



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

SELÜLOZİK KABUK YAPILI AYÇİÇEĞİNİN KURUTULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dila Seray KONUKLUK

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2022

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SELÜLOZİK KABUK YAPILI AYÇİÇEĞİNİN KURUTULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dila Seray KONUKLUK

(19233483013)

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ferdi FELLAH

Eylül 2022

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19233483013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Dila Seray KONUKLUK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SELÜLOZİK KABUK YAPILI AYÇİÇEĞİNİN KURUTULMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet Ferdi FELLAH**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Oğuzhan İLGEN**
Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ayşenur YEŞİLYURT
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi **: 28 Eylül 2022**
Savunma Tarihi **: 13 Eylül 2022**



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Dila Seray KONUKLUK

İmzası:

X X X X



Annem'e,

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez çalışmam boyunca desteğini ve motivasyonunu esirgemeyen danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Ferdi FELLAH'a ve analizlerim sırasında yardımcı olan üniversitemiz araştırma görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2022

Dila S. KONUKLUK



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Ayçiçeğinin Kullanım Alanları	3
1.2 Ayçiçeğinin Kabuk Yapısı	9
1.3 Ayçiçeği Küşpesi.....	9
1.4 Selülozik Yapı	9
1.5 Ayçiçeği Ekilimi ve Büyüme Evreleri	10
1.6 Literatür Araştırması	11
2. KURUTMA VE KURUTMA YÖNTEMLERİ	14
2.1 Kurutmayla İlgili Teorik Bilgiler	14
2.1.1 Islak nemlilik.....	14
2.1.2 Kuru nemlilik	15
2.1.3 Denge nemi	15
2.1.4 Su aktivitesi.....	15
2.1.5 Yaş termometre sıcaklığı	15
2.1.6 Kuru termometre sıcaklığı:	15
2.1.7 Mutlak nem	15
2.1.8 Bağıl nem	15
2.2 Kuruma Sırasında Isı ve Kütle İletimi.....	16
2.3 Kurutma Prensipleri	18
2.4 Matematiksel Modelleme	20
2.5 Doğal Kurutma Yöntemleri.....	22
2.5.1 Güneşte kurutma	22
2.5.2 Gölgede kurutma	24
2.6 Yapay Kurutma Yöntemleri	26
2.6.1 Konveksiyon kurutma	27
2.6.2 Kondüksiyon kurutma	29
2.6.3 İletimle kurutma	29
2.6.4 Radyo frekanslı kurutma	30
2.6.5 Radyasyon kurutma.....	30
2.6.6 Mikrodalga kurutma.....	31
2.6.7 Vakumda kurutma	33
2.6.8 Akışkan yataklı kurutma	33

2.6.9 Akışkanlaştırılmış kurutma	34
2.6.10 Vakumlu kurutma	34
2.6.11 Isı pompalı kurutma	36
2.6.12 Kızılötesi kurutma	37
2.6.13 Tünel tipi kurutucu ile kurutma	38
2.6.14 Konveyör tipi kurutucu ile kurutma	38
2.6.15 Döner kurutucular ile kurutma	38
2.6.16 Turbo kurutucu ile kurutma	39
2.6.17 Dielektrik kurutma	39
2.6.18 Ozmotik kurutma	39
2.6.19 Sprey (püskürtmeli) kurutucular ile kurutma	39
2.6.20 Süper kritik CO ₂ kurutma	40
2.6.21 Tepsili (Raflı) kurutucu ile kurutma	41
2.7 Dondurarak Kurutma	41
2.7.1 Dondurma safhası	44
2.7.2 Birinci kurutma safhası	45
2.7.3 İkinci kurutma safhası	45
2.8 Süblimasyon	45
3. KURUTMA KİNETİĞİ VE MATEMATİKSEL MODELLERİ	47
3.1 İnce Tabaka Kurutma İşleminde Kullanılan Modeller ve Denklemler	47
4. MATERYAL VE YÖNTEM	50
4.1 Materyal	50
4.2 Kullanılan Cihaz	51
4.2.1 Cihazın bölümleri	51
4.3 Yöntem	52
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	54
5.1 Nem İçeriği Grafikleri	56
5.2 Kurutma Öncesi ve Sonrası Tepsili Kurutucu Rafındaki Görünümü	59
5.2.1 40 derece 0,7 m/s akış hızı ile ayçiçeği	59
5.2.2 40 derece 1 m/s akış hızı ile ayçiçeği	59
5.2.3 40 derece 1,5 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)	60
5.2.4 50 derece 0,7 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)	60
5.2.5 50 derece 1 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)	61
5.2.6 50 derece 1,5 m/s akış hızı ile ayçiçeği	61
5.2.7 60 derece 0,7 m/s akış hızı ile ayçiçeği	62
5.2.8 60 derece 1 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)	62
5.2.9 60 derece 1,5 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)	63
6. SONUÇLAR	67
KAYNAKLAR	70
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ	85

KISALTMALAR

AHE : Azalan hızla kuruma evresi

BTU : Bursa Teknik Üniversitesi

IE : Materyalin ısınma evresi

SHE : Sabit hızla kuruma evresi



SEMBOLLER

a, b, c, g, h	: Katsayılar
CO_2	: Karbondioksit Gazı
g/dk	: Kurutma hızı
k, k_0, k_1, k_2	: Kurutma sabitleri, (min^{-1})
L_k	: Materyalin kalınlığı (mm)
m/s	: Hız birimi (metre/saniye)
M	: Kütle (t anındaki)
M_0	: Kütle (Başlangıçtaki)
M_e	: Denge Nemi
M_R	: Nem oranı
n	: Kurutma parametresi
t	: Kurutma süresi (d)
X_c	: Ürün yüzeyinde kurumunun başladığı noktaya kritik nokta

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Kurutma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	46
Çizelge 3.1: Kurutma eğrisi modelleri.....	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: A) Ayçiçeği tohumunun ekimi sonrası toprak üstüne çıkması, B) Ayçiçeği tohumunun otsu gövde oluşturduğu evre.	10
Şekil 1.2: C) Ayçiçeği tohumunun ekilmesi sonrası 2 yaprak çıkarması, D) Ayçiçeği tohumunun ekilmesi sonrası 4 yaprak çıkarması, E) Ayçiçeği tohumunun ekilmesi sonrası 6 yaprak çıkarması.	10
Şekil 1.3: F) Ayçiçeği gübrelenme zamanı, G) Ayçiçeği çiçeklenme zamanı, H) Ayçiçeği çekirdeğini oluşturmaya başladığı dönem.	11
Şekil 1.4: J) Ayçiçeği kuruduğu dönem, K) Ayçiçeği kuruma sonrası toplanması. ...	11
Şekil 2.1: Ürün nem içeriğinin kurutma süresi ile ilişkisi [116].	17
Şekil 2.2: Kurutma hızının kurutma süresi ile ilişkisi [116].	17
Şekil 2.3: Sabit dış koşullar altında tipik kuruma hızı eğrisi.	19
Şekil 4.1: Tepsili kurutucu[115].	51
Şekil 4.2: Tepsili kurutucu bölümleri[115].	51
Şekil 5.1: 40°C Sıcaklıkta ayçiçeği kuruma grafiği.	54
Şekil 5.2: 40°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma grafiği.	54
Şekil 5.3: 50°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma grafiği.	55
Şekil 5.4: 50°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma grafiği.	55
Şekil 5.5: 60°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma grafiği.	55
Şekil 5.6: 60°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma grafiği.	56
Şekil 5.7: 40°C Sıcaklıkta ayçiçeğinin kurutma nem-süre grafiği.	56
Şekil 5.8: 40°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma nem-süre grafiği.	57
Şekil 5.9: 50°C Sıcaklıkta ayçiçeğinin kurutma nem-süre grafiği.	57
Şekil 5.10: 50°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma nem-süre grafiği.	57
Şekil 5.11: 60°C Sıcaklıkta ayçiçeğinin kurutma nem-süre grafiği.	58
Şekil 5.12: 60°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma nem-süre grafiği.	58
Şekil 5.13: Analiz öncesi, analiz sonrası.	59
Şekil 5.14: Analiz öncesi, analiz sonrası.	59
Şekil 5.15: Analiz öncesi, analiz sonrası.	60
Şekil 5.16: Analiz öncesi, analiz sonrası.	60
Şekil 5.17: Analiz öncesi, analiz sonrası.	61
Şekil 5.18: Analiz öncesi, analiz sonrası.	61
Şekil 5.19: Analiz öncesi, analiz sonrası.	62
Şekil 5.20: Analiz öncesi, analiz sonrası.	62
Şekil 5.21: Analiz öncesi, analiz sonrası.	63
Şekil 5.22: 40°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma hızı grafiği.	64
Şekil 5.23: 40°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ön işlem uygulanmış ayçiçeği kurutma hızı grafiği.	64
Şekil 5.24: 50°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma hızı grafiği.	65
Şekil 5.25: 50°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ön işlem uygulanmış ayçiçeği kurutma hızı grafiği.	65
Şekil 5.26: 60°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma hızı grafiği.	66

Şekil 5.27: 40°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ön işlem uygulanmış ayçiçeği kurutma hızı grafiği.....	66
Şekil 5.28: Minitab program çıktısı (pvalue < 0,5).	67
Şekil 5.29: Minitab programı regresyon analizi dağılımı (süreye karşı akış hızındaki nem değeri).....	68
Şekil 5.30: Minitab programı regresyon analizi %99 güven aralığındaki dağılım....	68
Şekil 5.31: Minitab programıyla dağılımın modellenmesi.....	69



SELÜLOZİK KABUK YAPILI AYÇİÇEĞİNİN KURUTULMASI

ÖZET

Ayçiçeklerinin çekirdekleri, tepsili kurutucu yardımıyla 3 farklı sıcaklık ve 3 farklı akış hızı kullanılarak, ön işlem (dondurulma) uygulanmış ve ön işlem uygulanmamış şekilde kurutma işlemi yapılmıştır. 3 farklı sıcaklık olarak cihazın maksimum değeri ve kurutma imkanları göz önüne alınarak 40 – 50 – 60 °C sıcaklıklar seçilmiş ve bu sıcaklıklarda işlem yapılmıştır. Bu sıcaklıklar üzerinde cihazın fanı yardımıyla farklı akış hızları eklenerek, donmuş ve donmamış ayçiçeğinin kuruma işlemi tamamlanmış, nem kayıpları hesaplanmış ve bu verilerle eğrileri ve grafikleri çıkartılmıştır. Akış hızının seçiminde çalışılan tepsili kurutucu cihazın minimum kapasitesindeki değerler seçilmiştir. Bu değerler ; 0,7 – 1 – 1,5 m/s olup hava akış hızları her bir sıcaklığa ek olarak değerlendirilip ayçekirdeklerinin kuruma grafikleri ve nem eğrileri çıkarılmıştır. 3 ayrı sıcaklık, 3 farklı akış hızında kuruma- zaman eğrileri ve nem değerleri hesap edilerek bu eğrilerin minitab programı ile regresyon analizleri yapılmıştır. Program çıktısına göre elde edilen matematiksel denklemlere uygun matematiksel modelleri değerlendirilmiş ve kinetik modelleri incelenmiştir. Bu matematiksel modele ait uygun kuruma kinetik modeli seçilmiştir. Ayçiçekleri toplandığı gibi işlenmemiş ve toplandıktan sonra ön işlem olarak dondurulup kurutma cihazına alınarak farklı sıcaklık ve akış hızlarının, kuruma üzerindeki etkileri gözlenmiş ve sıcaklık artışının kuruma üzerindeki zamanı kısaltan etkisi ve akış hızı artışının kuruma işlemindeki zamanı kısaltan etkisi gözlenerek bu sürelerin birbirleriyle kıyaslanmaları sağlanmıştır. Dondurma işleminin ayçiçeklerinin kurumasında zamanı azaltan bir etkiye sahip olduğu, dondurulan ayçiçeklerinin, aynı sıcaklık ve akış hızındaki direkt olarak kurutma işlemine tabi tutulan ayçiçeklerinden daha hızlı kuruduğu belirlenmiştir. Bu kıyaslamaya ait uygun kurutma kinetiği modeli belirlenmiştir. Uygun sonuçlar için 40 °C sıcaklık ve 1m/s akış hızı seçilerek çıkarılan regresyon analizinde ayçiçeğinin kurutma modelinin Wang ve Singh (1978) modeline en yakın olduğu %98 güven aralığında modelin benzediği belirlenmiştir. Farklı kinetik modellerle işlem denenmiş, fakat güven aralığı en yüksek olan değer Wang ve Singh (1978) kurutma kinetiği modeli olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Ayçiçeği Kurutulması, Kurutma Kinetiği, Matematiksel Model, Tepsili Kurutucu, Kurutma Grafikleri, Kurutma Kinetiği Modelleri.

DRYING OF CELLULOSIC SHELLED SUNFLOWER

SUMMARY

Sunflower seeds were dried using a tray dryer at 3 different temperatures and 3 different flow rates, with pre-treatment (freezing) and without pre-treatment. Considering the maximum value of the device and drying possibilities as 3 different temperatures, temperatures of 40 – 50 – 60 °C were selected and processes were carried out at these temperatures. By adding different flow rates with the help of the device's fan at these temperatures, the drying process of frozen and unfrozen sunflower seeds was completed, moisture losses were calculated, and curves and graphs were drawn with these data. In the selection of the flow rate, the values in the minimum capacity of the tray dryer device were selected. These values are; 0.7 – 1 – 1.5 m/s air flow rates were evaluated in addition to each temperature and drying graphs and humidity curves of sunflower seeds were obtained. Drying-time curves and humidity values were calculated at 3 different temperatures, 3 different flow rates, and regression analyzes of these curves were made with the minitab program. The mathematical models suitable for the mathematical equations obtained according to the program output were evaluated and the kinetic models were examined. The appropriate drying kinetic model of this mathematical model was chosen. Sunflowers were not processed as they were collected, and after they were collected, they were freeze-dried as a pre-treatment, and the effects of different temperatures and flow rates on drying were observed. It was determined that the freezing process has a time-reducing effect on the drying of sunflowers, and the frozen sunflowers dry faster than the sunflowers that are directly dried at the same temperature and flow rate. The appropriate drying kinetics model for this comparison was determined. In the regression analysis obtained by choosing 40 °C temperature and 1 m/s flow rate for suitable results, it was determined that the drying model of sunflower was closest to the Wang and Singh (1978) model and the model was similar at the 98% confidence interval. The process was tried with different kinetic models, but the value with the highest confidence interval was calculated as Wang and Singh (1978) drying kinetic model.

Keywords: Sunflower Drying, Drying Kinetics, Mathematical Model, Tray Dryer, Drying Graphs, Drying Kinetic Models.

1. GİRİŞ

Ayçiçeği bitkisi (*Helianthus annuus* L.); Asterales takımından, Asteraceae familyasına dahil olan *Helianthus* cinsinden *Helianthus annuus* L. bitkisel gövdeli tek yıllık yetiştirilen bir bitkidir. *Helianthus* cinsi kendi türlerinden 51 farklı ve alt türlerinde de 19 farklı türe sahiptir. Bu türlerin 14 tanesi tek yıllık, daha fazlası da çok yıllık gövde ve yapıya sahip olup farklı gen yapıları vardır. Ayçiçek bitkisinin alt türlerinde temel kromozom sayısı $n=17$ olup, çok hücreli yapıları da bulunmaktadır. Ayçiçeğinin büyük çoğunluğu dekor bitkisi olup, diğer 2 önemli türüde; *Helianthus annuus* ve *Helianthus tuberosus* gıda amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu günlerde yüksek değerde yağ içeren bitkilerden olan ayçiçeği tohumunun (*Helianthus annuus* L.) ilk çıkış yeri Kuzey ABD olarak bilinmektedir.

Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L), soya fasulyesi ve kolzadan sonra dünya çapında en önemli üçüncü yağlı tohum bitkisidir ve yağ, küspe, şekerleme ürünleri, hayvan yemi (sapları) ve bir dizi endüstriyel uygulamada, örneğin temel komposto üretiminde kullanılır. Polimer sentezi, biyoyakıt, emülgatör veya yağlayıcılar için uygun değildir. Ayçiçeğinde tüylü küfe neden olan yıkıcı bir patojendir. Verim üzerindeki küresel etki, ticari tohum üretiminde %3,5'lik bir azalma olarak tahmin edilmiştir ancak verim kayıpları kontamine bir alanda %100'e ulaşılabilir [1].

Bodurluk, yapraklarda klorotik bir mozaik yapı olup büyümede azalma ve ikincil metabolizmada değişikliklerle gözlenir. Enfekte bitkiler üreme aşamasına ulaştığında, kontamine tohumlar ilkeldir ve sağlıklı tohumlardan çok daha küçüktür. Enfeksiyonlar dört yapraklı aşamadan sonra meydana geldiğinde ortaya çıkan bitkiler tipik olarak sağlıklı görünürler ancak patojeni gizli bir modda taşıyabilirler; bu bitkilerin, hastalıklı ayçiçeği parçaları incelenerek rapor edilmiştir. Olgun kapitulumun olağandışı bir açısı ve gecikmiş yaşlanma tarif edilmiş olmasına rağmen, semptomsuz enfekteli bitkiler neredeyse normal bir fenotip geliştirir. Gizli enfeksiyonlu bitkiler, sessiz sporlar içeren tohumlar üretebilir ve bu da tipik semptomları olan herhangi bir bitki tespit edilmeden önce hastalığın yaygın bir şekilde yayılmasından sorumlu olarak, gizli enfeksiyonlu daha fazla bitkiye yol

açabilir. Üst yapraklarda lokal yaprak enfeksiyonlarından sistemik enfeksiyona geçiş (ikincil enfeksiyonlar) normal görünümde kontamine tohumlara neden olarak hastalığın yayılma riskini arttırabilir.

M.Ö.3000'li yıllarda ayçiçeği, yağ çıkarılmak amacıyla ekilmeye başlanmıştır. Önceleri İspanya'ya sonraki yıllarda Avrupa ülkelerinde yayılmıştır. Önceleri kullanım amacı süs bitkisi olsada, sonraki zaman diliminde, Avrupa'da yağ bitkisi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye'de kullanılmaya başlaması ise 1. Dünya savaşı sonrası Avrupadan gelen göçmenler tarafından getirilerek yayıldığı tahmin edilir. Ülkemizde ülkenin Avrupa komşusu olan Marmara bölgesinin kuzeyinde yayılmış, oradan da ülkemizin büyük kısmına dağılmıştır. Ayçiçeğinin biyolojik yapısal özellikleri toprak yapısına ve yetiştiği bölgenin iklimine bağlıdır. Genel olarak deniz seviyesinde ve rakımı daha yüksek bölgelerde ekimi yapılabilmektedir. Bitkinin boyu büyüme evrelerine göre değişkenlik gösterip, 1 ile 1,5 metre aralığında olmaktadır. Çeşidine göre gövde yapısı tüylü ve dallı olabilmektedir.

Ortak adı ayçiçeği olan *Helianthus annuus*'un 2016 yılında dünya üretimi 45,75 milyon ton olmuştur. Başlıca üretici ülkeler Ukrayna %30,6; Rusya %24,0; Arjantin %7,4 ve Çin %6,2 idi. Meksika, üretimin yalnızca %0,28'i ile katkıda bulundu ve bu mahsul için ayrılan alan, devam eden önemli bir artış kaydetti. Ayçiçeği (*Helianthus annuus*), dünyanın önde gelen yağlı tohum bitkilerinden biridir ve toplam yüksek oleik yağ üretimi için sadece soya fasulyesinden sonra ikinci sıradadır. Kurutma, taşıma, ayırma, kabuktan ayırma ve depolama sistemleri kapasitesine sahip özel ekipmanların tasarımına ve geliştirilmesine izin veren önemi ve fiziksel özelliği burada yatmaktadır. Ayçiçeği tohumlarının dehidrasyonundan sonra, kabuk ayırma işleminin tasarımı için faydalı olabilecek spesifik fiziksel özellikleri, yüzeylere, küreselliğe ve depolama sistemlerine bağlıdır.

Bitkinin içeriğindeki yağ oranı yaklaşık %50 civarında olmaktadır. Bitki içeriğindeki elde edilen yağ oranı, karbon dizilimine göre doymuş ve doymamış yağ olarak endüstriyel anlamda yağ içermektedir. Bu oranın büyük çoğunluğunu doymamış yağ asitleri oluşturmaktadır. Doymamış yağ asitlerinin de yaklaşık %50'sini linoleik asit ve geri kalan kısmını oleik asit oluşturmaktadır. Doymamış yağ içeriğinin büyük kısmı olan linoleik asit, çıkarılan yağlı kısmın doymamışlığını arttırmakta, bu sebeple kan hücrelerine karışması kolay yoldan olmaktadır. Ürün içerisinde bu asitin fazla

olması ürünün yağ kalitesini artırmakta ve hücre yapısına katılabildiğinden kolesterolün düşürülmesine yardımcı olmaktadır.

Ayçiçeği (*Helianthus annuus L.*), çeşitli besin maddeleri sağlayan en popüler tohumlardan biridir ve modern sağlıklı diyetlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tohumlar; özellikle mutfak, şekerleme ve unlu mamüllerde, aperatif yiyecek olarak veya işlenmiş gıdaların bir bileşeni olarak tüketilebilir. Ayçiçeği tohumları çiğ veya kavrulmuş olarak kullanılabilir. Doymamış yağlar; lif, linoleik asit, selenyum, bakır, çinko ve vitamin E ve B vitamini kaynaklarıdır. Tohumların kafeik, klorojenik ve ferulik asitler gibi değerli bir antioksidan kaynağı olduğu gösterilmiştir.

Tohum kalitesi esas olarak temel bileşenin içerik kısmından anlaşılır. Daha doğrusu oksidasyona karşı kararsızlığı ve duyarlılığı açısından yağ elde edilen bitkilerin kalitesi anlaşılır. Ayçiçeği tohumlarında birincil ve ikincil oksidasyon ürünlerinin mevcudiyeti, besin değeri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir, organoleptik yapı bir gıda ürününün güvenliğini ve raf ömrünü azaltır.

Tohumda bulunan hidrolitik aktivite, peroksidazlar ve lipoksijenazlar, triaçilgliserollerini parçalayan bir acılaştırma sürecine neden olur. Bu nedenle, bir tohum için kalite kriterlerinden biri serbest yağ asitlerinin seviyesidir. Lipitlerin kimyasal bileşimi (yağ asitlerinin bileşimi ve doğal antioksidanların ve prooksidanların içeriği) ve belirli bir yağın çevresel faktörlere duyarlılığı, doğal, rafine edilmemiş yağlardaki oksidatif değişiklikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yağın oksidatif stabilitesi, böyle bir ürünün gıda amaçlı uygunluğunu belirleyen çok önemli bir kalite faktörüdür.

1.1 Ayçiçeğinin Kullanım Alanları

Ayçiçeği, kullanım amacı olarak yağ, yiyecek ve bitkisel ilaç olarak kullanıldığına dair çeşitli eski medeniyetlere ait kanıtlar bulunmuştur. Bitkisel ilaç ve medikal tedaviler için Yunan, Hindistan ve Mısır uygarlıklarında kullanıldığı bilinmektedir. Dünya sağlık örgütünün araştırmalarında çıkan sonuçların verilerine göre gelişim düzeyi yüksek ülkelerde bitkisel ilaçların kullanımında nüfusun büyük çoğunluğunun tercih ettiğini göstermektedir. Ayçiçeği tohumları da bu gibi medikal tedavilerde kolesterol üzerinde doğal yoldan azaltan bir etkisi olduğundan kullanımda tercih edilmiştir. Ayçiçeği üzerinde yapılan araştırmalarda bitkinin tohumları hastalıklara

karşı bağıışıklık güçlendirici etki sağladığı, kalbin çalışmasına yardımcı olduğu, bağırsakların çalışmasında destekleyici ve cilt üzerinde esneklik sağlayıcı bi etki yarattığı değerleri bilinmektedir. Ayçiçeği tohumları yüksek derecede E vitamini, lignin, kolin, arjinin, betain, ve fonelik asit deposudur. Çeşitli sindirim yolu hastalıklarının riskini azalttığı, cilt ve kalp hastalıklarının riskini azalttığı, selenyum içeriğinin fazla olmasından dolayı meme kanserini koruyucu özelliğe sahiptir. Çeşitli mantar hastalıklarında, enfeksiyonlu deri hastalıklarını iyileştirmek amaçlı tedavilerde kullanılabilir. En bilinen özelliklerinden biri de E vitamini yönünden zengin olduğu için antioksidan etki sağlamak, yüksek tansiyonu dengelemek, kolesterolü düşürmeye yardımcı olmaktadır. Hormonal salgıları ayarlamakta, gen dizilimindeki oluşan zararları onarmakta ve kandaki şeker oranını dengeli halde tutmakta etkili rol oynar. Ayçiçeği tohumu içerişindeki bileşenler çeşitli enfeksiyonlara ve sindirim yolu ve karaciğer hastalıklarında tedavi edici amaçla tercih edilmektedir. Ayçiçeği yağı da kansere karşı koruyucu etki sağlar.

Hastalıkların ilerlemesinden kaynaklı yeni çıkarılan tedavi yöntemlerinin maliyetlerinin fazla olması ve ayçiçeği içerişinde bulunan kafeik, ferukikasit, klorogenik gibi metabolikleri yüksek oranlarda olan anti oksidan ve anti mutojenik özelliğinin bulunması sayesinde maliyetlerin düşürülmesinde olumlu etkisi vardır. Serbest haldeki radikal hücreleri üreterek mutajen bakterilerin fiziksel aktivitelerini engelleyerek olumsuz etkilerini yok eder.

Lenf nodüllerinin artmasını engellemek amacıyla ayçiçeği yağının sıvı özütü medikal tedavilerde tercih edilir.

Bitkiler kuraklık dahil, dünya çapında bitki büyümesini ve verimini azaltabilecek farklı stres türlerine maruz kalmaktadır. Asya, Avustralya, Afrika, Avrupa ve Amerika da dahil olmak üzere dünyanın farklı bölgelerinde küresel ısınma konusuna ilişkin stres yoğunlaşmaktadır. Kuraklık stresinin bitki morfolojisi ve fizyolojisi üzerindeki etkileri, bitki büyümesini ve verim üretimini azaltmaktadır. Toleranslı bitki türlerinin kullanımı, bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR), biyofiziksel ve biyomedikal yöntemler ve uygun gübreleme dahil olmak üzere bitki büyümesi üzerindeki kuraklık stresini hafifletmek için şimdiye kadar farklı yöntemler kullanılmıştır. Stomaların kapanması, prolin birikimi ve bitki savunma mekanizmalarının uyarılması dahil olmak üzere farklı mekanizmalar kuraklık stresi altında bitki toleransını artırabilir. Araştırmalar, uygun gübreleme kullanımının stres

dahil farklı koşullar altında mahsul bitki toleransını artırabileceğini göstermiştir [2]. Potasyum içeren besinler, bitkilerde farklı streslere karşı bitki toleransının artırılması da dahil olmak üzere önemli işlevlere sahiptir. Her besin maddesi, biyokimyasal özelliklerine bağlı olarak bitki fizyolojisini ve morfolojisini etkileyebilir. Yazarlar, toleranslı türlerin kullanımı ve yetiştirme teknikleri dahil olmak üzere genetik araçların kullanılması, bitki potasyum verimliliği ve stres dahil farklı koşullar altında bitki büyümesinin artmasını önerdi. Bu, potasyumun bitkide daha iyi alınması ve translokasyonu ile sonuçlanabilir.

Birçok bitkinin yapısında bulunan P-kumarin ve Tanin ayçiçek yağının içeriğinde bulunan önemli yapılar olup, kanser hastalığının oluşumunu engelleyici metabolik yapılardır. Kanser hücrelerinin gelişimini engellerken, diğer hücrelerin gelişimine etki etmez. Ayçiçeği kabuğunun yapısını parçalayabilecek selüloz enzimleriyle parçalanması, şeker değerini yükselttiğinden maddelerin mayalanmasını sağlamaktadır. Ayçiçeği kabuğu ligno-selülozik bir yapıda olduğundan, yiyecek maddelerinin çürümesi sonucu oluşan şeker üretiminde kullanılan değerli bileşiklerin dönüşümünde düşük maliyetli ve uygulaması kolay bir kaynaktır. Ayçiçekleri büyük baş hayvan yemi olarakta kullanılabilir.

Endüstrilerden gelen gıda atıklarını hayvan yemi olarak kullanmanın yenilikçi konsepti, geleneksel hayvan yemlerinde kullanılan pahalı tahılları satın almaya kıyasla daha düşük fiyattan yararlanmanın yanı sıra atık oluşumunun azaltılmasına yardımcı olur. Hayvan yemi için pelet olarak ayçiçeği kabuğu üretimi, daha yüksek tahıl harcamasını azaltmaya yardımcı olabilir. Tüketim mallarının büyümesi ve artan talebi, sonuç olarak üretim sürecinden kaynaklanan atık miktarını yoğunlaştırdı. Bu açıdan bakıldığında, hayvan yemi kaynağı olarak pahalı tahıl için uygun ikameyi bulmak ve aynı zamanda endüstriyel yan ürün kullanarak üretim sürecinden kaynaklanan atık miktarını azaltmak için araştırmalar yürütülmektedir. Ayçiçeği tohumu zaten hayvan yemi olarak formüle edilmiş olsa da ayçiçeği kabuğunun büyüme performansını ve karkas verimini etkileyebilecek daha yüksek lif içeriği nedeniyle atık ayçiçeği kabuğunun kullanımı henüz dahil edilmemiştir. Bununla birlikte, ayçiçeği kabuğu, pelet içindeki lif içeriğini artıran, böylece soya fasulyesi gibi pahalı tahılların kullanımını azaltmanın yanı sıra hayvan yeminin besin değerini artıran pelet formülasyonunun bir parçası olarak formüle edilebilir.

Bunun nedeni yem olarak tercih edilen saman ile benzer oranlarda sıvı tutma değerine sahip olmasıdır. Selülozik yapısı sayesinde kağıt sanayinde ve malzeme endüstrisinde kullanılabilir olduğundan, dolgu ve yalıtım malzemesi olarak tercih edilen değerli malzemelerdendir. Kabuk yapısında bulunan tosiyanin içeriği kırmızı renkli boyar madde olarak, gıda sanayinde doğal olarak tercih edilir. Ayrıca gıda endüstrisinde kırmızı ve pembe rengini doğal yoldan karşıladığı için antosiyanin kaynağı olarak oldukça önemlidir. Ayçiçeğinin taç yaprakları da sarı boyar madde olarak kullanılabilir. Çiçeğinin yenilebilir kısımları, ekmek ve salata yapımında tüketilir [3].

Tarım alanları değerlendirildiğinde ülkemiz yüzölçümü çokluğu bakımından ülkeler arasında 4. Sırada yer almaktadır. Ülkemizin ekilebilir tarımsal alanları yaklaşık olarak %38 ini oluştururken, yaklaşık %44'ü orman arazilerini ve %10 u boş arazileri, yaklaşık %7'si de sebze ya da meyve ekilen arazileri kapsamaktadır. Ülkemizin tarımsal olarak çıkarılan ürün atığı, tarım ülkesi olduğundan yüksek oranlara ulaşmaktadır. Bu oran yaklaşık 50 milyon ton civarında katı atık olarak çıkmaktadır. Bu çıkarılan katı atıklar, hayvan yemi olarak tüketilebilir, aynı zamanda geri dönüşebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir. Kalan kısmı da stok ve aktarım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı tarlada bırakılır. Tarım ürünleri işlenirken ortaya çıkan doğal yoldan oluşan atıklar, çevre kirliliğine sebep olmakta ve depolanma problemleri ortaya çıkarmaktadır. Tarımsal atıklar geri dönüşebilir olduğundan, yapılarında bulunan lignoselülozik bileşiklerin ve diğer bileşenlerinin biyokütlesinin değerlendirilmesi endüstriyel açıdan önemlidir. Ayçiçeği kabuk yapısında bulunan ve tarımsal atık olarak sap, saman gibi kısımlarla birlikte değerlendirilmeyen selüloz, rami bitkisi, sisal bitkisi ve oduna, pamuk gibi kaynakların alternatifi olarak değerlendirilir. Ayçiçeği dışında pirinç kabuğu, mısır sapı, şeker pancarı sapı, şeker kamışı küspesi, pamuk sapı ve buğday samanından da doğal selüloz elde edildiğine dair araştırmalar bilinmektedir. Katı atık olarak değerlendirilen, selüloz liflerin küçük yapı taşları olan mikro selüloz partiküllerine ayrışmasında yüksek değere sahiptir. Ayçiçeğinin atıklarına, tarımsal anlamda kolay ulaşılabilir ve düşük maliyet sayesinde doğal yaşam kaynağına destek olarak yüksek oranda selüloz içermesi ve içerisindeki lignin'i uzaklaştırmak daha az miktarda kimyasal ile karşılanabilmektedir. Bu da nanoselüloz üretimindeki dezavantajlar üzerinde tercih edilmesini sağlar. Nanoselülozun içeriği başlıca 2 gruba ayrılır. Bu

gruplar tercih edilen bitkinin yapısına ve bitki türüne göre; mikrofibrillenmiş selüloz ve nanokristalleridir. Bu 2 bileşenin kompozit gibi kompleks malzemelerin içeriğinde katkı olarak kullanımı mevcuttur. Selüloz nanokristellerinin yapı içinde malzemenin dayanım özelliklerini artırması nedeniyle daha çok uygulama alanında görülmektedir. Bitki hücreleri yapısında bulunan dış çeper olan selüloz, çok yapılı bir polimer olup, dünya üzerinde en çok karşılaşılan yapıdır. Mısırlıların kullandığı papirüslerde, ayakkabı ve çanta yapımında ve kağıt malzemesi olarak selüloz kullanılmıştır. Selülozun kimyasal yapısı Fransız kimyager Payen sayesinde 1800'lü yıllarda bulunmuştur [4].

Hindistan'da yağ, esas olarak bütün ayçiçeği tohumlarından mekanik ekspresyonla elde edilir. Bununla birlikte, bu süreç bazı dezavantajlardan muzdariptir. Tohumun kabuğu, makinelerin hızlı aşınmasına ve yıpranmasına neden olur. Gövde, yağı alınmış küspenin besin değerini düşürür ve aynı zamanda yağ geri kazanımını da azaltır.

Yağ endüstrisinde, çözücü ile yağ çıkarma işlemi için uygun bir yığın gözeneklilik elde etmek amacıyla, kalan kabukların yaklaşık %10-12'sine kadar ayçiçeği tohumlarının kısmi kabuğunun çıkarılması oldukça yaygındır. Ham yağın kalitesi (düşük mum içeriği ve iyileştirilmiş renk) ve yağı alınmış küspenin (düşük lif ve yüksek protein içeriği) her ikisi de perikarpın tohumdan kırılma ve ayrılma yeteneğiyle yakından ilişkilidir (yani kabuk ayırma). Tohumların yeteneği, teknenin verimli olmayan bir şekilde çıkarılması, petrol endüstrisinde kullanılan makinelerin ömrünü kısaltır. Tohumların kabuk ayırma işlemi sırasında üretilen ince taneler (2 mm'den küçük malzeme), aspirasyon işlemi sırasında lipid malzeme kaybı ile birlikte gövde ile birlikte gidebilir. Bu nedenle, yağ verimindeki kaybı en aza indirmek ve teknenin verimli bir şekilde ayrılması gerekir. Kabuktan ayırma işlemi sırasında daha düşük ince parçacık yüzdesi arzu edilir.

Ayçiçeği tohumu, tipik olarak gıda, kozmetik ve hayvan yemi endüstrilerinde kullanılan bir hammaddedir. Yağını yakıt olarak kullanma olasılığı da vardır. Esas olarak, ekimden 101-121 gün sonra çiçekler, %15 ile %50 arasında değişen bir nem seviyesi ile hasat edilir. Bu nedenle, tohum kalitesini korumak ve tohumdaki olumsuz fiziksel ve kimyasal değişiklikleri önlemek için ayçiçeği tohumu hasattan hemen sonra ısıl işleminden geçirilmelidir.

Kurutma, hem biyolojik aktiviteyi hem de depolama sırasında meydana gelen kimyasal ve fiziksel bozulmaları azaltmak için yaygın olarak kullanılan hasat sonrası süreçlerden biridir. Zararlar ayçiçeği çekirdekleri kurutulduğunda minimumda tutulur.

Termal işlemlerin avantajlarına rağmen, ısıya duyarlı özelliği ile tarımsal bazı ürünlerin kalitesi yüksek sıcaklıklar kullanıldığında azalır. Geleneksel bir kurutma işlemini yoğunlaştırmak gibi aktarım yapılan sıcaklığı, yüksek basınç, mikrodalga ısıtma, elektrik darbeleri gibi farklı stratejiler kurutma yöntemlerinde incelenmiştir.

Gıdaların içeriğinde bulunan yüzdesel anlamda mevcut su ürünlerin kuru hallerine göre daha hızlı sürede bozulmalarına neden olabilmektedir. Temelde gıdaların içeriğindeki serbest su kurutma işlemi ile daha düşük yüzdelere indirilerek hem depolama işlemlerinde hemde mikrobiyolojik ve enzimatik bozulmalara karşı engel oluşturmaktadır. Depolama işlemlerinde, gıda içeriğindeki nem uzaklaştırıldığından kütledeki azalma raf, paketleme ve aktarım işlemlerinin kolaylanmasını sağlayarak maliyetlerini azaltır. Bu kolaylık ve talep doğrultusunda aynı seviyede ve yüksek kalitede kurutulmuş malzemeleri elde edebilmek için çok sayıda endüstriyel kurutma işlemi ve uygulamaları gelişmiştir. Bu kurutma metodları hem doğal hem de yapay olarak 2 ye ayrılrsa da aynı zamanda yapay kurutma yöntemlerinde kullanılan cihazlara göre vakum yöntemi, havayla kurutma yöntemleri, kızılötesi, akışkan yataklı, mikrodalga gibi cihazlar yardımıyla kurutma işlemleri tamamlanmıştır. Bunların arasından en çok tercih edilen de dondurarak yöntemdir [5].

Helianthus annuus olarak da bilinen ayçiçeği, tohumları için bir bitkisel yağ kaynağı ve atıştırılabilir olarak dünya çapında yetiştirilmektedir. Türkiye, yıllık yaklaşık 1,5 milyon ton üretim kapasitesi ile ayçiçeği tohumu üretiminde dünyada ilk on ülke arasında yer almaktadır. Buna göre, soyma işleminden sonra büyük bir ayçiçeği çekirdeği kabuğu potansiyeli elde edilir ve bu odunsu yan ürün uygun bir biyokütle olarak kabul edilebilir. Ancak, biyokütlenin yukarıda bahsedilen yüksek reaktivite ve yüksek oksijen içeriği gibi endişeleri bu biyokütle malzemesi için de söz konusudur ve SSS'nin yakıt özelliklerinin torrefaksiyonla iyileştirilmesi konusunda literatürde yeterli çalışma bulunmamaktadır. Ek olarak, SSS'nin yüksek holoselüloz içeriğine (hemiselülozik + selülozik) ve nispeten daha düşük lignin içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. Ligninin hemiselüloz ve selüloza kıyasla ayrışmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle, SSS'ye, burulmanın aşırı etkilerini

araştırmak için uygun bir biyokütleyle izin verilebilir. Bu nedenle, bu çalışma, üst sıcaklık limitinde gerçekleştirilen burulma ile SSS'nin yapısında, özelliklerinde ve yanma özelliklerinde nasıl derin değişikliklerin sağlanabileceğini araştırmayı amaçlamaktadır [6].

Ülkemizde tarımı oluşturan tek yıllık ekim ürünleri içerisinde üretimi ve yağ tüketimi açısından en üst sırayı ayçiçeği yer almaktadır. *Helianthus annuus L.* cinsi ayçiçeği tohumları bazen kabuksuz bazen kabuklu bulunanlarından zarar vermeyen çözücü bileşikler yardımıyla içeriğinden yağının çıkartılarak ya da yüksek basınç altında sıkıştırılarak alınmasından sonra geriye kalan lignin, selüloz ve protein bakımından yüksek değerli kısmı, endüstride malzeme olarak kullanılabilir.

1.2 Ayçiçeğinin Kabuk Yapısı

Ayçiçeğinin tohum kısmında bulunan ve taneyi kapsayan kabuk yapısı, koruyucu olarak tohumu kaplar. Yağlık ayçiçeklerinde bu kabuk yapısı, toplam ağırlığın yaklaşık olarak üçte birlik kısmını oluşturur. Çerezlik olarak yetiştirilen ayçiçeğinde ise bu oran yarı yarıya artabilmektedir. Bu fark kabuk yapılarındaki lif içeriğinden kaynaklanmaktadır.

1.3 Ayçiçeği Küspesi

Canlıların artan ihtiyaçlarındakini proteini karşılamak için gerekli olan ayçiçeği miktarı ve besin maddelerinin küspesinden dönüşümünü değerlendirmek gereklidir. Ayçiçeği artıklarının oluşturduğu küspenin en kötü yanı fiber yapısının gerektiğinden fazla olarak kabuk ve içeriğinin ayılmasında dezavantaj sağlamaktadır. Bu da ticari ve besin değerini artırsada küspesinin ayrılma işleminde bazı enzimlerin ve çeşitlerinin kullanılması gerekliliğini doğurur.

1.4 Selülozik Yapı

Ayçiçeği kabuğunun da yapısında bulunan selülozik yapı bazı enzimler yardımı ile kabuğundan ayrılabilir. Bu mikroorganizma ve enzimler tarafından parçalanabilen selüloz yapısı çevreyle uyumlu ısı dayanıma sahip doğal polimerlerdendir. Glikoz yapılı ve beta bağları ile bağlanmasından meydana gelen homopolimer yapılı bir bileşiktir. İçerisindeki monomerlerin temel yapısında bulunan

hidroksil iyonları sayesinde hidrojen bağı gibi yapıları oluşturmada yüksek avantajlı halde bulunur. Selüloz yapılar birleştiğindeki büyük sarmal yapısı ise fibril adını alır. Fibrillerin bir arada bulunarak oluşturduğu yapılar ise mikrofibril olarak isimlendirilir [4].

Polisakkaritler içerisinde yer alan selüloz, doğada yüksek oranlarda bulunan ve biyoyumlu olduğundan biyobozunur yapısı sayesinde bitkilerin hücre duvarlarında yer alır [6].

1.5 Ayçiçeği Ekilimi ve Büyüme Evreleri

Ayçiçeği tohumlarının toprağa ekildikten sonraki Şekil 1.1 durumları ve yapak çıkardığı Şekil 1.2 görsel halleri aşağıdaki kuruduğu evreler dahil olmak üzere görselleştirilmiştir. Şekil 1.3 çiçeklendiği ve ayçiçeği olduğu evredir.



(A)



(B)

Şekil 1.1: A) Ayçiçeği tohumunun ekimi sonrası toprak üstüne çıkması, B) Ayçiçeği tohumunun otsu gövde oluşturduğu evre.



(C)



(D)



(E)

Şekil 1.2: C) Ayçiçeği tohumunun ekilmesi sonrası 2 yaprak çıkarması, D) Ayçiçeği tohumunun ekilmesi sonrası 4 yaprak çıkarması, E) Ayçiçeği tohumunun ekilmesi sonrası 6 yaprak çıkarması.



(F)



(G)



(H)

Şekil 1.3: F) Ayçiçeği gübrelenme zamanı, G) Ayçiçeği çiçeklenme zamanı, H) Ayçiçeği çekirdeğini oluşturmaya başladığı dönem.



(J)



(K)

Şekil 1.4. J) Ayçiçeği kuruduğu dönem, K) Ayçiçeği kuruma sonrası toplanması.

Ürünler güneşte toplanmak (biçer-döver ile) üzere kendi kendine kuruduğu dönem. Bu dönemde (Şekil 1.4) bitkilerin nemi biyolojik üremeye müsait olduğundan bitki üzerinde bulunan nem küflenmeye sebebiyet verir.

1.6 Literatür Araştırması

Kurutma işlemi endüstriyel sanayinde önemli ve yüksek miktarlarda enerji tüketimini gerektiren bir işlemdir.

Kurutma işlemi daha az enerji harcamak ve maliyet ya da imkanları değiştirmek amacıyla açık havada yani güneş ışığı altında da gıdalar kurutulabilmektedir. Fakat güneş ışığında yapılan kurutma işleminde nihai ürünün kalite özelliklerinde ve ürün özel karakteristik özelliklerinde farklılıklar gözlenebilmektedir. Ayrıca kuruma süresinin uzunluğu ve kurutma işleminin yapıldığı ortama bağlı olarak mikrobiyal risk ve çeşitli kontaminasyonların gelişme riski bulunmaktadır. Bu nedenle açık havada kurutma işlemine ilave olarak çeşitli endüstriyel kurutucu imkanlar geliştirilmiştir. Ayrıca açık havada yapılan kurutma işlemi olumsuz etkilerden (toz,

kirlilik, zararlı böcekler) etkilenebilir. Kurutucu yöntemler kullanılarak yapılan kurutma işlemlerinde, güneş ışığından yararlanılarak yapılan açık havadaki kurutulan ürünlerden farklı kuruma sürelerinde kuruyacağı belirtilir.

Kurutma işlemi sonunda elde edilen ürünün kalitesini koruması ve tüketici beğenisine uygun olması oldukça önemlidir. Bu nedenle kurutma işlemleri sırasında ürünün kokusu, rengi, bileşimi gibi fiziksel ve yapısal özelliklerin korunması için uygun kurutucu, sıcaklık ve kuruma süreleri belirlenmektedir. Mantar kurutması ve anzer balı için en uygun sıcaklık değeri ve süresini araştırmışlardır. Mantar için kabin kurutucuda 50°C ve 6 saat anzer balı için kabin kurutucuda 40-45°C'de 2.5-3 saatin renk, aroma, koku ve yapısında olumsuz değişimler oluşturmayan optimum değerler olduğunu belirlemişlerdir. Kurutma işlemi için kullanılabilen geleneksel mikrodalga fırınlarda [7], havuç meyvesinin kurtulmasını araştırmışlardır. Uygun kurutma sıcaklık değerlerini 45-60°C olarak belirlenmiştir. Ayrıca kurutulan üründe makinanın çalışma gücü 2 - 4 devirlere ayarlanmış ve düşük devirde ürün kalitesinin daha iyi korunduğunu belirlemişlerdir.

Kurutma işlemine etki eden faktörler ve ön işlemler gıdalardan suyun uzaklaşması önemli bir fiziksel olaydır. Kurutma işlemine etki eden birçok iç olaylar ve dış faktörler bulunmaktadır. En önemli mekanizmalar ise moleküler difüzyon ve kapiler akım olarak gösterilmektedir. Küre şeklindeki maddelerin kurutulmasında moleküler difüzyon olayı Fick'in ikinci kuralı (Fick's second law) kullanılarak belirlenmektedir. Fick'in ikinci kuralı kurutma işlemi uygulanan gıdaların kuruma hızının düşüş periyodundaki kütle difüzyon eşitliği olarak tanımlanabilir ve bu eşitlik [8]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

- φ [(maddenin miktarı) uzunluğu boyutlarında konsantrasyonudur $^{-3}$], örneğin mol /m³; $\varphi = \varphi (x , t)$ x konumuna ve t zamanına bağlı bir fonksiyondur
- t zaman, örnek s
- D , [uzunluk² zaman⁻¹] boyutlarındaki difüzyon katsayısıdır, örnek m² /s
- x konumdur [uzunluk], örnek m

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D \nabla \varphi) \quad \text{Denklem olarak ifade edilir.} \quad (1.1a)$$

Önemli bir örnek, φ 'nin sabit bir durumda olduğu durumdur, yani konsantrasyon zamanla değişmez, böylece yukarıdaki denklemin sol kısmı aynı şekilde sıfır olur. D

sabiti olan bir boyutta konsantrasyonun çözümlü, x boyunca konsantrasyonların lineer değişimi olacaktır .

Kurutma işlemi yapılan ürünlerde daha etkin bir kurutma sağlanabilmesi için ürün kalınlığının önemli bir faktör olduğu bilinmektedir [9], soğanın 50-90°C’de kurutulurken ürün kalınlığının kurutma süresine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 2-4 mm arasında değişen örnek kalınlığı ve incelenen sıcaklık değerlerinin kurutma oranını önemli miktarda etkilediğini gözlemlemişlerdir. Farklı kalınlıklardaki ürünlerde yapılan kurutma işleminin incelendiği diğer bir çalışmada patlıcan sebzesinin inceliği ve kurutma sıcaklığı arttıkça kuruma süresinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca farklı kalınlıklardaki örneklerin elde edilen son üründe önemli bir renk farklılığı oluşturmadığı belirlenmiştir [10,11].

2. KURUTMA VE KURUTMA YÖNTEMLERİ

Gıdaların kurutularak muhafazası insanın doğadan öğrendiği ve ilk çağlardan günümüze kadar devam eden en eski yöntemdir. Gıdalar, güneş ısısından yararlanılarak veya başka kaynaklardan elde edilen ısı yardımıyla kurutulur. Buna “güneşte kurutma” ve “yapay kurutma” adı verilir. Kurutma için gerekli ısının taşınmasına göre kurutma yöntemleri konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyon kurutma yöntemi olmak üzere üç grupta incelenebilir [12].

Kurutma, kullanılan enerjinin azaltılması ve kalitenin yükseltilmesi için kendini teknolojik gelişmelere sürekli uyarlamak zorunda olan bir temel işlemdir [13]. Kurutma, su aktivitesinin mikroorganizmaların gelişemediği, enzimatik reaksiyonların ve diğer bozulma reaksiyonlarının olmadığı belirli bir seviyeye düşürülmesi ile ürünün raf ömrünü arttırılmasına yönelik bir yöntemdir [14]. Ayrıca, kurutma, ürün hacmini azaltarak paketleme, taşıma ve nakliyei kolaylaştırır [15]. Fakat yüksek sıcaklık, gıda kalitesinin bozulmasına neden olur. Düşük kurutma sıcaklıklarının uygulanması ise ısıdan kaynaklanan zararları düşürür fakat uzun kurutma süresi ve oksidasyon reaksiyonları gıda kalitesinin düşmesine neden olur. Kurutma sırasında su, katı fazın içinden yüzeye ve sonrasında da yüzeyden akışkan faza doğru hareket eder. Toplam kütle transferi bu iç ve dış direncin bir sonucudur [14].

2.1 Kurutmaya İlgili Teorik Bilgiler

Ürünlerin kuruma sürecinde kullanılarak anlatımı destekleyen ve sıklıkla açıklanan tanımlamalar [24];

2.1.1 Islak nemlilik

Islak nemlilik olarak tanımlanan maddelerin içeriğindeki su ağırlığının maddenin kuru ve yaş ağırlığı olarak tanımlanan toplam ağırlığına oranıdır.

2.1.2 Kuru nemlilik

Kuru nemlilik şeklinde tanımlanan madde içerisindeki su miktarının ağırlığının, madde içerisindeki kuru katı madde miktarına oranıdır.

2.1.3 Denge nemi

Denge nemi malzemenin ortam değerlerine (basınç, sıcaklık) bağlı olarak kazanacağı ve kaybedeceği nem değeridir.

2.1.4 Su aktivitesi

Su aktivitesi kurutulacak madde içerisinde bulunan su miktarının yaptığı buhar basıncının, saf suyun aynı sıcaklıktaki buhar basıncına oranıdır.

2.1.5 Yaş termometre sıcaklığı

Eğer normal bir termometrenin haznesi sık bir tülbent kılıfla sarılır ve tülbentin bir ucu fitil görevi yapmak üzere içinde damıtık su bulunan küçük bir hazneye daldırılırsa ıslak termometre elde edilmiş olur [25]. Doymamış durumdaki hava akımı, ıslak termometrenin haznesi üzerinden geçtiğinde, nemli fitilden su buharlaşır. Bunun sonucunda ıslak termometrenin sıcaklığı hava sıcaklığının altına düşer. Havadan nemli fitile ısı geçişi aralarında bir sıcaklık dengesi kuruluncaya kadar devam eder. Bu dengenin sağlandığı sıcaklığa termodinamikte yaş termometre sıcaklığı denir.

2.1.6 Kuru termometre sıcaklığı:

Kuru termometre sıcaklığı normal hayatta kullandığımız civalı termometrelerle ölçülen sıcaklık değeridir.

2.1.7 Mutlak nem

Herhangi bir durumdaki havanın 1 m³ 'ünün içinde bulunan su buharı miktarının gram veya kilogram olarak ifadesidir.

2.1.8 Bağlı nem

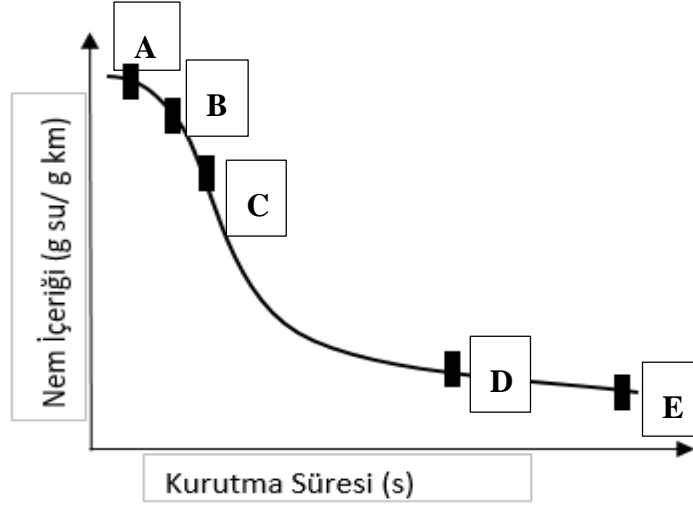
Belirli herhangi bir sıcaklıktaki havanın içinde bulundurabileceği maksimum nem ile o anda havada bulunan nem miktarı arasındaki orandır [23].

2.2 Kuruma Sırasında Isı ve Kütle İletimi

Kurutma, aynı zamanlı olarak gerçekleşen ısı ve kütle transferleri birlikteliğiyle suyun gıdalardan uzaklaştırılması işlemine denir. Bu aynı zamanlı gıda üzerindeki fiziksel başkalaşımın gıdanın kuruma işleminde peşi sıra şu şekilde gerçekleşir; birincil olarak gıda, dış çevredeki kendinden daha sıcak hava ile temas ederek ısınmaya başlar (ısı transferi). Gıda temas yüzeyindeki nem tamamıyla kuruduktan sonra içeri taraflarında bulunan nem difüzyon yolu ile (kütle transferi) yüzeye taşınır ve buradan nemin buharlaşması sağlanır. Kurutma işlemi sırasında ısı transferi ve kütle transferini etkileyen parametreler ortam sıcaklığı, ortamdaki havanın nemi, gıdanın yüzey alanı ve basınç olarak sıralanabilir [23,118].

Kurutma, bir katı, ya da tamamen katı olmayan veya sıvı içerisindeki su ya da başka bir çözücü bileşenin çıkarılmasının sonucu oluşan bir kütle transferi işlemidir. Bu işlem öncelikle satış öncesi ya da ambalajlama öncesi, final işlemi olarak kullanılır. Bir ürüne kuru diyebilmemiz için, nihai ürün olarak katı fazda olmalı ve süreçteki bir tabaka halinde uzun parçalar halinde, partikül halinde ya da toz halinde olmalıdır. Çoğunluk olarak kurutma işleminde, bir ısı kaynağı bulunması ve işlem sırasında açığa çıkan nem ve buharını uzaklaştırmak için kullanılacak araç kullanılır. Gıda, tahıl, aşı gibi biyolojik içerikli ürünlerinin kurutulma işleminde, üründen uzaklaştırılan çözücü yüksek oranda sudur.

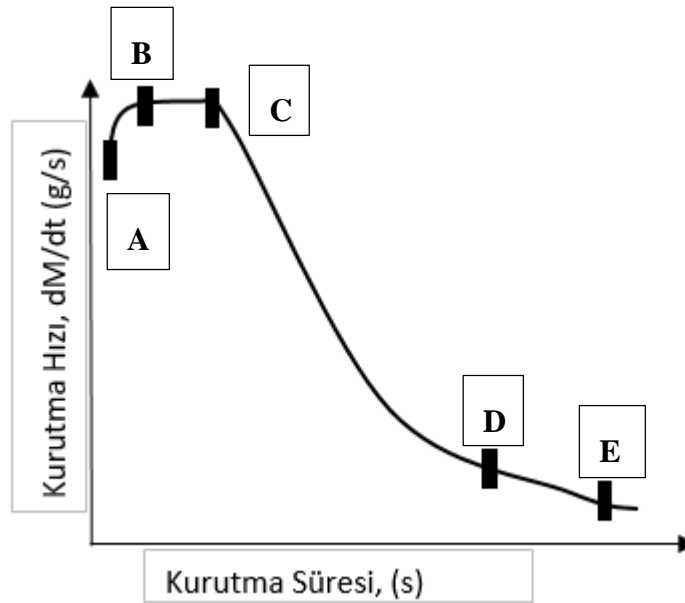
Gıdalarda kurutma yöntemleri, genel başlık olarak doğal ve yapay kurutma yöntemleri adıyla iki grupta toplanır. Kurutma süresine ait ürün nem içeriğinin azalan grafiği Şekil 2.1'de belirtilmiştir. Malzeme içerisindeki nem değeri azaldıkça grafiğin eğiminin azaldığı, kuruma süresinin yüksek nem oranına göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1: Ürün nem içeriğinin kurutma süresi ile ilişkisi [116].

Gıdalarda ürünün nem içeriği kurutma süresi boyunca azalır ve bir süre sonra sabitlenir. Kurutma hızı ise kurutma başında yüksekken kurutma devam ettikçe azalır. Kurutma hızı ürün miktarına, ürün şekil ve boyutuna, kurutma havasının nemi, hızı ve sıcaklığına bağlı olarak değişir [116].

Kurutma hızının, malzeme içeriğindeki neme bağlı olarak kurutma süresine ait değişimi Şekil 2.2’de görselleştirilmiştir. Kurutma hızının nem içeriği fazlayken artan bir grafik göstermesine rağmen, malzeme içerisindeki nem içeriği azaldıkça kurutma hızı da azalan bir eğim göstermektedir.



Şekil 2.2: Kurutma hızının kurutma süresi ile ilişkisi [116].

A-B bölgesinde gıdanın yüzey sıcaklığı ile kurutma sıcaklığı dengeye ulaşır. B-C bölgesi arası sabit hızda kurutma bölgesi olarak adlandırılır. Burada ürünün yüzeyi ıslaktır ve uzaklaşan su serbest sudur. Gıdanın içerisinden yüzeyine aktarılan suyun difüzyonu yüzeyden uzaklaştırılan su miktarından fazladır. Bu bölümde suyun yüzeyden uzaklaşması hızlı olur. C-D arası birinci azalan kurutma hızı periyodudur. Ürün yüzeyinde kurumunun başladığı noktaya kritik nokta (X_c) denir. Kritik noktadan sonra yüzey sıcaklığı yükselir ve ürün yüzeyindeki ıslak bölgenin azalmasıyla ürün kurumaya başlar. D noktasında ürün yüzeyi tamamen kurumuştur. Bu aralıkta üründen uzaklaşan nem miktarı azdır fakat süre uzundur. D-E arası ikinci azalan kurutma hızı bölgesi olarak adlandırılır [117]. Modelleme bir sistemin matematiksel olarak anlatımıdır. Bunu, ilgili olduğu bilim dalının kanunlarına bağlı olarak oluşturur. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile deneysel yöntemlerin yapılamaması durumunda, deneysel metodları destekleyici yönde pratik ve ekonomik olarak sistemlerin tasarlanmasında ve geliştirilmesinde matematiksel modeller kullanılmaktadır [15-16]. Bu modeller matematiksel eşitliklere dayanmaktadır. Kurutma sistemi için birçok matematiksel model geliştirilmiştir fakat bunlardan en verimli az veri gerektirmesi avantajıyla ince tabaka kurutma modelleridir [17]. Bu modellerde gıdaların tek kat tabaka halinde kurutulduğu varsayılır böylece sıcaklığın homojen dağıldığı kabul edilir [18]. Gıdaların kurutulmasında yapılacak modelleme gıdanın türüne göre değişiklik gösterir.

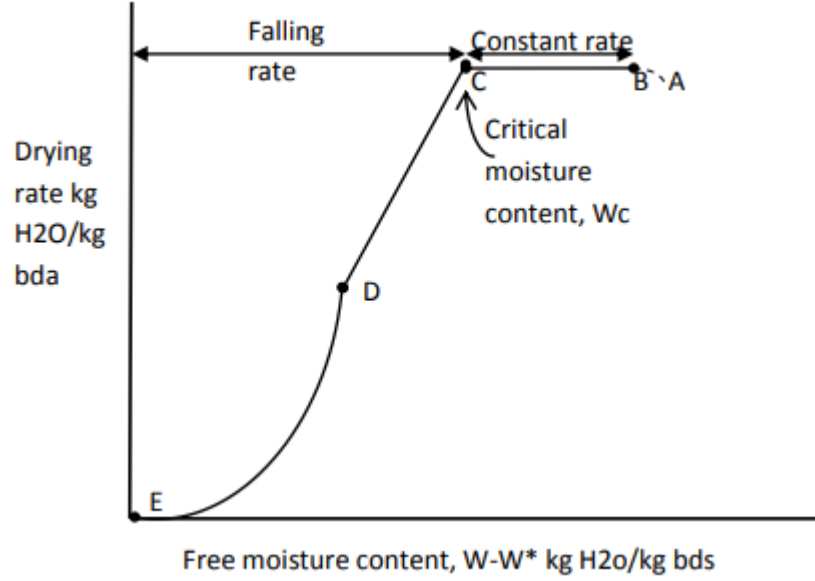
2.3 Kurutma Prensipleri

Yiyecek maddeler bir sıcak hava akımına maruz kaldığında, gizli ısı için yeterli olan sıcaklık, buharlaşma, yüzeyine verilir ve su buharlaşmaya başlar. Bu su, buharlaşarak hava akımı ile taşınır. Düşük su buharı basıncı yüzeyden, suyun uzaklaştırılmasıyla oluşur ve bir buhar basıncı gradyanı oluşturulur. Gıdanın nem oranı yüksek olan iç kısımları ile gıdanın hava ile temas eden dış kısmı bu gradyanda şu şekilde sonuçlanır: su moleküllerinin aşağıdaki aktarım yöntemiyle yüzeye hareketi [26,27];

- Yüzey gerilimi nedeniyle kılcal hareket
- Ara yüzey gerilimi nedeniyle kılcal hareket (Kılcal kuvvetler)
- Su buharının difüzyonu

Sabit sıcaklığa maruz kalan bir malzemenin kuruma davranışı ve bağıl nem genel olarak üç karakteristik adımda açıklanmıştır: yerleşme dönemi, sabit oran dönemi ve

düşen oran dönemi [26,27]. Bu davranış, sabit dış koşullar altında kuruma hızı eğrisi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Sabit dış koşullar altında tipik kuruma hızı eğrisi

İşlemin başlangıcında malzemenin sıcaklığı istenilen seviyede değildir. Denge değeridir ve değer A noktasından kaymasının nedeni budur. Şekildeki B noktası, aynı zamanda uzlaşma dönemi olarak da adlandırılır. B noktasından C noktasına, sabit oran periyodu devam eder. Bu dönemde katı yüzey, sürekli serbest su filmi ve katı yokmuş gibi davranır, yani buharlaşma hızı katıya bağlı değildir, sadece buharlaşarak su uzaklaşır. Gözenekli malzemelerde, bu süre su temini zamanına kadar devam eder. İç yüzeylerden gelen hız, yüzeyden gelen buharlaşma oranından daha azdır. Düşen oran döneminde, su seviyesini korumak için yeterli miktarda yüzeyde su yoktur. C'den D'ye giden yol olarak gösterilen ilk düşen oran periyodu D, gıdanın yüzeyi tamamen kuruyana kadar devam eder. Bu noktada ikinci düşen oran dönemi başlar. Buharlaşma için gerekli olan ısı transfer edilir. Yüzeyde buharlaşma gerçekleşir ve malzemenin dış yüzey bölgelerine su buharı vasıtasıyla katıdaki hava hareket eder. Bazı durumlarda, çok düşük olması nedeniyle D noktasında keskin bir kayma meydana gelmez. Kuruma hızındaki bu kayma tespit edilemez. Düşen oran dönemi en uzun aşamadır. Kurutma ve bazı gıdalarda, başlangıç nem içeriği kritik değerden düşükse nem içeriğinde, sadece düşme hızı periyodu izlenir [26].

2.4 Matematiksel Modelleme

Matematiksel modelleme, kurutma teknolojisinin en önemli parçasıdır. Bu optimum çalışma koşullarına karar vermek ve ardından tasarlamak için gerekli istenilen çalışma koşullarına uygun kurutma ekipmanı seçilir [29]. Modelleme teorisi, bir grup matematiksel bilgiye sahip olmak üzerine kuruludur. Sistemi etkili bir şekilde tanımlayabilen denklemler, özellikle bunları uygulayabildiğimiz denklemler, işlem parametreleri yalnızca zamanın bir fonksiyonu olarak tahmin edilebilir kılar. Sürecin başlangıç koşullarının bilgisi edinilir [30]. Bu çalışmada da nemin tahliyesinin matematiksel gösterimi aynı zamanda kurutma kinetiği olarak da tanınır. Kurutma, aynı anda ısı ve kütleyi içeren çok karmaşık bir süreç olduğundan transfer, yönetim denklemlerini kullanmadan çözmek neredeyse imkansızdır. Sayısal yöntemler, bu nedenle, aşağıdaki varsayımlardan yararlanarak, basitleştirilmiş modeller analitik yaklaşımla çözülebilenlerle elde edilir;

1. İhmal edilebilir büzülme
2. Düzgün ilk nem dağılımı
3. Sabit yayılma katsayısı
4. İhmal edilebilir dış direnç

Fick'in ikinci yasası genellikle çeşitli türlerdeki kurutma kinetiğini modellemek için kullanılır. Difüzyonlu kurutma aralığında tarıma dayalı gıdalarda kurutma denklemi (2.1) [28].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla (D_{eff} \nabla M) \quad (2.1)$$

D_{eff} (m^2/s) mevcut olan her şeyi içeren etkin nem yayılımıdır. Hem buhar hem de sıvı formda nem taşıma mekanizmaları mevcuttur. Çözümü daha önce tanımlanmış varsayımların kullanımıyla sonsuz bir levha için şu şekildedir:

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (2.2)$$

M (kg su/ kg kuru madde) belirli bir andaki nem içeriği olduğundan, M_e denge nem içeriği, M_i başlangıç nem içeriği, L (m) ise levhanın kalınlığı, n pozitif bir tamsayıdır ve M_R boyutsuz nemdir oran.

Boyutsuz Fourier sayısı olduğunda, yani D_{eff}^t/L^2 yaklaşık 0.1'den büyük olduğundan, uzun kuruma süreleri için, Denklem 2.2'deki seriler yakınsar ve sadece ilkinin alır. Modelin doğruluğunu etkilemez. Sadeleştirmeden sonra aşağıdaki denklem elde edilir;

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}^t}{L^2}\right) \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'e dayanarak, bir dizi araştırmacı, her biri aşağıdaki gibi olan bazı modeller tanımladı. Kuruma davranışını başarılı bir şekilde açıklarlar. Kurutma sabiti “k” bahsedilen modellerde taşıma özellikleri yerine kullanılmıştır. Bu denklemler ince katmanlı modeller olarak adlandırılır. İnce tabaka denklemleri kurutma işlemini bir kontrol mekanizmasından bağımsız olarak gerçekleştirdiğini tanımlar. Genel olarak, ince tabaka modelleri zamanla nemin uzaklaştırılmasını kaydederek ve kurutmaya bağlayarak geliştirilmiştir. Sabit sıcaklığa ve bağıl sıcaklığa maruz kalan numuneler için koşullardaki nem içeriğini Midilli, Henderson ve Pabis modeli, Fick'in basitleştirilmiş biçiminin bir eşdeğeri olarak türetilir. Denklem 2.4 ile sonuçlanan ikinci yasa Mısırın kuruma davranışını tanımlar ve şu şekilde yazılabilir:

$$M_R = \frac{M-M_e}{M_i-M_e} = a \exp(-kt) \quad (2.4)$$

Lewis modeli aslında önceki modelin özel bir durumudur, burada “a” bire eşit. Bu model temel olarak nemin ortamdan uzaklaştırıldığını açıklamıştır. Tarımsal malzemelerdeki süreç, bir vücuttan ısı akışına benzer olarak algılanabilir. Düşük sıcaklıklarda bir sıvıya daldırılarak türetilir. Bu denklem ile paralel olarak kabul edilir. Newton'un soğuma yasası ve Newton modeli olarak da adlandırılır. Bu denkleme atıfta bulunmak için üstel model ve basit model kullanılır. Matematiksel denklem:

$$M_R = \frac{M-M_e}{M_i-M_e} = \exp(-kt) \quad (2.5)$$

1949'da Page, Lewis modelini değiştirerek bir model geliştirdi. Sistemi daha iyi tanımlaması beklenen zaman teriminin bir üssü basit modeli. Model şu şekilde verilmiştir.

$$M_R = \frac{M-M_e}{M_i-M_e} = \exp(-kt^n) \quad (2.6)$$

Değiştirilmiş Page modeli, Page modelinden, üstel bir ifade getirilerek oluşturulur. “k” terimi ile soya fasulyesinin kuruma davranışını tanımlar;

$$M_R = \frac{M-M_e}{M_i-M_e} = \exp(-(kt)^n) \quad (2.7)$$

Logaritmik model, kurutmayı tanımlamak için yaygın olarak kullanılan bir başka denklemdir. Şu şekilde tanımlanır:

$$M_R = \frac{M-M_e}{M_i-M_e} = a \exp(-kt) + c \quad (2.8)$$

Wang ve Singh modeli, Midilli, Verma, iki dönemli modellerin çokluğu, kurutma işlemi sistemin karmaşıklığından kaynaklanmaktadır. Bu karmaşıklık, biyolojik ve yapısal özellikler dolayısıyla genel bir model tanımlamak çok zordur [20].

Kurutma yöntemlerini, genellemek gerekirse 2 başlık olarak doğal ve yapay kurutma şeklinde farklı grupta toplayabiliriz.

2.5 Doğal Kurutma Yöntemleri

Doğal kurutma yöntemleri dediğimiz bu yöntem en eski kurutma yöntemleri arasındadır. Bu şekilde kullanılan kurutma işleminde ürün, dışarıdan etki olmadan tamamen doğal dış ortam şartları kullanılarak kurutulur.

2.5.1 Güneşte kurutma

En genel ve yaygın olarak tercih edilen kurutma yöntemi olan güneşte kurutma yöntemi, ucuz olması ile birlikte temasa açık olması nedeniyle bu yöntemde problemlerle karşılaşılabilir. Sürekli olarak güneşin ısısından faydalanarak kurutma işleminin mümkün olmaması, ürünün dış etkilere maruz kalması, kurumayla birlikte üründe çürüme meydana gelebilme riskini barındırmaktadır. Kurutma yöntemleri arasında uzun sürede tamamlanan bir metot olması, daha hızlı, hijyenik ve homojen özellik taşıyan endüstriyel boyutlu, farklı kurutma metotlarının bulunmasına yol açmıştır.

Güneşte kurutma, otları kurutmanın en eski yöntemlerinden biridir ve otlar ve baharatlar gibi bitkileri kurutmak için hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Tropikal ve subtropikal bölgelerde [32], düşük yatırım gerektirmesi nedeniyle yöntem üstün sayılan yöntemdir. Taze bitki parçaları genellikle kurutma raflarına yerleştirilir ve doğrudan güneş ışığına maruz bırakılır, bitki materyalini güneş radyasyonuna maruz bırakarak işlem gerçekleştirilir [33]. Son zamanlarda, sadece bir araştırma makalesi, bitkiler için güneşte kurutma yöntemlerinin uygunluğu konusunda fikir birliğine

varmıştır. Hazrati [36] tarafından yürütülen bir çalışmada, Lavandulifolia, gölge ve fırında kurutma ile birlikte, Stachys'in güneşte kurutmanın uygulanabilirliğini kaydetti. Bununla birlikte, bitkinin hayati kısmının bu tür bir kurutma yöntemini tercih etme olasılığı değerlendirildi.

Bu araştırmalarla birlikte, bu kurutma yöntemi belirli koşullar için uygun değildir. Otsu türlere uygulanan kurutma işlemi bitkilerin, aromasını, rengini ve diğer özelliklerini bozabilir. Toz ve toprak kirliliği, olumsuz hava koşulları altında kalır. Alara [37] tarafından yapılan bir analiz çalışmasında, güneşte kurutulmuş Vernonia amygdalina bitkisi daha düşük bir uçucu yağ verimi sergilemiştir. Gölgede kurutulmuş örneklerden daha uygun şekilde, Alara [37] şunları kaydetti: güneşte kurutma ayrıca Vernonia amygdalina örneklerinin glandüler trikomlarında büzülmeye ve hasara neden oldu ve mineral içeriği değişti. Bu tanımlama maruz kalınan yüksek düzeyde güneş ışığı, trikom hücrelerinin yırtılmasına neden olur ve bu da içerdiği uçucu yağ elementlerinin buharlaşmasından elde edilir. Güneşte kurutma hala en sık kullanılan yöntemdir en basit ve en ucuz olduğu için gıda ürünlerini kurutmak için uygun seçenektir. Ancak, uzun kuruma süresi biyoaktif maddeleri önemli ölçüde kaybedebileceği veya oksitleyebileceği için bitki ve bileşenlerin özelliklerine dayalı özel gereksinimler dikkate alınmalıdır. Uçucu elementlerle birlikte [22,33] güneş enerjisi destekli kurutma gibi yeni teknolojiler gelişmiştir. Geleneksel güneşte kurutma yönteminde, güneş enerjisi kullanımı yenilenebilir, bedava enerji, bu teknolojinin gelişmesi üstesinden gelmeye çalışırken araştırmacılar arasında tercih edilebilirlik kazandırmıştır. Güneşte kurutmanın neden olduğu başlıca problemler bitki ve bitkilerin kurutma işleminde verimlilikte değişik şekillerde ortaya çıkmasına sebep olur. Güneşte kurutma çeşitleri üç tipte sınıflandırılabilir: doğal güneş ışığında kurutma, dolaylı güneşle kurutma ve güneş enerjisiyle kurutmanın benzeri analizler [33]. Güneş enerjisi destekli kurutucuların çeşitli gelişimleri gerçekleştirilmiştir. Zorunlu gelişimi içeren son 10 yıllık konveksiyon güneş tüneli kurutucusu [43], güneş enerjisi destekli akışkan yataklı kurutucular [42], güneş kolektörlü kurutucular [57] ve konveksiyon güneş enerjisi sera kurutucuları [58]. Ayrıca kurutma ile ilgili çok sayıda çalışmada çeşitli otlar üzerinde yöntem yürütülmüştür [57-59]. Bu arada, Amer [58] güneş enerjisi destekli hibrit bir kurutucu kullanmıştır. Güneş kolektörü, reflektör, ikincil kurutma odası, ısı eşanjörü ve ek bir su ısıtıcısı bulunmaktadır. Çalışma hibrit kurutucu ile kurutulan

papatya örneklerinin konveksiyonel kurutma ile karşılaştırıldığında kuruma süresini %50'ye kadar azalttığı gözlenmiştir. Ek olarak, numuneler ayrıca daha yüksek uçucu yağ verimini daha çok tutma eğilimi sergiledi.

Nane yapraklarının bir güneş tüneli sera kurutucusu kullanılarak kurutulması, kuruma süresinde önemli bir azalma sergilemiştir [58]. Nane yapraklarının güneş enerjisi yardımıyla kurutulması güneş kollektörü ve ısı pompası kombinasyonlu kurutucuda tat açısından iyi kalitede kurutma elde ettiğini göstermiştir, termal güneşte kurutmada elde edilen benzer sonuçlarla birlikte hasar ve büzülme görülmektedir [57]. Ek çalışmalar, daha önce olduğu gibi bu gelişen kurutma yönteminde benzer ve olumlu bir eğilim göstermiştir. Geleneksel yöntemlere göre önemli bir gelişme göstermiştir.

Güneşte kurutma yöntemine göre Mahayothee'nin [54] yaptığı analizde elde edilen veriler [60,95-98]: Cassumunar zencefilinin (Zingiber) güneşte kurutulması sonrasında rizomları daha yüksek bir antioksidan aktivite sergilemiştir. Geleneksel güneşte kurutma yönteminden daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Uçucu yağ veriminde, özellikle de kurkumin ve rizomların rengi olarak görsel fark gözlenmiştir.

Benzer bir bulgu, Valeriana Jatamansi'nin kök saplarının dolaylı güneş kurutmasına maruz kaldığı Bhardwaj [50] tarafından rapor edilmiştir. Rizomların nem içeriğini başarılı bir şekilde azalttığı belirlenir. Isı pompası kurutma ile gölgede kurutma karşılaştırıldığında ısı pompası kurutma daha kısa sürede gerçekleşir. Ek olarak, dolaylı güneş enerjisiyle kurutma da kalitenin korunmasına yardımcı olur. Renk, aromatikler ve biyoaktif bileşikler açısından güneş radyasyonu olmadan faz değiştiren malzeme kullanan cassumunar zencefil rizomlarının uçucu yağı incelenmiştir [50]. Konvektif ısı uygulaması ile kuruma süresi azalır ve uçucu bileşenler korunur. Tersine, bu kurutma yönteminin etkisine ilişkin çalışmaların, kurutulmuş otların aroması ve rengi açısından hala sayıca yetersiz olduğu belirtilmelidir [22].

2.5.2 Gölgede kurutma

Bitki kompozisyonunda bulunan etken maddelerin deforme olması ve bileşimi içindeki uçucu yağın bünyesinden uzaklaşmasını engellemek için bitkilere sıcaklık verilerek kurutma yöntemi uygulanmaz. Temas olmadan gölgede kurutulması daha

yaygın ve tercih edilir. Gölgede kurutma işlemi, bitkiler üzerinden hava akımı geçirilerek uygulanır fakat güneş ışığı görmeden kurutulması işlemidir.

Gölgede kurutma, güneş enerjisini bir ısı kaynağı olarak kullanması bakımından güneşte kurutmaya benzer; bununla birlikte, bitki doğrudan güneş ışığından uzakta, gölgeye yerleştirilerek işlem gerçekleştirilir. Isınan hava, bitkileri kuruturken, bu teknik, kurutma alanının havalandırmasına ve düşük nem kaybına güçlü bir şekilde bağlıdır. Işığa duyarlı malzemeler için avantajlı olduğunu ve bir bitkinin uçucu yağındaki oksidasyon gibi kimyasal bileşiklerin değişimini en aza indirmesi sayesinde tercih edilir.

Yine de bu kurutma yönteminin dezavantajı, güneşte kurutmaya kıyasla aşırı uzun kurutma süresine karşılık gelir [63].

Buna rağmen, çeşitli çalışmalar, diğer kurutma yöntemlerine kıyasla uçucu yağ verimini korurken gölgede kurutmadan elde edilen olumlu sonuçları göstermiştir. Melisa, nane ve adaçayı gibi çeşitli bitkilerin gölgede kurutma işleminde kullanılarak kurutulması, konvektif kurutmaya kıyasla yüksek uçucu yağ içeriği korumuştur [62]. Djamilia [48] tarafından yapılan bir çalışmada, gölgede kurutularak, ortalama 30 °C sıcaklıkta ve fırında 50 °C sıcaklıkta kurutulan *Mentha pulegium* L. örneklerinin en yüksek uçucu yağ verimini elde ettiği görülmüştür. Her iki numune de mikrodalga kurutma ile kurutulan numunelere kıyasla polifenol, flavonoid ve tanen içerikleri dahil olmak üzere uçucu yağ kalitesini etkileyen en yüksek miktarda biyoaktif bileşik sergilemiştir.

Bunun dışında, gölgede kurutmaya tabi tutulan Fas *Mentha pulegium* L.'nin toprak üstü kısımlarının, yaklaşık %1,73 ile en yüksek uçucu yağ verimini ürettiği gözlemlenmiştir [56]. Ahmed [56], gölgeye kıyasla güneşte kurutma (%1.35) ve fırında kurutma (%1,1) ile elde edilen verimde gösterildiği gibi, farklı kurutma yöntemlerinin kullanılmasının uçucu yağın sonucunu önemli ölçüde etkilediğine dikkat çekmiştir. Ek olarak, çalışma, uçucu yağın antioksidan gücünü arttırdığı için *Mentha pulegium* L. için gölgede kurutmayı uygun bir yöntem olarak açıklar. Benzer şekilde, Hazrati [36] tarafından yürütülen bir çalışmada, gölgede kurutma yoluyla kurutulan numuneler, *S. lavandulifolia* esansiyel yağının en yüksek tutulumunu sergilemiştir. Ancak Hazrati [36], *S. lavandulifolia*'nın kalitesini korumanın doğru yöntemi olarak gölgede, güneşte ve 40 C'de fırında kurutmayı tavsiye etmiştir.

Benzer şekilde, gölgede kurutma ile elde edilen uçucu yağ veