekliği	165 mm
8. Tartı alanı boyutları	127x127 mm
9. Terazi boyutu UxGxY	347x204x280 mm

6.1.2.3. Etüv

Etüv, içinde belirli bir sıcaklık elde edilerek kurutma, mikrop üretme ve dezenfekte veya sterilizasyon gibi amaçlar için kullanılan cihazdır. Etüv cihazı iki kat sacdan yapılmış olup, hava geçirmez kapağa sahiptir. Kurutma ve nem alma gibi fizikî işlemlerin yanı sıra bazı kimyevi reaksiyonlar için gerekli yüksek sıcaklık derecelerini elde etmek için de etüvlerden faydalanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında etüvün kullanım amacı, ürünün belirli aralıklarla nemini alarak tam kuru ağırlığını belirlemektir. Kullanılan etüv Şekil 6.6'da gösterilen BINDER marka KB53 serisi olup teknik özellikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.6. Binder marka etüv.

Cihaz özellikleri

1. Elektronik kontrollü ön ısıtma kabin teknolojisi.
2. Sıcaklık ayar aralığı -10 °C ile 100 °C arası.
3. Gerçek zamanlı haftalık programlama için zaman ayar fonksiyonlu.
4. 1 C doğrulukla dijital sıcaklık ayarlaması
5. Program editörü yardımıyla ayarlanabilir rampa fonksiyonları
6. Ayarlanabilir fan hızı (0-100%)
7. Kalan süre göstergeli
8. Bağımsız ayarlanabilen sıcaklık emniyet sistemi, sesli ve ışıklı alarm sistemli
9. Bir iç cam kapılı
10. APT-Com Data Kontrol sistemine bağlantıyı sağlayan opsiyonel RS422 çıkışı ya da yazıcıya bağlanabilmesi için RS232 çıkışı

6.1.2.4. Desikatör

Tabanında kalsiyum klorür (CaCl_2) vb. nem çekici (desikant) bir madde serili olduğu için nem oranı çok düşük ve ağız sıkı kapatılabilen özel kaplara "desikatör" denir. Desikatörler, normal desikatör ve vakum desikatörü olmak üzere iki ana türü bulunur. Desikatörlerdeki nemsiz kuru ortamın sürekliliğini sağlamak için, dibindeki nem çekici (desikant) maddenin belirli aralıklarla değiştirilmesi gereklidir. Bu amaçla desikatöre yeni ve taze bir miktar desikant ilave edilebilir veya kullanılan desikant ısıtılarak neminden arındırılır. Desikatörler hem nemli maddelerin kurutulmaları hem de kurutulmuş kimyasalların güven içinde nemden uzak saklanmaları amacı ile kullanılmaktadır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Desikatör.

6.2. METOT

6.2.1. Safran Çiçeğinin Temini

Safran çiçekleri ülkemizde Karabük İli ne bağlı Safranbolu ilçesine 22 km'lik mesafede olan Davutova köyünde yetiştirilmektedir. Çiçek soğanları yaklaşık bir yıl toprakta bekledikten sonra Ekim ayının son haftası ve Kasım ayının ilk haftaları çiçek vermektedir. Deneyleerin gerçekleştirilmesi için çiçeklerin yoğun olarak çıktığı, Kasım ayının ilk haftası sabah güneş doğmaya yakın zamanda, safran yetiştiricili ile uğraşan köylülerden toplam dört kişilik bir gurupla çiçekler toplanmaya başlanmıştır. Sabah güneş doğmadan çiçeklerin toplanmasının nedeni o saatlerde henüz çiçeğın taç yapraklarını açmaması ve bu sebeple çiçeğın polenleri arı veya buna benzer uçucu hayvanlarca etrafa taşınmayarak aromasını bünyesinde muhafaza etmesidir. Şekil 6.8'de güneş doğduktan sonra safran çiçeklerinin taç yapraklarını açmış görünümü mevcuttur.



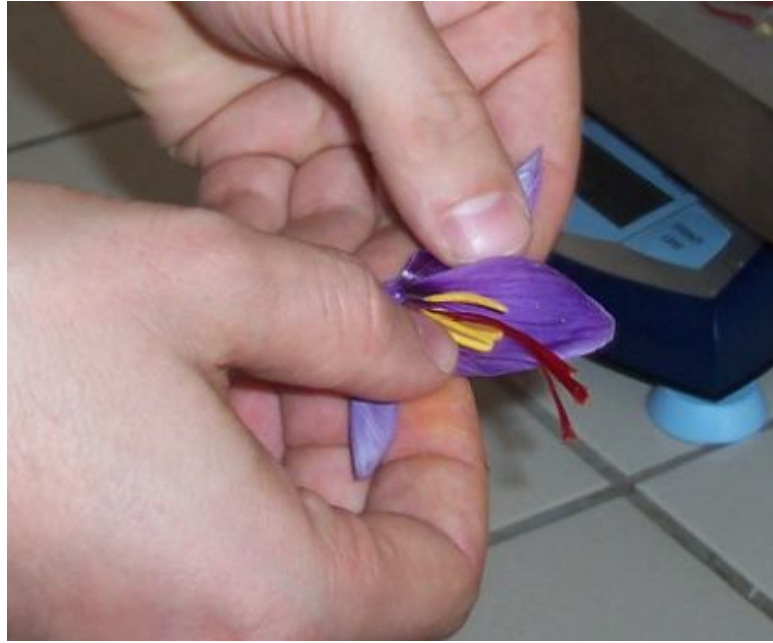
Şekil 6.8. Safran çiçeğinin açmış hali.

Yaklaşık 950 çiçek toplandıktan sonra içerisi folyo döşeli hava geçirmez kapalı bir kaba konarak, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği

Laboratuvarlarına götürülmüştür. Çiçeklerin toplandıktan yaklaşık 8 saat sonra dondurarak kurutma deneyi yapılması için, laboratuvarda hazırlıklar başlamıştır.

6.2.2. Safran Çiçeğinin Dondurarak Kurutulmaya Hazırlanması

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Laboratuvarlarına getirilen çiçeklerin, öncelikle içerisinde bulunan sarı ve kırmızı renkli Stigma denilen tepecikleri ile taç yaprakları ayırt edilmiştir. Deneyleri gerçekleştirmek için gerekli olan, aynı zamanda safran baharatı olarak ta kullanılan asıl kısım, çiçeklerin stigmaları yani erkek ve dişi organları olan tepeciklerdir. Şekil 6.9'da çiçeklerin taç yapraklarından ayrılması ve hassas terazide tartılması gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Çiçeklerin taç yapraklarından ayrılması.

Şekil 6.10'da gösterildiği gibi ayrılmış olan çiçekler daha sonra Mettler Toledo marka hassas terazide tartılarak alınan ağırlık bilgileri kaydedilmiştir. Tartılan çiçekler, Şekil 6.11'de görüldüğü gibi dondurarak kurutma cihazının tepsisine seyrek aralıklarla serilmiştir.



Şekil 6.10. Ayrılmış çiçeklerin tepsiye serilmesi.



Şekil 6.11. Çiçeklerin tepside seyrek aralılarla dağıtılması.

6.2.3. Safran Çiçeğinin Dondurarak Kurutulması

Safran çiçeğinin dondurarak kurutma işlemi için VirTis Ultra marka dondurarak kurutma cihazı kullanılmıştır. Önceden hazırlanan ve tepsiye serilen safran çiçekleri, cihaz içerisine terleştirilerek kapak kapatılmıştır. Daha sonra Şekil 6.12’de gösterildiği gibi cihaz üzerinde bulunan Setup panelinden kurutma odası basıncı, kurutma odası sıcaklığı ve sıcaklığın zamana göre değişimi ayarlanarak cihaz çalıştırılmıştır.



Şekil 6.12. Cihazın üzerinde bulunan Setup paneli.

Deney için setup panelinden yapılan ayarlar aşağıda gösterilmektedir.

Kurutma Odası Basıncı 0.1 kPa

Dondurma Evresi

-35 °C120 dk

Kurutma Evresi

-30 °C120 dk

-20 °C120 dk

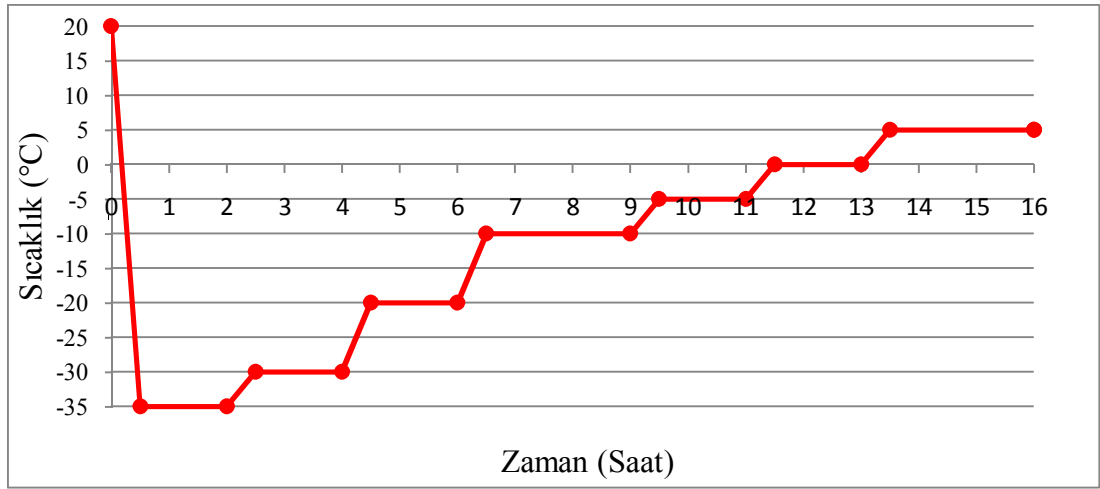
-10 °C180 dk

-5 °C120 dk

0 °C120 dk

5 °C180 dk

Yapılan dondurarak kurutma sonucu zamana bağılı sıcaklık değişimini gösteren grafik Şekil 6.13’de verilmiştir. Bu grafikten anlaşıldığı gibi 0.1 kPa olan kurutma odası basıncı sabit tutularak ilk 120 dk -35°C’de dondurma evresi gerçekleştirilmektedir. Cihaz içinde 120 dk sonrası donmuş olan ürüne, daha önce ayarlanmış olan zamana göre sıcaklık miktarı, artarak ürün içerisinde bulunan ve donma sonucu kristalleşen su, süblimasyon olayı ile buharlaşarak üründen uzaklaştırılır. Toplam 16 saatlik süre sonunda safran çiçeğinin dondurarak kurutulması gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 6.13. Zamana bağılı sıcaklık değişimi.

6.2.4. Safran Çiçeğinin Güneşte Kurutulması

Dondurarak kurutmanın yanı sıra güneşte kurutma işlemi de gerçekleştirilmiştir. Güneşte kurutma, Safranbolu’da Davutlar köyünde geleneksel bir şekilde yapılan kurutma türüdür. Günümüzde dünyadaki safran üreticilerinin yaptığı kurutma geleneksel güneşte kurutmadır. Güneşte kurutma deneyi için toplanan ve taç yapraklarından ayrılan çiçekler, temiz bir örtüye serilerek güneş karşısına konulmuştur. Ortam sıcaklığının ortalama 18°C olduğu bir günde güneş karşısında toplam 10 saat kalan çiçekler akşam saatlerinde toplanmıştır. Bu şekilde güneşte kurutma gerçekleştirilmiştir.

6.2.5. Kurutulmuş Safran Numunelerinin Analizi

Yapılan deneylerde geleneksel güneşte kurutma ve dondurarak kurutmadan 1000 mg olmak üzere 4'er adet numune oluşturulup toplam 8 adet numune analize hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. Dondurarak kurutma ve güneşte kurutma numuneleri.

Şekil 6.15’de DK ile gösterilen numuneler dondurarak kurutulan numunelerdir. GK ile gösterilenler ise güneşte kurutulan numunelerdir. Bu numuneler gözle görünür bir fark sergilemektedir. Dondurarak kurutulan safran çiçekleri çok daha taze ve renkli bir görünüm sergilerken güneşte kurutulan safran çiçeklerinin renkleri solmuş ve canlılığını kaybetmiş bir şekildedir. Genelde görünüm önemli bir ölçüt olsa da, çiçeğin kimyasındaki fark çok daha önemlidir. Özellikle öncelikli beklenti Safranal ve Krosin değerleridir. Dondurarak kurutmadaki bu değerlerin güneşte geleneksel yöntemle kurutmaya göre daha yüksek çıkması beklentileri karşılamaktadır.



Şekil 6.15. GK.ve DK. numunelerinin görünüşü.

Elde edilen numunelerin analizlerini gerçekleştirmek için TÜBİTAK ATAL (Ankara Test ve Analiz Laboratuvarı)'da bulunan HPLC (High performance liquid chromatography) Cihazında analize gönderilmiştir. Yüksek Basınç Sıvı Kromatografi (HPLC) bir ayırma tekniğidir. Bir sıvıda çözülmüş ayrılacak bileşenler, bir kolon içerisinde bulunan genellikle katı bir destek üzerindeki sabit faz ile farklı etkileşimlere girerek, kolon içinde değişik hızlarda ilerler. Kolonu değişik zamanlarda terk ederler ve böylece birbirlerinden ayrılırlar. Burada taşıyıcı faz olan sıvı, pompalarla kolona basıldığından yüksek akış hızındadır. Bu nedenle ayırma daha kısa sürede ve tam olarak gerçekleşmektedir. Ayrılan bileşik, kolon çıkışına bağlanan uygun bir dedektörle tesbit edilip miktarıyla orantılı olarak kaydedilir. Yüksek hızda gerçekleştirilen ayırmaların yapıldığı sıvı kromatografi sistemlerine, Yüksek Basınç Sıvı Kromatografi (HPLC) denir. HPLC analizi, yapılan deney numuneleri arasındaki farkı ortaya koyabilen en gelişmiş analiz sistemidir.

Analizle için safranal ve krosin için sıvı standartları gerekmektedir. Bu standartlar Türkiye de bulunmadığından dolayı Amerika da SIGMA-ALDRICH firmasıyla iletişime geçilmiş olup firmanın Türkiyede ki tek disbitörü olan İNTERLAB Laboratuar Ürünleri San. ve Tic. A.Ş. vasıtası ile safranal ve krosin standartları yurtdışından getirilmiş ve analizler için TÜBİTAK ATAL'a gönderilmiştir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Krosin ve safranal standardı.

Analizler yapılmadan önce HPLC cihazı üzerinde uygulanan bazı bilgiler ve kalibrasyon çözelti miktarları aşağıda sunulmaktadır.

Kolon : Luna 5 μ C18 (4.6x250 mm)

Akış Hızı : 0.5 ml/dk

Kolon Sıcaklığı : 30 $^{\circ}$ C

Dedektör : UV

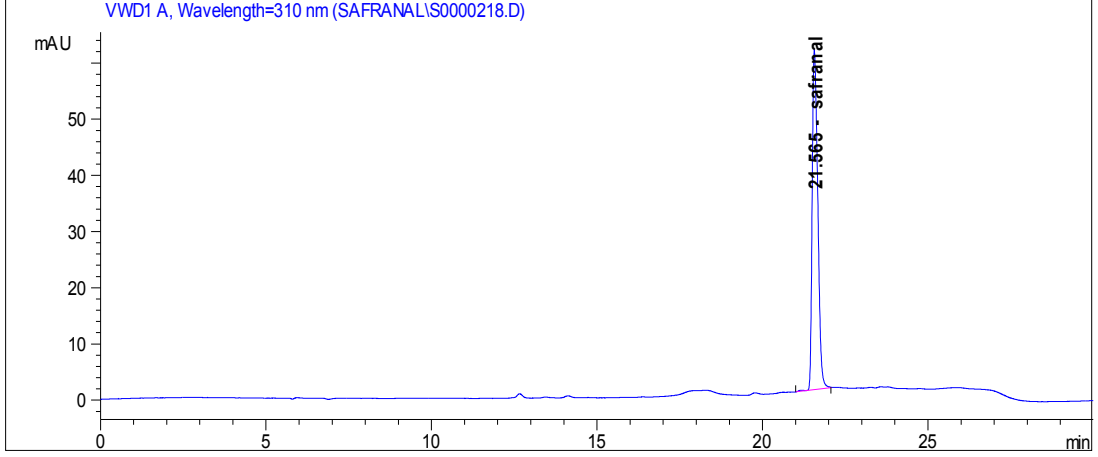
Dalga Boyu : Safranal 310 nm

Krosin 440 nm

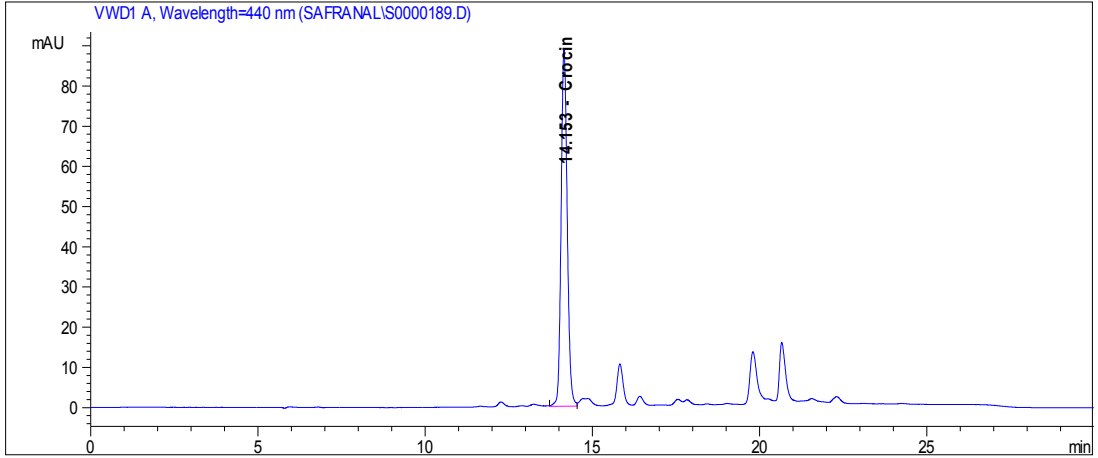
Enjeksiyon Hacmi : 20.0 μ L

Kalibrasyon Çözeltileri: Krosin için 5-100 μ g/mL, Safranal için de 0.2-10 μ g/mL konsantrasyon aralığında kalibrasyon çözeltileri hazırlanmıştır.

Daha sonra cihaza Safranal ve Krosin standartları tanıtılarak bir kromotogram oluşturulmuştur. Safranal ve Krosin kromotogramları aşağıda verilmiştir (Şekil 6.17).



a) 5 µg/mL safranal standart kromatogramı.

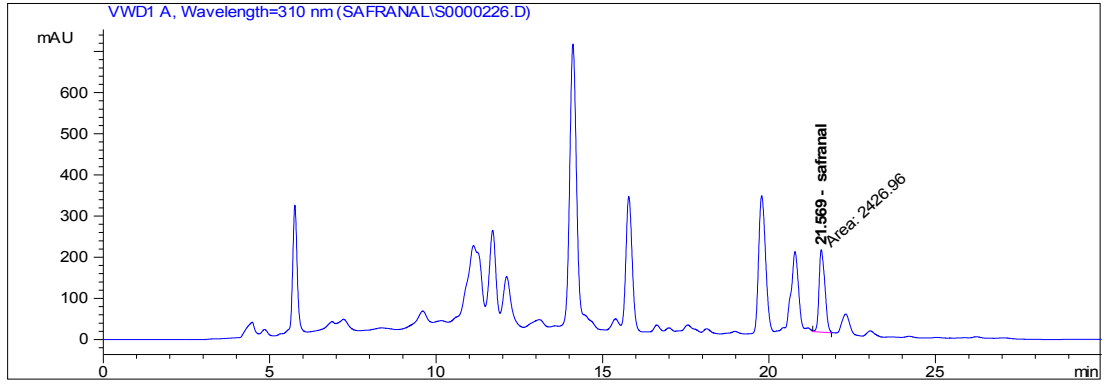


b) 5 µg/mL krosin standart kromatogramı.

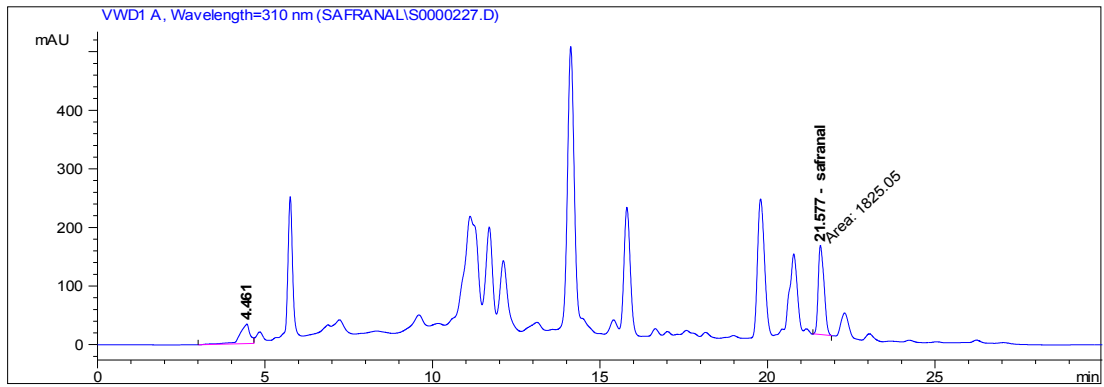
Şekil 6.17. 5 µg/mL safranal ve krosin standart kromatogramı.

Safran çiçeği her iki kurutma sonundaki numunelerinin HPLC cihazında analizleri yapılmış olup, yapılan bu analizlerin sonuçları aşağıda grafikler şeklinde sunulmaktadır (Şekil 6.18). Bu grafiklerde her bir numune için pik noktaları gösterilmektedir.

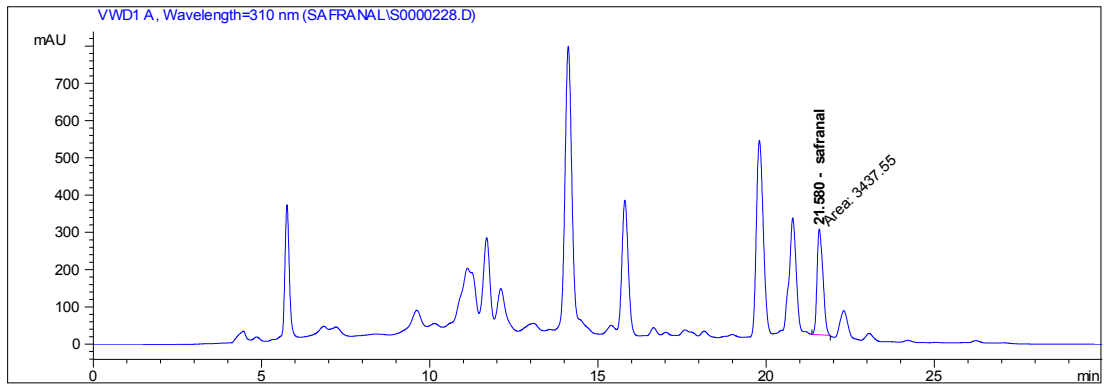
Safranal ile krosin için dondurarak kurutulan ve güneşte kurutulan numunelerin kromatogramları aşağıda verilmiştir.



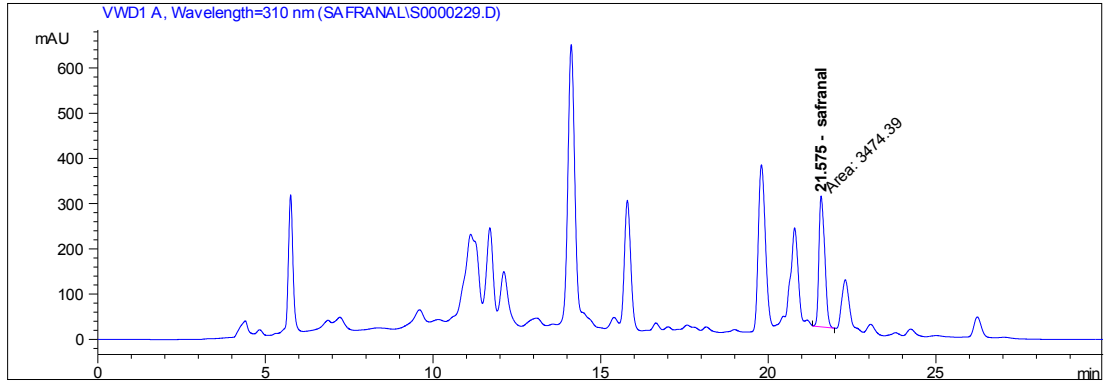
a) DK-1 Kodlu numune.



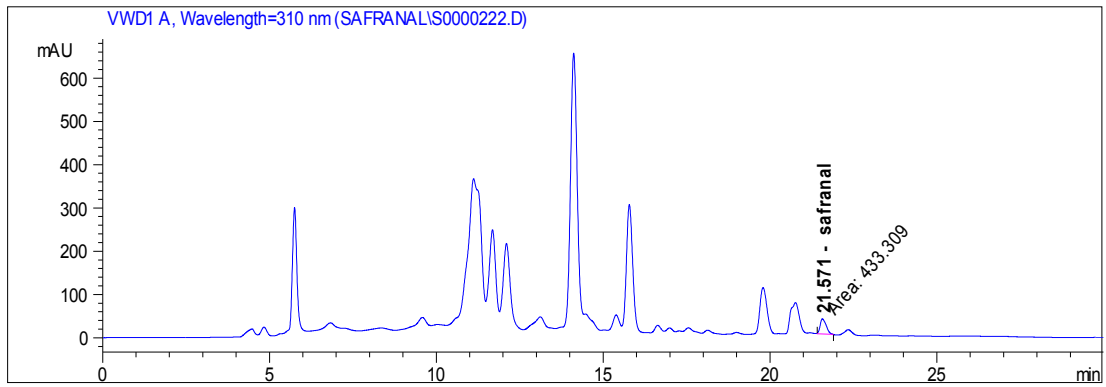
b) DK-2 Kodlu numune.



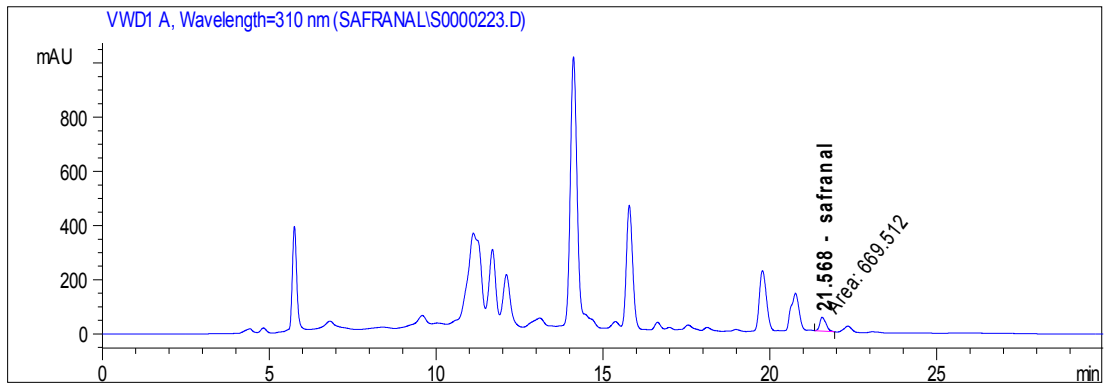
c) DK-3 Kodlu numune.



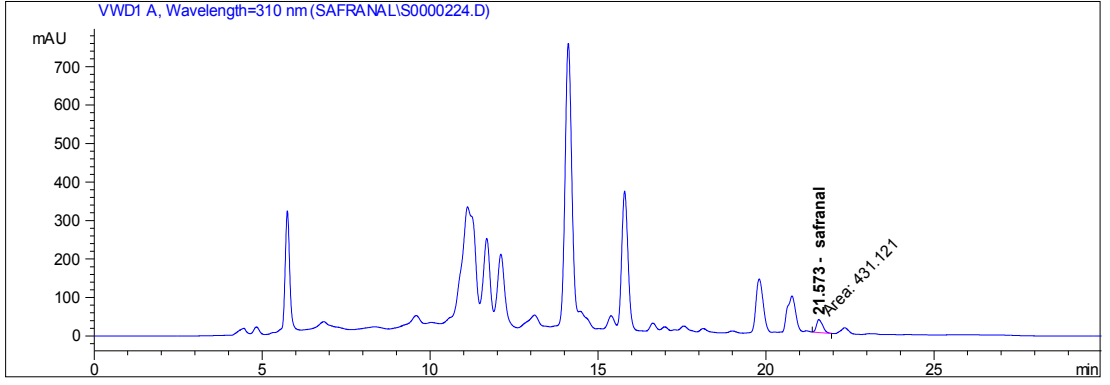
d) DK-4 Kodlu numune.



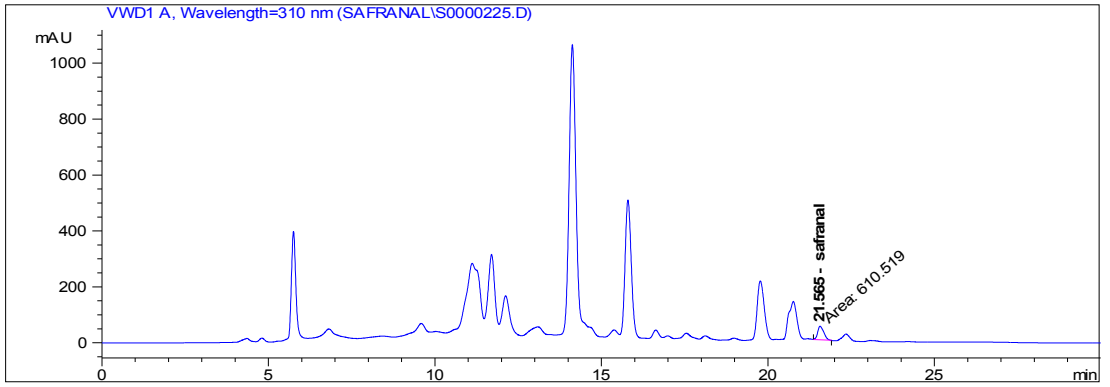
d) GK-1 Kodlu numune.



e) GK-2 Kodlu numune.

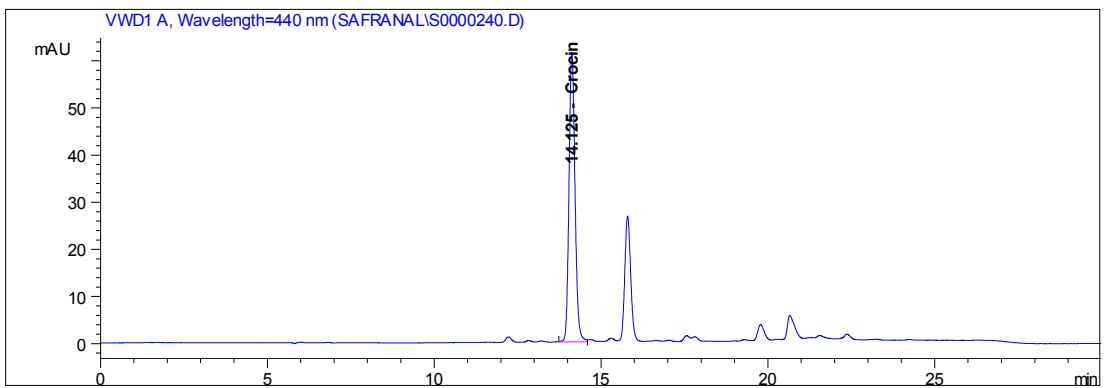


f) GK-3 Kodlu numune.

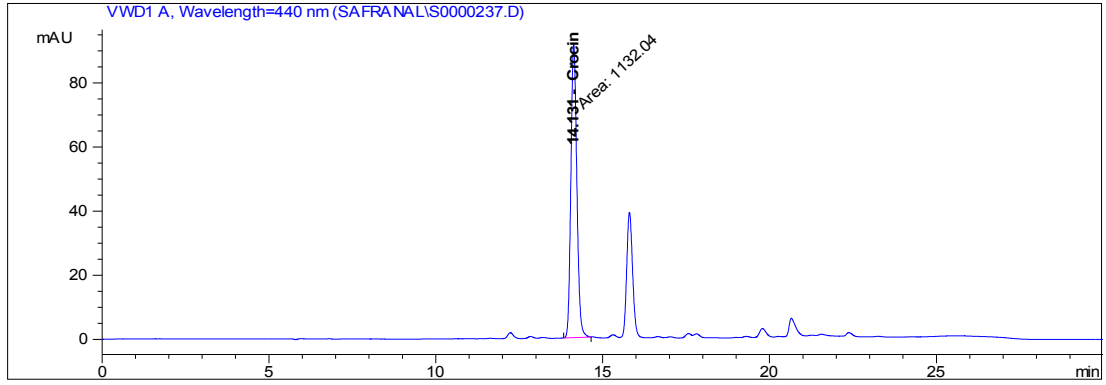


g) GK-4 Kodlu numune.

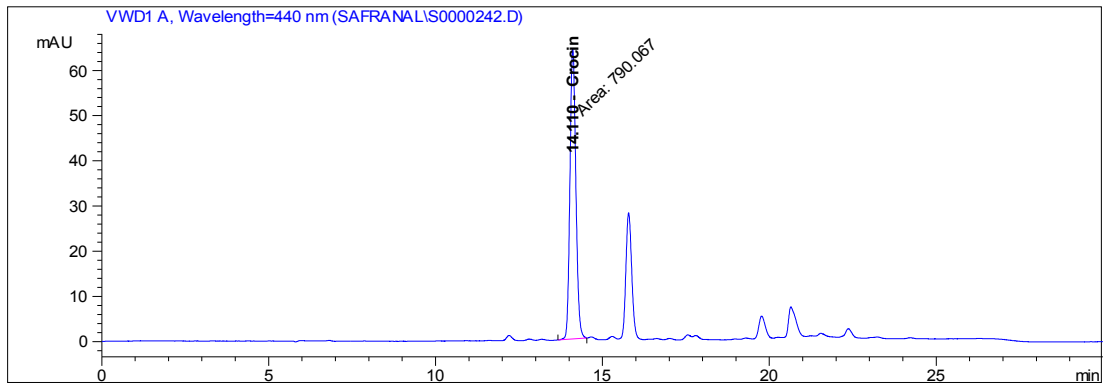
Şekil 6.18. Safranal için DK ve GK numunelerinin kromotogramları.



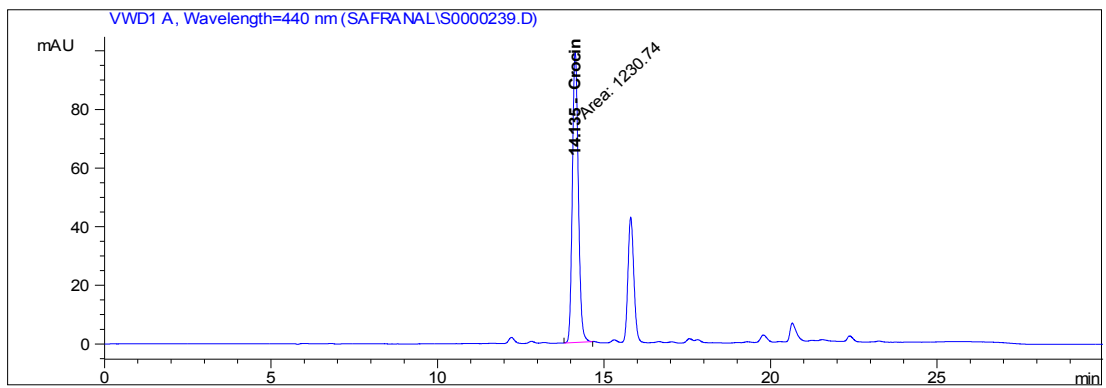
a) DK-1 Kodlu numune.



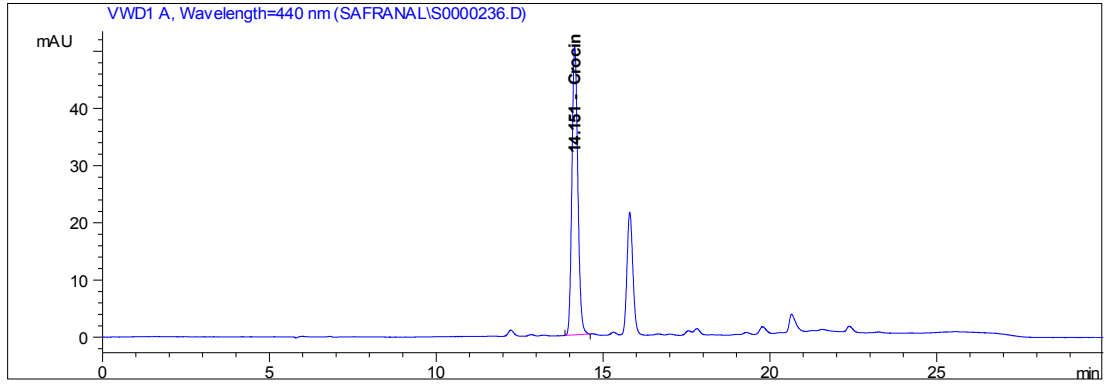
b) DK-2 Kodlu numune.



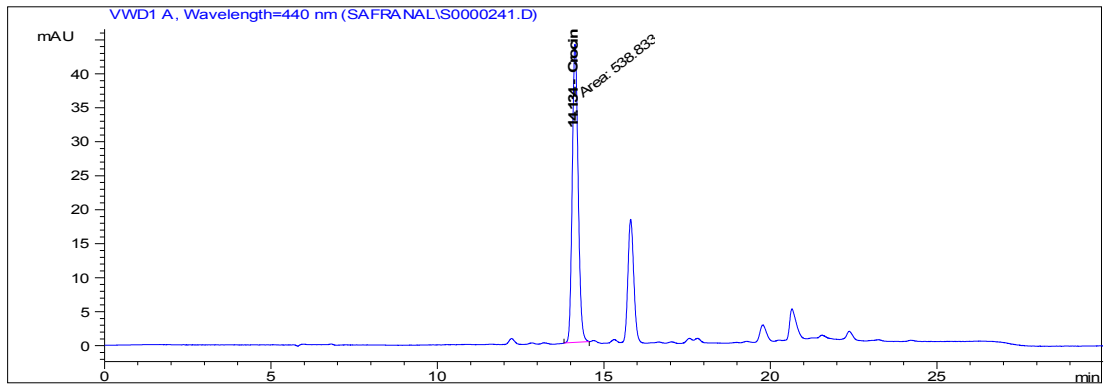
c) DK-3 Kodlu numune.



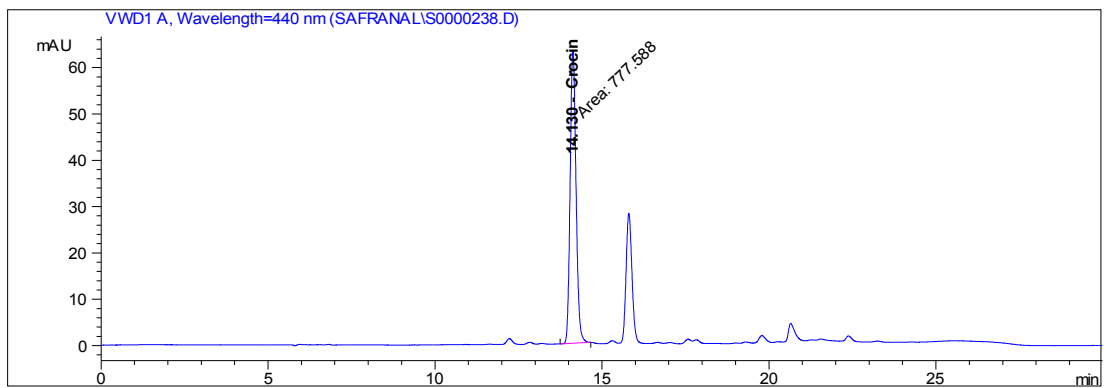
d) DK-4 Kodlu numune.



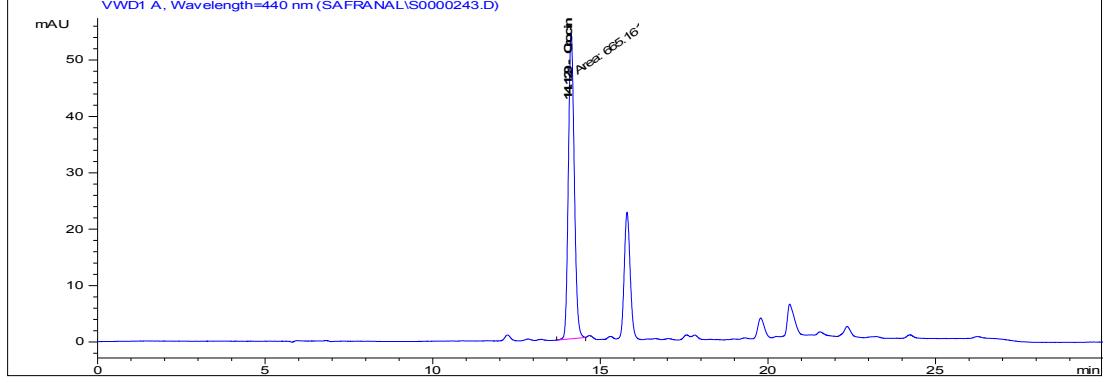
d) GK-1 Kodlu numune.



e) GK-2 Kodlu numune.



f) GK-3 Kodlu numune.



g) GK-4 Kodlu numune.

Şekil 6.19. Krosin için DK ve GK numunelerinin kromotogramları.

6.2.6. Safran Çiçeğinin Tam Kuru Ağırlığının Belirlenmesi

Safran çiçeğinin, dondurarak kurutma sonunda kurutma nem oranı ve kurutma sabitlerini hesaplanmasında gerekli olan tam kuru ağırlığının belirlenmesi için öncelikle safran çiçekleri taç yapraklardan ayrılır ve deney için hazır hale getirilir.

Hazırlanan safran, çapı 100 mm yüksekliği 15 mm olan camdan yapılmış silindir şeklindeki petri kabı içerisine 1000 mg konular ve daha sonra 105°C olarak ayarlanmış etüve yerleştirilir. Burada ürün 1 saat bekletildikten sonra desikatöre konularak 15 dk bekletilir. Desikatörde bulunan silikajeller vasıtasıyla nem alma sürecinden sonra ürün hassas terazide tartılarak ağırlık kaybı kaydedilir. Kurutma periyotları süresince ağırlık değişimi her 6 saatte bir takip edilerek değerler kaydedilmiş ve en son iki ölçüm arasındaki fark % 1'den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ölçümler 0.001 g ölçme hassasiyetindeki Mettler Toledo marka dijital hassas terazi ile yapılmıştır. İki ölçüm arasındaki fark %1'den daha az olduğu durumda safran tam kuru kabul edilmiştir.

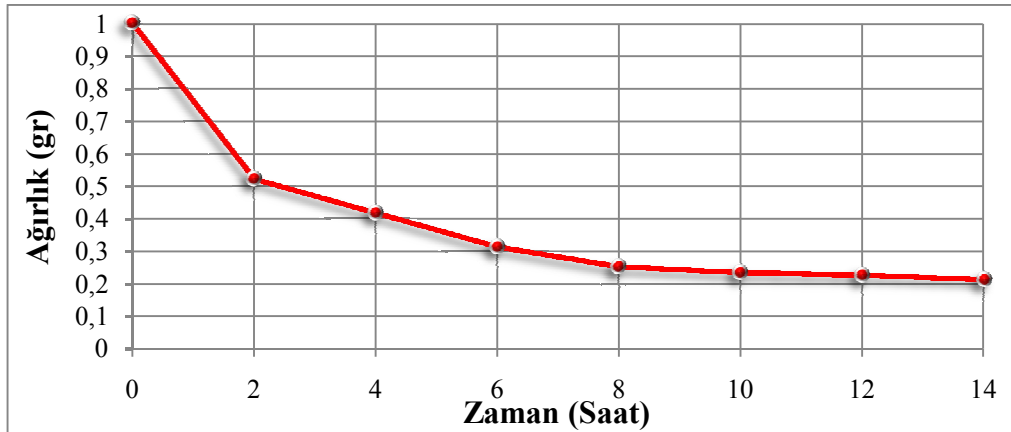
6.2.7. Safran Çiçeğinin Kurutma Esnasında Ağırlık Kaybı Belirlenmesi

Ağırlık kaybı belirlenmesinde, çiçekler petri kabına konularak 1000 mg olacak şekilde tartılır ve sonra cihaza konularak dondurma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.20).



Şekil 6.20. Petri kabına konulmuş 1000 mg safran çiçeği.

İlk 120 dk'lık süre içerisinde basınç 0.1 kPa'a düşürülüp, ürün ise -35°C ' ye kadar dondurularak bekletilmektedir. Bu sürede ürün içerisindeki su oranı buz kristalleri haline gelmesi sağlanmaktadır. Asıl kurutma yani süblimasyon olayı 120 dk sonra gerçekleştirilmektedir. Bu saatten sonra sıcaklık artışı uygulanarak ürün içerisindeki buz kristallerinin sıvı faza geçmeden buharlaşıp üründen uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Deneylemizdeki ağırlık kayıpları her iki saatte bir ölçülecek şekilde ayarlanmıştır. Bu işlem için ilk ürün cihaza 1000 mg olarak konulmuş, 4 saat sonra cihazdan alınarak tartılıp ağırlığı kaydedilmiştir. Aynı işlem başka bir ürünle yine 1000 mg olacak şekilde tekrar uygulanıp bu sefer 6 saat sonraki ağırlık kaybı kaydedilmiştir. Bu işlemler 4, 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 saat şeklinde uygulanarak ilk 2 saatten sonraki zaman bağı ağırlık kaybı grafiği Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.21. Zamana bağı ağırlık kaybı grafiği.

Her bir ürün cihazdan alınıp ağırlık kayıpları kaydedildikten sonra Şekil 6.22’de görüldüğü gibi kağıtlar üzerine serilmiştir.



Şekil 6.22. Ağırlık kaybı kaydedilen ürünler

6.2.8. Kurutma Nem Oranı Ve Kurutma Sabitlerinin Belirlenmesi

Teorik modeller her türlü madde ve koşul için uygulanabilmektedir. Ancak çözümü için gereken eşitliklerin birçok parametre ve karmaşık yapı içermesi bu tür modellerin kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Yarı teorik modeller daha az karmaşık olmakla birlikte içerdikleri parametrelerin yalnızca ele alınan ürünlerle ilgili olması, kullanımını kısıtlamaktadır.

Deneysel yollarla elde edilen verilere dayanarak kuruma hızının belirlenmesinde, karmaşık matematiksel eşitlikler yoktur. Ancak elde edilen eşitlikler deneme yapılan numune ve deney koşulları için geçerli olmaktadır. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulunan eşitlik “logaritmik kurutma” denklemi olarak bilinmektedir [108].

Boyutsuz bir terim olan nem oranının (MR) zamanla (t) değişimi aşağıda verilen eşitlikle belirlenebilir.

$$MR = \frac{M_t - M_d}{M_0 - M_d} \quad (6.1)$$

Eşitlikte (M_0) başlangıç nemini, (M_t) t anındaki nemi, (M_d) ise denge nemini ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafında yer alan kısım, kurutmanın farklı t anlarındaki nem oranı (MR) değerlerini vermektedir. Çizelge 6.1’de nem oranını (MR) açıklamak için kullanılan modellerden bazıları verilmiştir [108].

Çizelge 6.1. Kuruma eğrilerini açıklamak için kullanılan Matematiksel Modeller

No	Model Adı	Model	Kaynak
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[156]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[157]
3	Geliştirilmiş Page	$MR = \exp[(-kt)^n]$	[158]
4	Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	[159]
5	Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	[160]
6	İki terimli	$MR = a \cdot \exp(-k_0t) + b \cdot \exp(-k_1t)$	[161]
7	İki terimli- eksponansiyel	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	[162]
8	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[163]
9	Difüzyon Yaklaşım	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[164]
10	Verma	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	[165]

Deneyssel olarak bulunan ve modeller ile tahmin edilen nem oranı değerleri arasındaki uyumu istatistiksel olarak açıklamak amacıyla tahminin standart hatası (RMSE), khi-kare (χ^2) değerleri ile modelin modelleme yeterliliği (R^2) aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunabilir.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{tahmini}} - MR_{\text{deneyssel}})^2 \right]^{1/2} \quad (6.2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{deneyssel}} - MR_{\text{tahmini}})^2}{N - z} \quad (6.3)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (MR_{\text{deneyssel,ort}} - MR_{\text{tahmin,ort}})^2}{\sum (MR_{\text{tahmin,ort}})^2} \right] \quad (6.4)$$

Burada;

- MR_{deneysel} : Deneysel verilerle belirlenen nem oranı,
 $MR_{\text{deneysel,ort}}$: Deneysel nem oran değerlerinin ortalaması,
 MR_{tahmini} : Tahmini nem oranı,
 $MR_{\text{tahmini,ort}}$: Tahmini nem oranı değerlerinin ortalaması,
 N : Deneysel veri sayısı,
 z : Kullanılan modeldeki katsayı sayısıdır.

Tahmini standart hata (RMSE), model ile elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerler arasındaki sapmayı göstermektedir. Ayrıca khi-kare (χ^2) değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir. Bunların yanında deneysel verileri açıklayan modelin modelleme yeterliliği (R^2) değerinin bire yakın olması modelin kullanılabilirliğinin bir göstergesidir [166]. İstatistiksel olarak yapılan değerlendirme sonuçlarına göre en uygun modelde bulunan katsayılar çoklu regresyon yöntemi ile belirlenir.

BÖLÜM 7

DENEY SONUÇLARI

Safran çiçeğinin hasat sonrası işlemden, taze stigmaları korumak için yapılacak en önemli işlem kurutmadır. Kurutma yöntemi, ticareti yapılan safranın kalite parametreleri (renk, aroma ve tat) üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Stigma olarak adlandırılan tepeciğın nemini azaltmak için, teknik ekipman bulunmasına bağılı olarak bölgeden bölgeye ve ülkeden ülkeye değışik kurutma yöntemleri kullanılmaktadır.

Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemi doğal güneş kurutmadır. İspanya ve İran'da geleneksel yöntemin yanı sıra ısıtılmış karanlık odalarda kurutma da yapılmaktadır. Yunanistan ve Türkiye'de ise geleneksel güneşte kurutma yöntemi kullanılmaktadır.

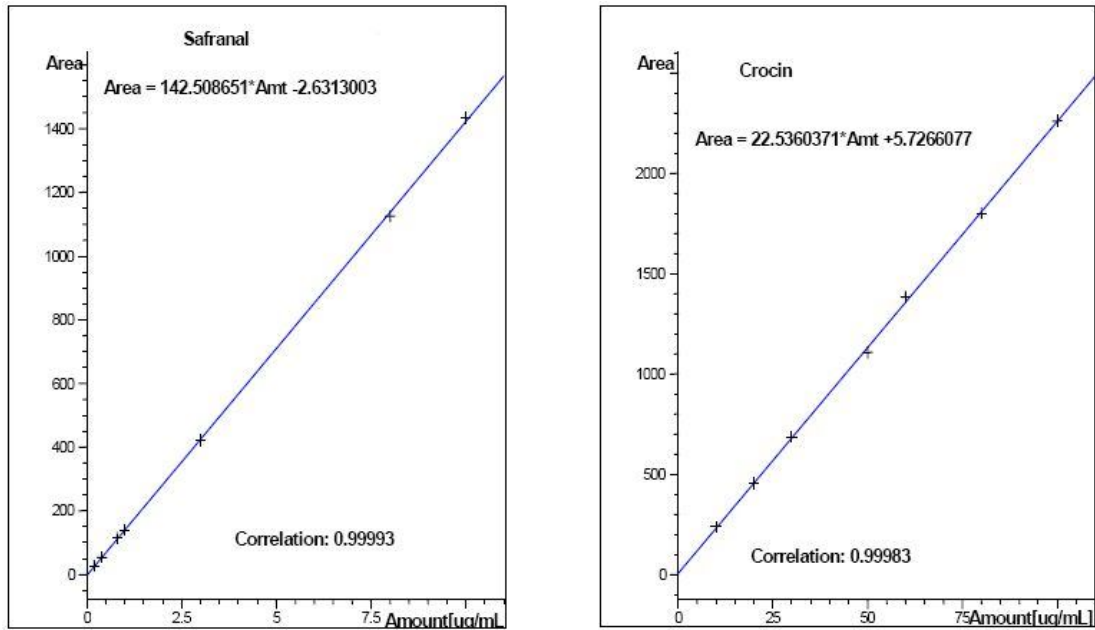
Yapılan deneyler neticesinde, ülkemizde sadece Safranbolu'da yetişen ve dünya çapında değerli olan safran çiçeğinin geleneksel güneşte kurutmanın yanı sıra dondurarak kurutması yapılmıştır. Burada dondurarak kurutulmuş safranın, geleneksel güneşte kurutma yöntemine göre kalitesi kıyaslanmıştır.

Dondurarak kurutma işlemi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliğı Laboratuvarında bulunan VirTis Ultra 25L Liyofilizatör cihazında yapılmıştır. Cihazın safran numunelerini kurutmadan önce üzerinde bulunan setup panelinde basınç ve zamana bağılı sıcaklık değışimi ayarları yapılmıştır. Bu ayarlara göre kurutma odası basıncı 0.1 kPa olarak sabit tutulup, ilk 120 dk -35°C de dondurma evresi, sonraki 120 dk -30°C de kurutma evresine geçilmiş ve daha sonra belirlenen zamanlarda istenilen sıcaklıklara çıkılmıştır. Bu sıcaklıklara çıkılması esnasında ürün içerisinde donarak kristalleşen su, ürün gözeneklerinden buharlaşarak üründen süblimasyonla uzaklaşmıştır.

Böylelikle kurutma odası basıncı minimumda tutularak, üründeki gözeneklerden su buharı kütlelerinin akışı sağlanmış olur. Daha sonra dondurarak kurutulan ürün, önceden, Karabük iline bağlı Safranbolu ilçesinin bir köyü olan ve safran yetiştiriciliği ile uğraşılan Davutova köyünde güneşte kurutulan safran çiçekleri ile kıyaslanması için her biri 1000 mg olacak şekilde 4 adet dondurarak kurutulmuş ve 4 adet güneşte kurutulmuş olan toplam 8 numune hazırlanmıştır.

Bu kıyaslamalar safran çiçeğinin içeriğinde bulunan ve safranın kalite standartlarını belirleyen, krosin ve safranalın her iki kurutma sonucundaki miktarıyla tespit edilmiştir.

Bu miktarları tayini HPLC (Yüksek Basıncı Sıvı Kromatografi) cihazı ile yapılmıştır. HPLC Agilent 1100 serisinde Luna C18, 4.6 mm x 250 mm, 5 µ kolona sahip cihazdır. Cihazda UV dedektör kullanılmıştır ve akış hızı 0.5 ml/dk'dır. HPLC'de analizleri yapabilmek için öncelikli olarak safranal ve krosin için çözeltiler hazırlanmıştır. Safranal için 0.2-10 µg/mL konsantrasyon aralığında kalibrasyon çözeltileri, krosin için ise 5-100 µg/mL konsantrasyon aralığında kalibrasyon çözeltileri hazırlanmıştır (Şekil 7.1).



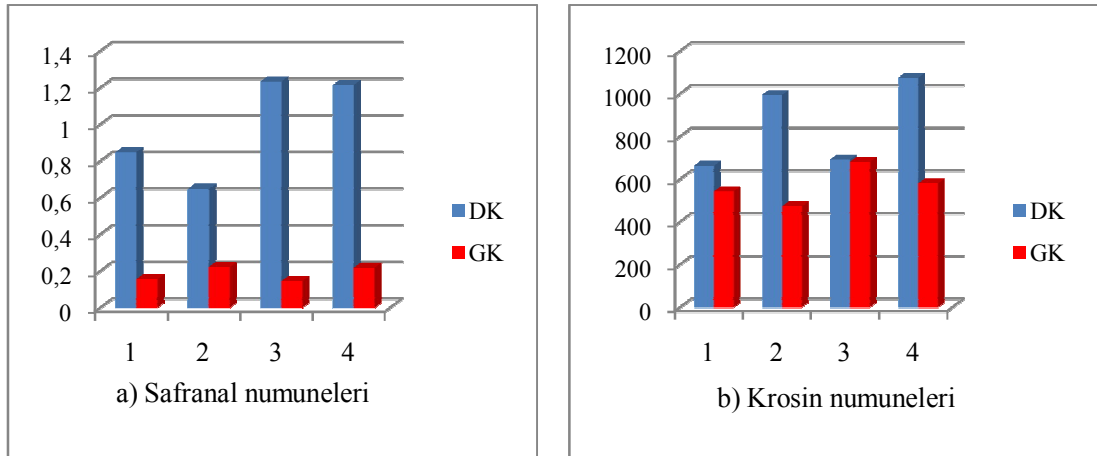
Şekil 7.1. Safranal ve krosin için hazırlanan kalibrasyon eğrileri.

Daha sonra yurtdışından getirilen safranal ve krosin standartları cihaza tanıtılmıştır. Safranal için 310 nm, krosin için 440 nm dalga boylarında ve 30°C kolon sıcaklığında HPLC cihazı hazırlanmış olup analizlere başlanmıştır. Analiz sonucunda çıkan değerler Çizelge 7.1’de verilmektedir.

Çizelge 7.1. Her iki kurutmaya sonucuna göre Safranal ve Krosin değerleri.

Numuneler	Safranal (mg/g)	Crocin (mg/g)
DK-1	0.848	663.6
DK-2	0.648	994.2
DK-3	1.234	692.8
DK-4	1.215	1075.4
GK-1	0.156	543.4
GK-2	0.221	473.8
GK-3	0.145	682.4
GK-4	0.217	580.3

Şekil 7.2’de gösterilen grafikler Çizelge 7.1’de verilen değerleri net bir şekilde anlatmaktadır.



Şekil 7.2. Safranal ve krosin numunelerinin analiz grafiği.

Şekil 7.2’de görüldüğü gibi dondurarak kurutulan numunelerin safranal miktarı güneşte kurutulan numunelerin safranal miktarından 5 kat daha fazladır. Dondurarak

kurutulmuş numunelerdeki krosin miktarı ise güneşte kurutulan numunelerdeki krosin miktarından %40 daha fazladır. Safranın kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan olan safranal ve crosin miktarları, yapılan deney sonuçlarına göre dondurarak kurutmada, geleneksel güneşte kurutmaya göre yüksek miktarda çıkmıştır. Böylelikle dondurarak kuruma kaliteli sonuçlar ortaya koymuştur.

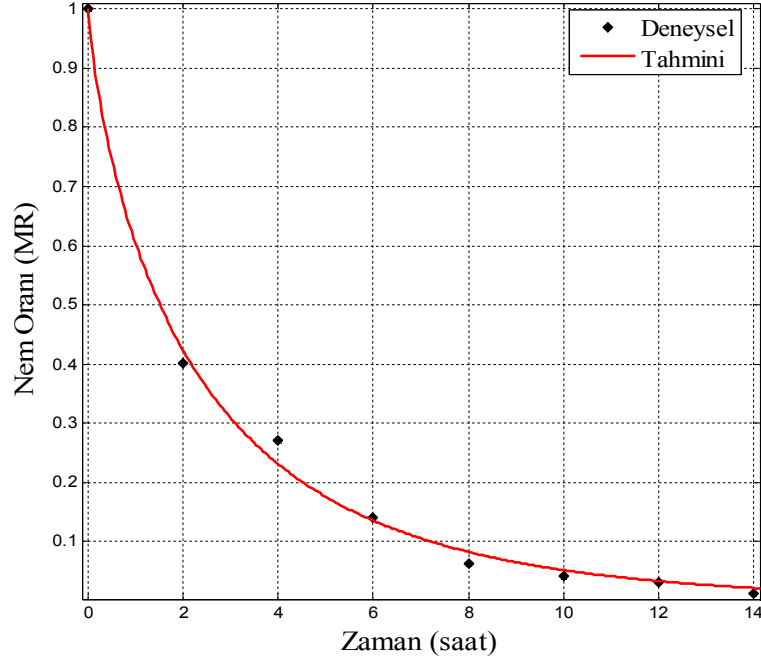
Dondurarak kurutma sırasında ürünün kapalı bir haznede bulunması ve düşük basınç altında, buz kristallerine dönüşen ürün içerisindeki suyun süblimasyonla buharlaşarak üründen uzaklaştırılması sonucu, üründeki hücre yapısı bozulmamakta, rengini korumakta ve görüntü olarak ta net ve taze bir görünüş sergilemektedir.

Dondurarak kurutulan ve güneşte kurutulan numunelerin kıyaslanması amacı ile yapılan deney sonrası ikinci deney olan, safran çiçeğinin dondurarak kurutulması sonucu en uygun matematiksel modeli belirleme deneyi yapılmıştır. Bu deneyde safran çiçeğinin dondurarak kurutma sürecinde belirli zamanlardaki ağırlık kayıplarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Safran çiçeğinin 16 saatlik dondurarak kurutulması sonucunda her iki saatte bir ağırlıkları hassas terazi ile ölçülüp kayıt edilmiştir. “Eş. 6.1” ile nem miktarı değişimi hesaplanmıştır. Nem miktarı değişimi her iki saate alınan ağırlık bilgileri ile hesaplanıp toplam 8 ayrı veri elde edilmiştir.

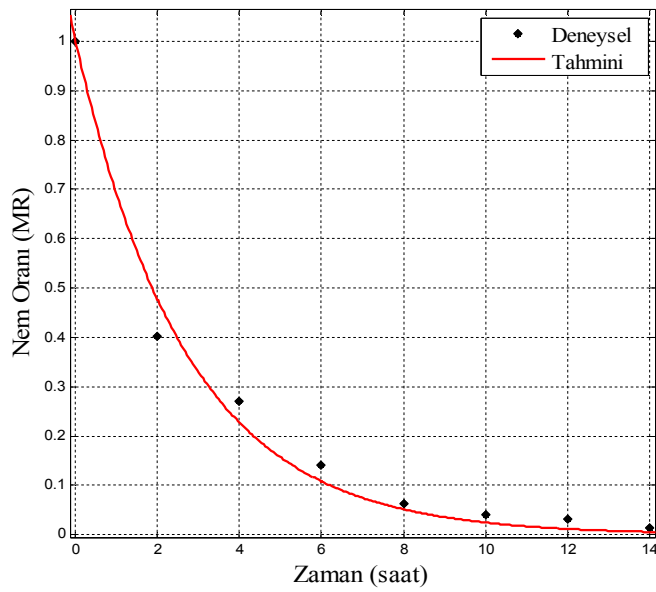
Elde edilen veriler ışığında toplam 10 model üzerinde uygulama yapılarak bu modellerden en uygunu regresyon analizi ile belirlenmiştir. Bu belirleme kriterleri modellerden elde edilen R^2 , x^2 ve RMSE'ye bağlıdır. Burada R^2 nin bire yakın olması Khi-kare (x^2) ve tahmini standart hatanın da (RMSE) sifıra yakınlığı modelin yapılan deneye en uygun model olduğunun bir göstergesidir.

Safran numunelerin kuruma olayını açıklamak üzere Çizelge 6.1’de verilen modeller istatistiksel program olan SigmaPlot 2000 ve MATLAB R2010a bilgisayar programıyla regresyon analizi yapılmış ve 1000 mg’lık safran çiçeğinin dondurarak kurutulması sonucunda nem oranı en düşük hata ile Page modelin verdiği görülmüştür.

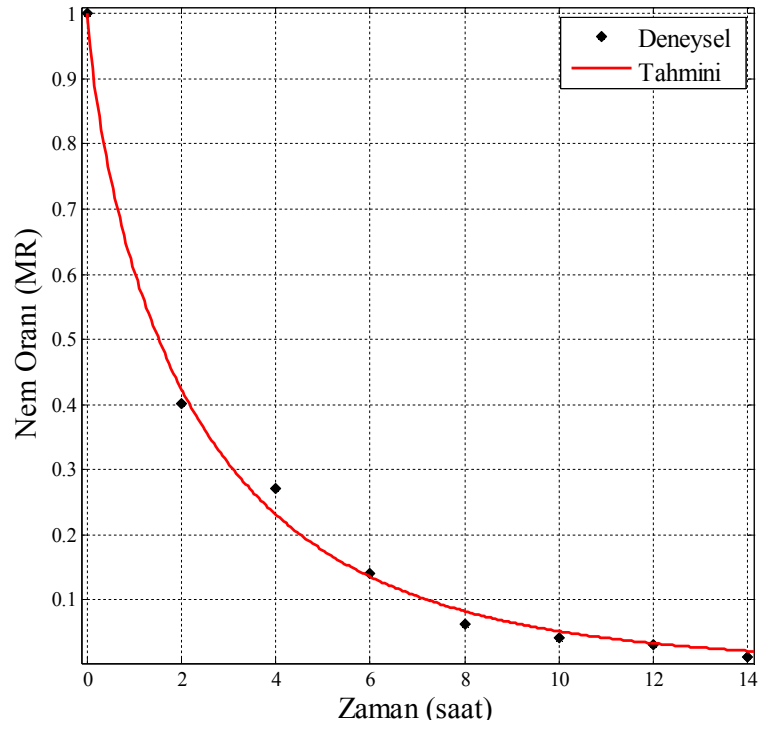


Şekil 7.3. Page modelinde deneysel ve tahmini nem oranların zamana göre değişimi.

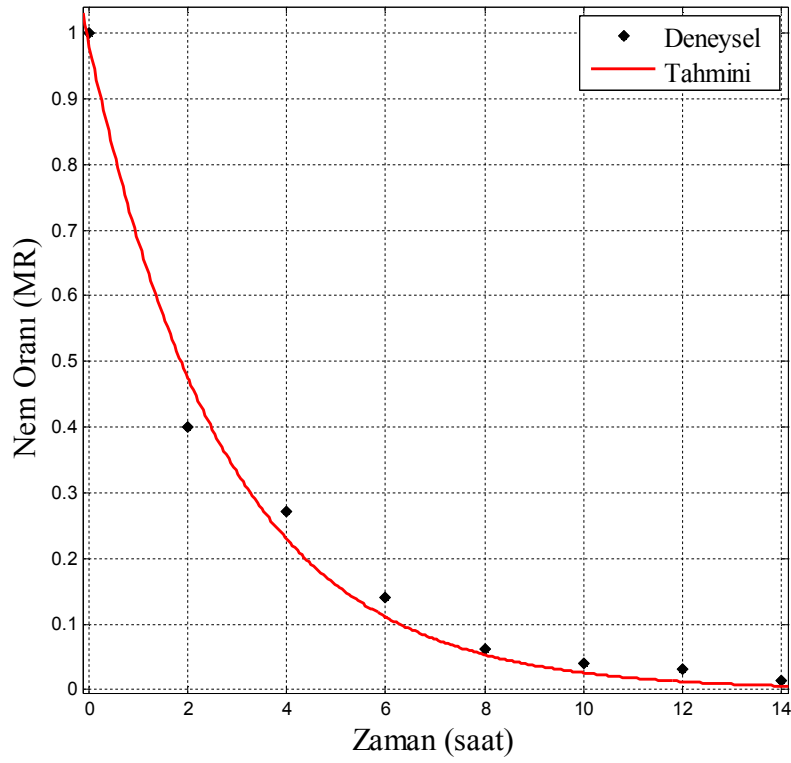
Şekil 7.3’de Safran numunelerinin, en uygun model olan Page modelindeki deneysel nem oranı ile tahmini nem oranı zaman grafiği verilmiştir. Diğer modellerin deneysel nem oranı ile tahmini nem oranı zaman grafikleri sırasıyla Şekil 7.4, Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de sunulmuştur.



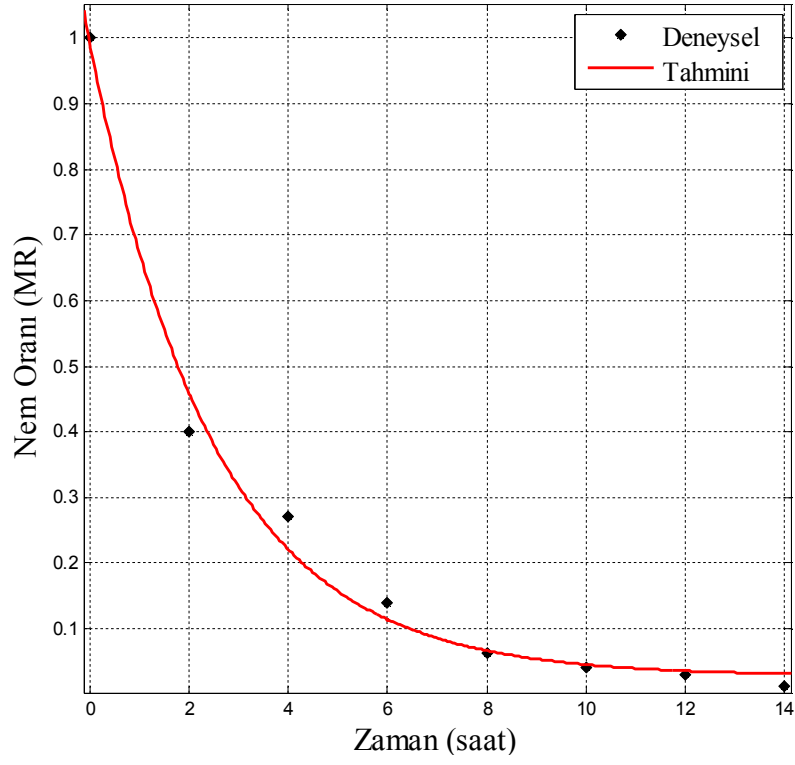
Şekil 7.4. Newton modelinde oranların zamana göre değişimi.



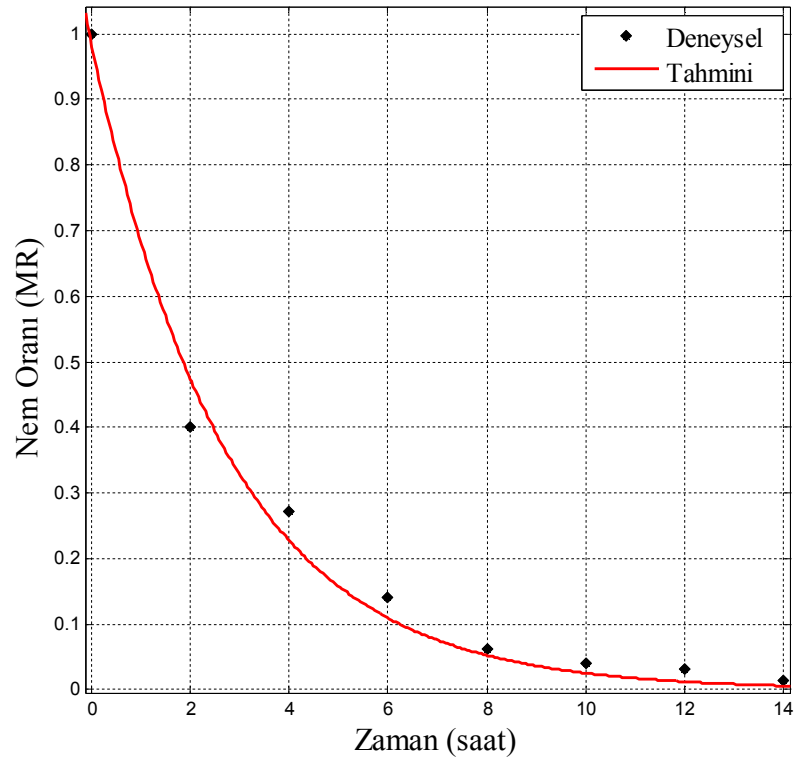
Şekil 7.5. Geliştirilmiş Page modelinde oranların zamana göre değişimi.



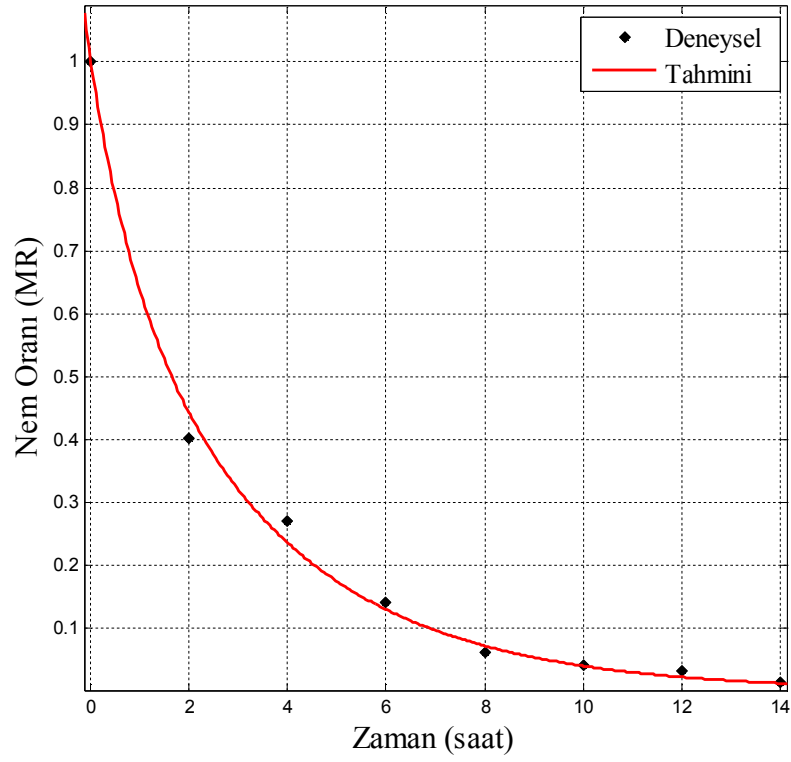
Şekil 7.6. Henderson ve Papis modelinde oranların zamana göre değişimi.



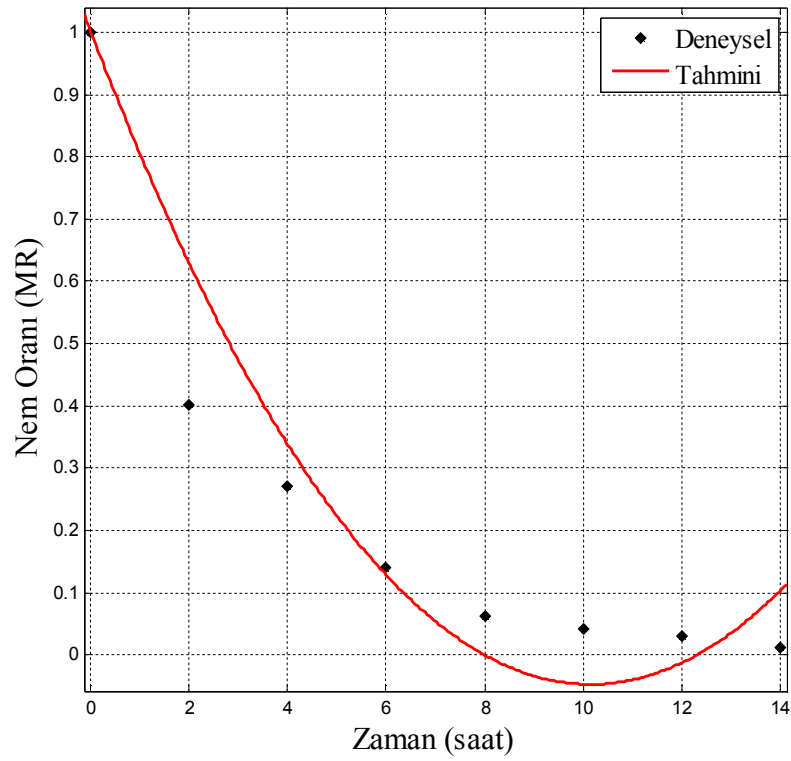
Şekil 7.7. Logaritmik modelinde oranların zamana göre değişimi.



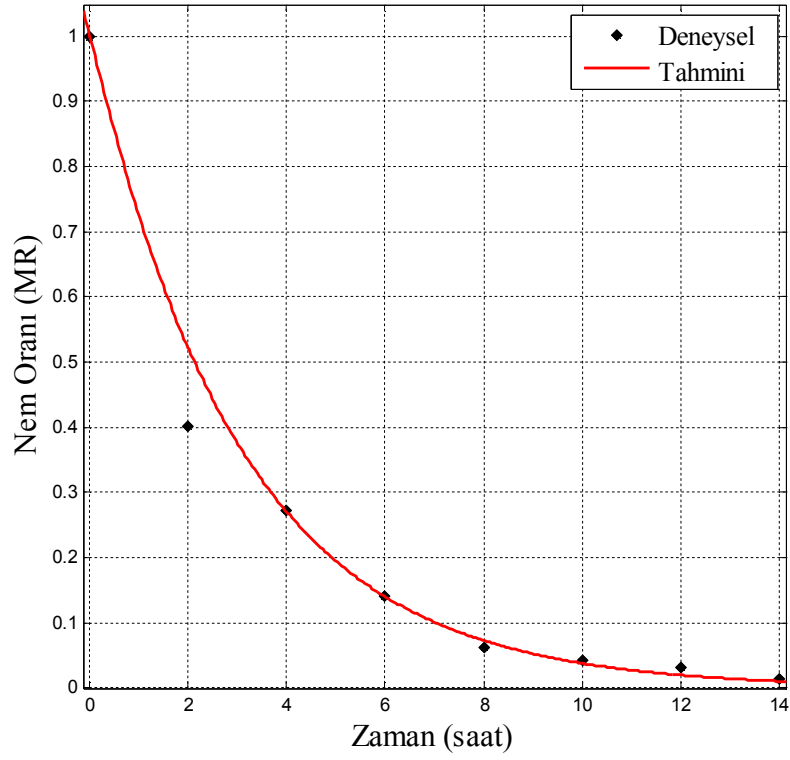
Şekil 7.8. İki terimli modelinde oranların zamana göre değişimi.



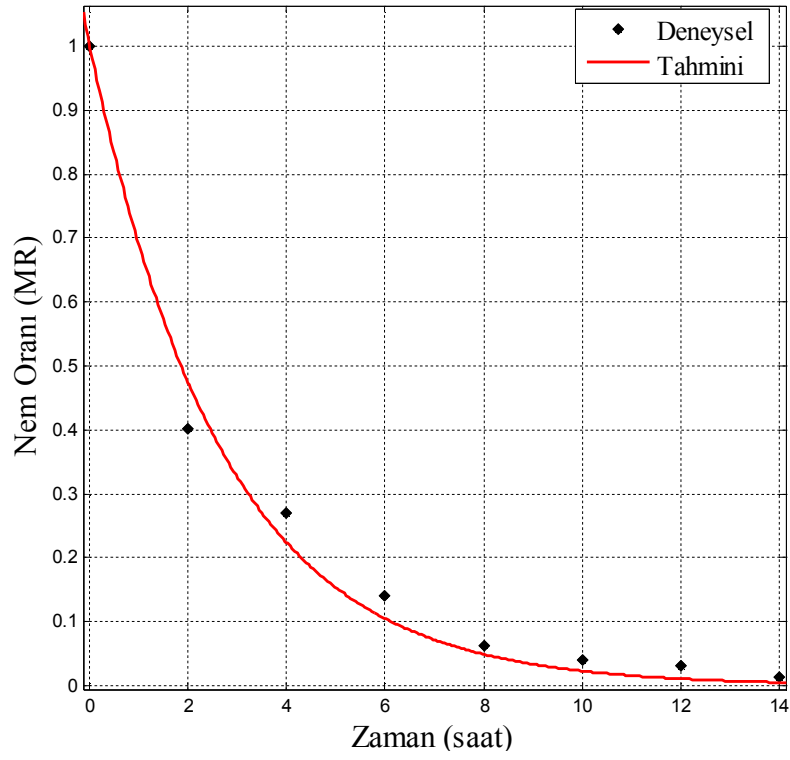
Şekil 7.9. İki terimli-exponansiyel modelinde oranların zamana göre değişimi.



Şekil 7.10. Wang ve Singh modelinde oranların zamana göre değişimi.



Şekil 7.11. Difüzyon yaklaşımı modelinde oranların zamana göre değişimi.



Şekil 7.12. Verma modelinde oranların zamana göre değişimi.

Safran çiçeğinin dondurarak kurutulması sonucunda, uygulanan regresyon analizi ile 10 farklı matematiksel modellere ait sabit sayılar (a, k, n ve b) ve istatistiksel hata değerleri (R^2 , x^2 ve RMSE) Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Safran numuneleri için model ile istatistiksel değer sonuçlarının kurutma sabitleri.

Model No	Model Sabiti	R^2	X^2	RMSE
1	k = 0.3705	0.9879	0.00135	0.03674
2	k = 0.5076 n = 0.7647	0.9965	0.000453	0.02127
3	k = 0.5460 n = 0.6782	0.9879	0.001575	0.03969
4	a = 0.9791 k = 0.3631	0.9885	0.001501	0.03874
5	a = 0.9585 c = 0.0282 k = 0.4016	0.991	0.0013993	0.03741
6	a = 1.071 b = -0.09198 k ₁ = 0.3636 k ₀ = 0.3625	0.9885	0.002251	0.04744
7	a = 0.2367 k = 1.252	0.9959	0.0005377	0.02319
8	a = -0.2062 b = 0.01015	0.9004	0.012955	0.1138
9	a = -0.0006963 b = 0.9589 k = 0.3862	0.9879	0.0094115	0.04347
10	a = 0.636 g = 1.145 k = 0.2539	0.9871	0.000557	0.03137

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

İlk yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması ve kurutma süresinin geleneksel kurutma ile kıyaslandığında uzun olmasına rağmen, dondurarak kurutma, pazar değerini yüksek kılacak şekilde üründen suyu en iyi ayırma yöntemi olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmada, dondurarak kurutulan numunelerin safranal miktarı güneşte kurutulan numunelerin safranal miktarından 5 kat daha fazla çıkmıştır. Dondurarak kurutulmuş numunelerdeki krosin miktarı ise güneşte kurutulan numunelerdeki krosin miktarından % 40 daha fazla bulunmuştur. Buradan anlaşıldığı gibi ticari olarak, safranın piyasa değerini ve kalitesini tanımlayan safranal ve krosin içeriği, dondurarak kurutulmuş numunelerde önemli ölçüde yüksek bulunmuştur. Güneşte kurutulan numunelerde ise düşük çıkmış, orijinal şekil ve yapısı bozulmuştur.

Dondurarak kurutulmuş ticari safranın geleneksel güneşte kurutulmuş safran numuneleri ile karşılaştırıldığında safranal ve krosin miktarlarının yüksek çıkmasının yanı sıra nem içeriği de düşük çıkmıştır. Düşük nem oranı yüksek krosin içermesinden dolayı dondurarak kurutulan numunelerde krosin miktarı yüksektir. Böylelikle krosetin içerisinde bulunan krosin bozulma göstermez ve ürünün depolama sürecini artırır ve rengini soldurmaz.

Bu çalışmada dondurarak kurutmanın, safran içeriğindeki safranal ve krosin miktarının minimum kayıp göstermesiyle, safran dehidratasyonu için kullanılabilir bir kurutma yöntemi olduğu belirlenmiştir. Dondurarak kurutmanın yüksek maliyeti, safranal ve krosinin iyileşme gösterip yüksek miktarda çıkması ile telafi edilebilir.

Safran çiçeğinin 16 saatlik kurutma süresince, elde edilen ağırlık kaybı verileri alınarak regresyon analizi ile toplam 10 farklı matematik modele uyarlanmıştır. Bu modellere uyarlanan verilerle R^2 , x^2 ve RMSE sonuçları alınmış ve Page modelinin, yapılan çalışmaya en uygun model olduğu görülmüştür.

8.2. ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması sonucunda elde edilen deneysel veriler ve edinilen tecrübeler ışığında aşağıdaki öneriler uygun görülmüştür.

1. Dondurarak kurutmada kullanılan, safran çiçeğinin kalitesini belirleyen 3 önemli etken maddelerinden yalnızca safranal ve krosin için deney yapılmıştır. Bir diğer etken madde olan pikrokrosin içinde aynı deneyler gerçekleştirilebilir.
2. Dondurarak kurutma esnasında ağırlık kayıpları alınmak istendiğinde ürün cihaza konulup istenilen sürede alınıp tartılıyor, bir sonraki süre için tekrar aynı ağırlıkta yeni bir ürün cihaza konulup bu sefer bir öncekinden daha farklı bir sürede alınarak tartılıyor ve bu işlem her bir süre için tekrarlanıyor. Bu işlem çok büyük bir zaman kaybı olduğu gibi, bol miktarda ürün gerektiriyor ve cihazın çalışma süresini de artırıyor. Cihaz içerisine yerleştirilen hassas bir ağırlık ölçer vasıtası ile dijital ekranda, kurutma süresi boyunca tüm ağırlık kayıpları gösterilebilir.
3. Yukarıda bahsedilen ve dondurarak kurutma cihazı içerisine yerleştirilen ağırlık kaybı ölçme sistemi ile istenilen ağırlığa ulaşıldığında cihazın kendini kapatabilmesi ve iç basıncını ortam şartlarına uygun hale gelecek şekilde ayarlayıp otomatik kontrol sağlayabilmesi cihaz için gerekli bir unsurdur.

KAYNAKLAR

1. Kholliiev, B., Sadikov, T., Khairitidinov, B. and Sadikov, B., “On the investigation of a solar hothouse/fruit dryer”, *Applied Solar Energy*, 8 (3): 78-81 (1982).
2. Özel, S. ve Özil, E., “Kurutmada güneş enerjisinin kullanımı”, *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 28 (327): 28-30 (1987).
3. Güner, B., “Raf tipi güneşli bir meyve kurutucunun matematiksel modellenmesi ve optimizasyonu”, *Tarımsal Mekanizasyon 13. Ulusal Kongresi*, Konya, 451-460 (1991).
4. Yagcıoğlu, A., Degirmencioğlu, A. and Çagatay, F., “Drying characteristics of laruel leaves under different drying conditions”, *7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy*, Adana, 565-569 (1999).
5. Olgun, H. ve Rzayev, P., “Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması” *Tr. J. Engin. Environ. Sci.*, 24: 1-14 (2000).
6. Sarsılmaz, C., Yıldız, C. and Pehlivan, D., “Drying of apricot in a rotary column cylindrical dryer supported with a solar energy”, *Renewable Energy*, 21 (2): 117-127 (2000).
7. El-Sebaai, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I. and El-Gohary H.G., “Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer”, *Energy Conversion and Management*, 43 (16): 2251-2266 (2002).
8. Tarhan, S., Ergünes, G. ve Özler, S., “Tokat yöresinde düşük sıcaklıkta mısır kurutma için uygun kurutma şartlarının belirlenmesi”, *Tarımsal Mekanizasyon 21. Ulusal Kongresi*, Konya, 18-24 (2003).
9. Midilli, A. and Küçük, H., “Mathematical modeling of single layer drying of pistachio by using solar energy”, *Energy Conversion and Management*, 44 (7): 1111-1122 (2003).
10. Aktaş, M., Ceylan, İ. ve Doğan, H., “Güneş enerjili kurutma sistemlerinin fındık kurutulmasına uygulanabilirliği”, *Teknoloji Dergisi*, 7 (4): 557-564 (2004).

11. Tarhan, S., Ergünes, G. ve Tekelioğlu, O., “Tarımsal ürünler için güneş enerjili kurutucuların tasarım ve işletme esasları”, *Yeni ve Yenilebilir Enerji Kaynakları/Enerji Yönetimi Sempozyumu*, Kayseri, 51-58 (2005).
12. Aktaş, M., Ceylan, İ. ve Doğan, H., “Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesi”, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, *Politeknik Dergisi*, 8 (4): 329-336 (2005).
13. Doymaz, İ., “Sun drying of figs an experimental study”, *Journal of Food Engineering*, 71 (4): 403-407 (2005).
14. Mutlu, A., “Tokat’ta güneş enerjili raflı kurutucu ile domates kurutma koşullarının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tokat, 1-2 (2007).
15. Ceylan, İ., Aktaş, M. ve Doğan, H., “Isı pompalı kurutma odasında elma kurutulması”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 25 (2): 9-14 (2005).
16. Jaya, S. and Das, H., “A vacuum drying model for mango pulp”, *Drying Technology*, 21 (7): 1215-1234 (2003).
17. Jaya, S. and Das, H., “Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powders properties”, *Journal of Food Engineering*, 63 (2): 125-134 (2004).
18. Cui, Z., Xu, S. and Sun, D., “Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices”, *Journal of Food Engineering*, 65: 157-164 (2004).
19. Madamba, P.S., “The response surface methodology: An application to optimize dehydration operations of selected agricultural crops”, *Lebensm.-Wiss- u. Technology*, 35 (7): 584-592 (2002).
20. Nitz, M. and Taranto, O.P., “Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: Drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization”, *Journal of Food Engineering*, 80 (1): 249-256 (2007).
21. Yüzgeç, U., “Kurutma sürecinin modellenmesi ve akıllı öngörülü denetimi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-35 (2005).
22. Heinrich, S., Peglow, M., Henneberg, M., Drechsler, J. and Morl, L., “Fluidized bed spray granulation: analysis of dynamic particle populations and heat and mass transfers”, *14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 121-128 (2004).

23. Vitor, J.F.A., Biscaria Jr., E.C. and Massarini, G., "Modeling of biomass drying in fluidized bed", *14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 1104-1111 (2004).
24. Topuz, A., Gür, M., and Gül, M.Z., "An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts", *Applied Thermal Engineering*, 24 (10): 1535-1547 (2004).
25. Romero, T.J., Gabas, A.L., and Sobral, P.J.A., "Osmo-convective drying of mango cubes in fluidized bed and tray dryer", *14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 1868-1875 (2004).
26. Temple, S.J., Van Boxtel, A.J.B. and Van, S.G., "Control of fluid bed tea dryers: controller performance under varying operating conditions", *Computers and Electronics in Agriculture*, 29 (3): 217-231 (2000).
27. Soponronnarit, S., "Fluidised-bed paddy drying", *Science Asia*, 25 (1): 51-56 (1999).
28. Hajidavalloo, E. and Hamdullahpur, F., "Mathematical modeling of simultaneous heat and mass transfer in fluidized bed drying of large particles, in: Proceedings of CSME Form", *Symposium on Thermal and Fluids Engineering*, Toronto-Canada, 19-22 (1998).
29. Hajidavalloo, E., "Hydrodynamic and thermal analysis of a fluidized bed drying system", *Thesis of Doctor of Philosophy Dalhousie Univ. Daltech*, Halifax, Nova Scotia, 173 (1998).
30. Soponronnarit, S., Pongtornkulpanich, A. and Prachayawara-Korn, S., "Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer", *Drying Technology*, 15 (5): 1603-1625 (1997).
31. Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., and Marinus - Kouris, D., "Modeling and optimization of fluidized bed and rotary dryers", *Drying Technology*, 15 (4): 735-763 (1997).
32. Grabowski, S., Mujumdar, A.S., Ramaswamy, H.S. and Strummillo, C., "Evaluation of fluidized versus spouted bed drying of baker's yeast", *Drying Technology*, 15 (2): 625-634 (1997).
33. Abid, M., Gibert, R. and Laguerie, C., "An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed", *International Chemical Engineering*, 30 (4): 632-641 (1990).
34. Uçkan, G. and Ülkü, S., "Drying of corn grain in a batch fluidized bed dryer", *Drying of Solids*, Wiley Eastern, New York, 91-96 (1986).

35. Yıldız, Y., Tuncer, İ.K. ve Başçetinçelik, A., “Tane mısırın düşük sıcaklıkta kurutulmasında enerji tüketimi”, *Tarımsal Mekanizasyon 12. Ulusal Kongresi*, Tekirdağ, 44-52 (1989).
36. Johnson, P.N.T., Brennan, J.G. and Addo-Yobo, F.Y., “Air-drying characteristics of plantain (Musa AAB)”, *Journal of Food Engineering*, 37 (2): 233-242 (1998).
37. Boudhrioua, N., Michon, C., Cuvelier, G. and Bonazzi, C., “Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying”, *Journal of Food Engineering*, 55 (2): 115-121 (2001).
38. Maskan, A., Kaya, S. and Maskan, M., “Effect of concentration and drying processes on color change of grape juice and leather (Pestil)”, *Journal of Food Engineering*, 54 (1): 75-80 (2001).
39. Doymaz, İ. and Pala, M., “Hot-air drying characteristics of red paper”, *Journal of Food Engineering*, 55 (4): 331-335 (2002).
40. Arıcı, R.Ç., “Mantarın (agaricus bisporus) kontrollü şartlar altında kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-2 (2006).
41. İzli, N., “Mısırın sıcak hava akımıyla kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-2 (2007).
42. Akosman, C.M., “Kalender. soya fasulyesinin kuruma karakteristiğinin tepeşili kurutucuda incelenmesi”, *S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (2): 243– 251 (2004).
43. Yılmaz, H.Ö., Güngör, D. ve Özbalta, N., “Domates için kabin tipi bir güneşli kurutucunun performans analizi”, *7. Uluslararası Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi*, Adana, 32-41 (1999).
44. Tuncer, K.T., “Kurutmada yeni teknolojiler. yüksek frekanslı mikrodalgayla sebze kurutma üzerine bir araştırma”, *4. Tarımsal Mekanizasyon Ve Enerji Kongresi*, Adana, 472-480 (1990).
45. Pappas, C., Tsami, E. and Marinos-Kouris, D., “The effect of process conditions on the drying kinetics and rehydration characteristics of some microwave-vacuum dehydrated”, *Fruits Drying Technology*, 17 (1): 157-174 (1999).
46. Özkan, İ.A. ve Işık, E., “Kayısı ve kirazın mikrodalga ışınlarla kurutulmasındaki kurutma parametrelerinin belirlenmesi”, *1. Sert Çekirdekli Meyveler Sempozyumu Bildirisi*, Yalova, 317-327 (2001).

47. Özkan, İ.A. ve Işık, E., “Domatesin mikrodalga ışınlarla kurutulmasındaki kurutma parametreleri”, *Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi Bildirisi*, Şanlıurfa, 418-422 (2001).
48. Koç, K., “Mikrodalga ve endüstriyel kurutma metotlarının kayısının fizikokimyasal ve duyuşal özellikleri üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 1-2 (2001).
49. Toğrul, H., Toğrul, İ. ve İspir, A., “Mantarların ince tabaka kuruma karakteristiklerinin incelenmesi”, *3. Tarımsal Ürünleri Kurutma Çalıştayı*, Antalya, 15-22 (2005).
50. Toğrul, H., Toğrul, İ. ve İspir, A., “İnfrared kurutucuda muzun kuruma kinetiğinin incelenmesi”, *3. Tarımsal Ürünleri Kurutma Çalıştayı*, Antalya, 22-29 (2005).
51. Yıldız, O., “Havuç ve pırasa kurutulmasında kurutma havası özelliklerinin kuruma karakteristiklerine etkisi”, *Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi*, Şanlıurfa, 412-417 (2001).
52. Akpınar, E.K., ve Biçer, Y., “Siklon tipi bir kurutucuda kabağın kuruma davranışının incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 159-169 (2003).
53. Mellor, J.D., “Fundamentals of freeze-drying”, *Acedemic Press*, London, 94-128 (1978)
54. Nail, S.L., “The effect of pressure on heat transfer in the freeze-drying of parenteral solutions”, *Journal of the Parenteral Drug Association*, 34 (5): 358-368 (1980).
55. Wolf, E. and Gibert, H., “Vacuum freeze-drying kinetics and modelling of a liquid in a vial”, *Chemical Engineering and Processing*, 25 (3): 153-158 (1989).
56. Pikal, M.J., Shah, S., Senior, D. and Lang, J.E., “Physical chemistry of freeze-drying: measurement of sublimation rates for frozen aqueous solutions by a microbalance technique”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 72 (6): 635-650 (1983).
57. Pikal, M.J., Roy, M.L. and Shah, S., “Heat and mass transfer in vial freeze-drying of pharmaceuticals: role of the vial”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 73 (9): 1224-1237 (1984).
58. Zamzow, W.H., and Marshall, W.R.Jr., “Freeze drying with radiant energy”, *Chemical Engineering and Processing*, 48 (1): 21-32 (1952).
59. Hill, J.E. and Sunderland, J.E., “Sublimation-dehydration in the continuum, transition and free-molecular flow regimes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14 (1): 625-638 (1970).

60. Liapis, A.I., "Rates for freeze drying," *Drying of Foodstuffs and Grains, Hemisphere Publishing Corporation*, 2 (1): 224-228 (1980).
61. Liapis, A.I. and Bruttini, R., "A theory for the primary and secondary drying stages of the freeze-drying of pharmaceutical crystalline and amorphous solutes: a comparison between experimental data and theory", *Seperation Technology*, 4 (3): 144-155 (1994).
62. Dyer, D.F. and Sunderland, J.E., "Heat and mass transfer mechanisms in sublimation dehydration", *Journal of Heat Transfer*, 90 (4): 379-384 (1968).
63. Copson, D.A., "Microwave sublimation of foods", *Food Technology*, 12 (6): 270-272 (1958).
64. Ma, Y.H. and Peltre, P., "Mathematical simulation of a freeze drying process using microwave energy", *in: Food Preservation*, 69: 47-54 (1973).
65. Jennings, T.A., "Effect of pressure on the sublimation rate of ice", *Journal of Parenteral Science and Technology*, 4 (3): 95-97 (1986).
66. Litvin, S., Mannheim, C.H. and Miltz, J., "Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying", *Journal of Food Engineering*, 36 (1): 103-111 (1998).
67. Khalloufi, S., Giasson J. and Ratti C., "Water activity of freeze dried mushrooms and berries", *Canadian Agricultural Engineering*, 42 (1): 71-79 (2000).
68. Shishegarha, F., Makhlof, J. and Ratti C., "Freeze-drying characteristics of strawberries", *Drying Technology*, 20 (1): 131-145 (2002).
69. Araki, T., Sagara, Y., Abdullah, K. and Tambunan, A.H., "Transport properties of cellular food materials undergoing freeze-drying", *Drying Technology*, 19 (2): 297-312 (2001).
70. Carapelle, A., Henrist, M. and Rabecki, F., "A study of vacuum freeze drying of frozen wet papers", *Drying Technology*, 19 (6): 1113-1124 (2001).
71. Sadıkoğlu, H. ve Özdemir, M., "Dondurarak kurutma teknolojisi", *Termoklima*, 102: 53-61 (2001).
72. Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. and Saravacos, G.D., "The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products", *International Journal of Food Science and Technology*, 36 (1): 53-59 (2001).
73. Marques, L.G. and Freire, J.T., "Analysis of freeze-drying of tropical fruits", *Drying Technology*, 23 (9): 2169-2184 (2005).

74. Sadikoglu, H. and 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): 791-810 (1997).
75. Sadikoglu, H., Liapis, A.I. and Crosser, O.K., “Optimal control of the primary and secondary drying stage of bulk solution freeze drying in trays”, *Drying Technology*, 16 (3): 399-431 (1998).
76. Duran, A., Karakaya, M. ve Sariçoban, C., “Liyofilizasyon uygulamasının sığır ve tavuk etlerinin bazı emülsiyon özellikleri üzerine etkisi”, *Standart*, 75-80 (2002).
77. Kwok, B.H.L., Hu, C., Durance, T. and Kitts, D.D., “Dehydration techniques affect phytochemical contents and free radical scavenging activities of Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia* Nutt.)”, *Journal of Food Science*, 69 (3): 122-126 (2004).
78. Sham, P.W.Y., Scaman, C.H. and Durance, T.D., “Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety”, *Journal of Food Science*, 66 (9): 1341-1347 (2001).
79. Rahman, M.S., Al-Amri, O.S. and Al-Bulushi, I.M., “Pores and physicochemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying”, *Journal of Food Engineering*, 53 (4): 301-313 (2002).
80. Tsami, E., Krokida, M.K., and Drouzas, A.E., “Effect of drying method on the sorption characteristics of model fruit powders”, *Journal of Food Engineering*, 38 (4): 381-392 (1999).
81. Kırmacı, V., “Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneylerinin yapılması”, Dotor Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6 (2008).
82. Menlik, T., “Alternatif akışkanlı iki kademeli soğutma sisteminin tasarımı, imali ve performans deneyleri”, Dotor Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5 (2005).
83. Kırmacı, V. ve Özdemir, M.B., “Soğuk depolar için R-404a alternatif soğutucu akışkanlı buhar sıkıştırımlı soğutma sistem eleman kapasitelerinin bilgisayar programıyla belirlenmesi”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (2): 66-76 (2005).
84. Özdemir, M.B. ve Kırmacı, V., “Soğuk depo soğutma sisteminde kullanılan r-134a alternatif soğutucu akışkanına göre sistem eleman kapasitelerinin bilgisayar programıyla belirlenmesi”, *Teknoloji Dergisi*, 9 (2): 91-100 (2006).

85. “Sekizinci beş yıllık kalkınma planı gıda sanayii ÖİK raporu”, Dondurulmuş Gıda Sanayii Alt Komisyon Raporu, *DPT*, Ankara, 1-84 (2001).
86. Özkul, N., “Uygulamalı soğutma tekniği”, 5. Baskı, *Makine Mühendisleri Odası Yayın*, Ankara, 115-709 (1999).
87. Cemeroğlu, B., Karadeniz, F. ve Özkan, M., “3 Meyve ve sebze işleme teknolojisi”, *Gıda Teknolojisi Derneği*, Ankara, 77-570 (2003).
88. Heldmam, D.R., Singh, R.P., Evranuz, Ö. ve Çataltaş, İ., “Gıda işleme mühendisliği”, *İnkılap Kitabevi*, İstanbul, 200 (1989).
89. Kırmacı, B. ve Batu, A., “Üzümsü meyvelerin IQF yöntemi ile dondurularak muhafası”, *2. Ulusal Üzümsü Meyveler Sempozyumu*, Tokat, 354-358 (2006).
90. Khadatkar, R.M., Kumar, S. and Pattanayak, S.C., “Cryofreezing and cryofreezer”, *Cryogenics*, 44 (9): 661-678 (2004).
91. Cemeroğlu, B. ve Soyer, A., “Gıda mühendisliğinde temel işlemler”, *Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları*, Ankara, 29: 78-85 (2005).
92. Acharya, A., Marchese, M.A. and Bredenkamp, B., “Cryomechanical freezing of strawberries”, *Proceeding of the International Conference on Technical Innovations in Freezing and Refrigeration of Fruits and Vegetables*, 2 (1): 277-280 (1989).
93. Yapar, A. ve Erdöl, M., “Farklı sıcaklık ve tuz uygulanarak kurutulan alabalıklarda kurumanın fonksiyonel ifadesi”, *Turkish. Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 23 (3): 479-483 (1999).
94. Çalışkan, M.K., “Mikrodalga enerjisi ile kurutma”, Yüksek Lisans Tezi *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5 (2002).
95. Ceylan, İ. ve Doğan, H., “Nem kontrollü kondenzasyonlu kereste kurutma fırını”, *II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi*, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 155-166 (2004).
96. Aktaş, M., “Isı Pompası destekli fındık kurutma fırınının tasarımı, imalat ve deneysel incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 41-81 (2007).
97. Bulduk, S., “Gıda teknolojisi”, *Detay Yayıncılık*, Ankara, 40-44 (2002).
98. Güngör, A. ve Özbaltı, N., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, *3. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 737-747 (1997).
99. Günerkan, H., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36 (13): 1-10 (2005).

100. Sham, P.W.Y., Scaman, C.H. and Durance, T.D., "Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety", *Journal of Food Science*, 66 (9): 1341-1347 (2001).
101. Biçer, Y., Kavak, E. ve Yıldız, C., "Teknik kurutmada kurutucu seçimi", *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri*, Denizli, 221: 606-612 (1999).
102. Strumillo, C. and Kudra, T., "Drying: principles, applications and design", *Gordon and Breach Science Publishers*, New York, 369-405 (1986).
103. Ertekin, C., "Bazı sebze ve meyvelerin kurutulması", *Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı*, İzmir, 33-57 (2002).
104. Demir, V. ve Günhan, T., "Tarım ürünlerinin kuruma karakteristik değerlerinin belirlenmesi", *Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı*, İzmir, 17-31 (2002).
105. Demirtaş, C., "Fındık kurutma şartlarının belirlenmesi", Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 58 (1996).
106. Yağcıoğlu, A., "Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği", *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, İzmir, 536-540 (1999).
107. Güner, M., "Kurutmanın bilimsel temelleri, kurutma modelleri ve güneşli kurutucular", *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, Ankara, 48 (1): 1-29 (1991).
108. Mengeş, G., "Patatesin farklı kurutma şartlarındaki kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 4-8 (2005).
109. Akyurt, M., Sevilir, E., Söylemez, E. ve Selçuk, K., "Güneş enerjisi ve bazı yakıtlarla meyve ve sebze kurutulması", *TUBİTAK*, Yayın No: 299, Ankara (1971).
110. Anthony, J. and Fontana, Jr., "Water activity's role in food safety and quality", *Presented at the 2nd NSF International Conference on Food Safety*, Savannah, GA, USA, 1 (2000).
111. Liapis, A.I. and Bruttini, R., "A theory for the primary and secondary drying stages of the freeze-drying of pharmaceutical crystalline and amorphous solutes: Comparison between experimental data and theory", *Separations Technology*, 4 (3): 144-155 (1994).
112. Liapis, A.I. and Bruttini, R., "Freeze drying", In Handbook of Industrial Drying 2nd Ed; Mujumdar, A. S. Ed. *Marcel Dekker Inc.*, New York, 309-343 (1995).

113. Liapis, A.I. and 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): 43-72 (1995).
114. Liapis, A.I., Pikal, M.J. and Bruttini, R., “Research and development needs and opportunities in freeze drying”, *Drying Technology*, 14 (6): 1265-1300 (1996).
115. Sadikoglu, H. and 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): 791-810 (1997).
116. Sheehan, P. and Liapis, A.I., “Modeling of the primary and secondary drying stages of the freeze drying of pharmaceutical products in vials: Numerical results obtained from the solution of a dynamic and spatially multi-dimensional lyophilization model for different operational policies”, *Biotechnology and Bioengineering*, 60 (6): 712-728 (1998).
117. Meryman, H.T., “Principles of freeze-drying”, *Annals of the New Academy of Sciences*, 85: 630-640 (1960).
118. Perry, V.P., “Freeze-drying for the preservation of human tissues”, *Transplantation Proceedings*, 8 (2): 189-192 (1976).
119. Sadikoglu, H., Ozdemir, M. and Seker, M., “Optimal control of the primary drying stage of freeze drying of solutions in vials using variational calculus”, *Drying Technology*, 21 (7): 1307-1331 (2003).
120. Sadikoglu, H., Ozdemir, M. and Seker, M., “Freeze-drying of pharmaceutical products: research and development needs”, *Drying Technology*, 24 (7): 849-861 (2006).
121. Sadikoglu, H., “Optimal control of the secondary drying stage of freeze drying of solutions in vials using variational calculus”, *Drying Technology*, 23 (1): 33-57 (2005).
122. Irzyniec, Z., Klimczak, J. and Michalowski, S., “Freeze-drying of de black currant juice”, *Drying Technology*, 13 (1,2): 417-424 (1995).
123. Shishegarha, F., Makhlof, J. and Ratti, C., “Freeze-drying characteristics of strawberries”, *Drying Technology*, 20 (1): 131-145 (2002).
124. Krokida, M.K., Karathanos, V.T. and Maroulis, Z.B., “Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated”, *International Journal of Food Science and Technology*, 35 (4): 369-380 (1998).

125. Özkarar, T., “Dondurarak kurutma yöntemi ile saklanan greftlerin mekanik özellikleri üzerine radyasyonla sterilizasyonun etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16 (2003).
126. Dolan, J.P., “Use of volumetric heating to improve heat transfer during vial freeze-drying”, Ph.D. Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 22 (1998).
127. Güler, Ç. ve Koçak, Ö., “Fizikokimya gazlar ve termodinamik”, *Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları*, İzmir, 236 (2003).
128. Çengel, Y.A. and Boles, M.A., “Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 25-26 (2002).
129. Cebe, M., “Fizikokimya-I”, *Vipaş*, Bursa, 386 (2003).
130. Mortimer, G.R., “Fizikokimya”, *Palme Yayıncılık*, çeviri editörü: Şanlı, O., Ünal, H., İ., Ankara, 135 (2004).
131. Pikal, M.J., Shah, S., Roy, M.L. and Putman, R., “The secondary drying stage of freeze drying: drying kinetics as a function of temperature and chamber pressure”, *International Journal of Pharmaceutical*, 60 (3): 203-217 (1990).
132. Kırmacı, V. ve Özdemir, M.B., “Soğuk depolar için R-404a alternatif soğutucu akışkanlı buhar sıkıştırırmalı soğutma sistem eleman kapasitelerinin bilgisayar programıyla belirlenmesi”, *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (2): 66-76 (2005).
133. Odabaşoğlu, T., “Ticari soğutucularda alternatif soğutucu akışkan R-134a için kılcal boru uzunluğunun deneysel olarak belirlenmesi”, Yüksek Lisans Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 33 (2001).
134. Kırmacı, V. ve Özdemir, M.B., “Soğuk depoların soğutma sisteminde kullanılan R-407c alternatif soğutucu akışkanına göre sistem eleman kapasitelerinin bilgisayar programıyla belirlenmesi”, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 27 (2): 24-38 (2006).
135. Althouse, A.D., Turnquist, C.H. and Bracciano, A.F., “Modern refrigeration and air conditioning 18th ed.”, *The Goodheart-Willcox Company*, South Holland, 230-246 (1979).
136. Ataer, Ö.E., Türkoğlu, H. ve Usta, H., “Ticari soğutucularda alternatif soğutucu akışkanlarının kullanımı”, *Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı*, Ankara, 20: 1-80 (1999).
137. Özdemir, M.B. ve Kırmacı, V., “Soğuk depo soğutma sisteminde kullanılan R-134a alternatif soğutucu akışkanına göre sistem eleman kapasitelerinin bilgisayar programıyla belirlenmesi”, *Teknoloji*, 9 (2): 91-100 (2006).

138. Odabaşoğlu, T. ve Usta, H., “Ticari soğutucularda alternatif soğutucu akışkan R-134a için kılcal boru uzunluğunun deneysel olarak belirlenmesi”, **13.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Konya, 128-132 (2001).
139. Türkoğlu, H., Ataer, Ö.E. ve Ataman, Ş., “Alternatif soğutucu akışkanlarının karşılaştırılması”, **12.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Sakarya, 516-521 (2000).
140. Ercan, E., “Düşük buharlaştırıcı sıcaklıklarında ticari soğutucular için alternatif soğutucu akışkanların karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 27 (1999).
141. Wang, L. and Sun, D.W., “Modelling vacuum cooling process of cooked meat-part 1: analysis of vacuum cooling system”, **International Journal of Refrigeration**, 25 (7): 854-861 (2001).
142. Houska, M., Podlucky, S., Zitny, R., Gree, R., Sestak, J., Dostal, M. and Burfoot, D., “Mathematical model of the vacuum cooling of liquids”, **Journal of Food Engineering**, 29 (3): 339-348 (1996).
143. Watson, J., “The freeze-drying of wet and waterlogged materials from archaeological excavations”, **Physics Education**, 39 (2): 171-176 (2004).
144. Truumees, E. and Herkowitz, H.N., “Alternatives to autologous bone harvest in spine surgery”, **Orthopaedic Journal**, 12: 77-88 (1999).
145. Rangahau, M.K., “Growing saffron - the world’s most expensive spice”, **New Zealand Institute for Crop and Food Research Institute**, 20: 1-4 (2003).
146. Baghalian, K., Shabani Sheshtamand, M. and Jamshidi, A.H., “Genetic variation and heritability of agro-morphological and phytochemical traits in Iranian saffron (*Crocus sativus* L.) populations”, **Industrial Crops and Products**, 31 (2): 401-406 (2010).
147. Kumar, R., “Calibration and validation of regression model for non-destructive leaf area estimation of saffron (*Crocus sativus* L.)”, **Scientia Horticulturae**, 122 (1): 142-145 (2009).
148. Abdullaev, F., “Biological properties and medicinal use of saffron (*Crocus sativus* L.)”, **2nd International Symposium on Saffron Biology and Technology**, 739: 339-345 (2007).
149. Zhang, H., Zeng, Y., Yan, F., Chen, F., Zhang, X., Liu, M. and Liu, W., “Semi-preparative isolation of crocins from saffron (*Crocus sativus* L.)”, **Chromatographia**, 59 (11): 691-696 (2004).
150. Gazor, H.R., “Equilibrium moisture content and heat of desorption of saffron”, **International Journal of Food Science and Technology**, 45 (8): 1703-1709 (2010).

151. Orfanou, O. and Tsimidou, M., "Evaluation of the colouring strength of saffron spice by UV-Vis spectrometry", *Food chemistry*, 57 (3): 463-469 (1995).
152. Bolandi, M., Shahidi, F., Sedaghat, N., Farhoush, R. and Mousavi-Nik, H., "Shelf-life determination of saffron stigma: water activity and temperature studies", *World Applied Sciences Journal*, 5 (2): 132-136 (2008).
153. Vurdu, H., Şaltu, Z. ve Ayan, S., "Safran (*Crocus sativus* L.)'un yetiştirme tekniği", *Gazi Üniversitesi, Kastamonu Orman Fakültesi Dergisi*. 2 (2): 175-187 (2002).
154. Maggi, L., Carmona, M., Zalacain, A., Kanakis, C.D., Anastasaki, E., Tarantilis, P.A., Polissiou, M.G. and Alonso, G.L., "Changes in saffron volatile profile according to its storage time", *Food Research International*, 43 (5): 1329-1334 (2010).
155. Leffingwell, J.C., "Saffron", *Leffingwell Reports*, 2 (5): 1-9 (2002).
156. Doymaz, İ., "Convective drying kinetics of strawberry", *Chemical Engineering and Processing*, 47 (5): 914-919 (2008).
157. Agrawal, Y.C. and Singh, R.P., "Thin layer drying studies on short grain rough rice", *Transactions of the ASAE*, 20 (1): 3525-3531 (1997).
158. Yaldız, O. and Ertekin, C., "Thin layer solar drying of some different vegetables", *Drying Technology*, 19 (3): 583-597 (2001).
159. Chninman, 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).
160. Yagcioğlu, A., Değirmencioğlu, A. and Cağatay, F., "Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions", *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy*, Adana, 565-569 (1999).
161. Madamba, P.S., Driscoll, R.H. and Buckle, K.A., "Thin layer drying characteristics of garlic slices", *Journal Food Engineering*, 29 (1): 75-97 (1996).
162. Sharaf-Elden, Y.I., Blaisdell, J.L. and Hamdy, M.Y., "A model for ear corn drying", *Transactions of the ASAE*, 23 (5): 1261-1265 (1980).
163. Wang, C.Y. and Singh, R.P., "Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying", *Transactions of the ASAE*, 78 (1) 3001-3008 (1978).
164. Kassem, A.S., "Comparative studies on thin layer drying models for wheat", *In 13th International Congress on Agricultural Engineering*, Morocco, 6: 2-6 (1998).

165. Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. and Wratten, F.T..” Effects of drying air parameters on rice drying models”, *Transactions of the ASAE*, 28 (1): 296-301 (1985).
166. Pangavhane, D.R., Sawhney, P.N. and Sarsavadia, P.N., “Effect of various dipping pretreatments on drying kinetics of thompson seedless grapes”, *Journal Food Engineering*, 39 (2): 211-216 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ACAR, Bahadır
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 02.01.1979 Sivas
Medeni hali : Evli
Telefon : 0370 433 82 00
Faks : 0370 433 82 04
e-mail : acar@karabuk.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Karabük Üniversitesi Fen Bilm. Enst. Makine Eğitimi Bölümü	2007
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü	2001
Lise	Yozgat End. Meslek Lis.	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-	Karabük Üniv. Teknik Eğitim Fak. Makine Eğitimi Bölümü	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce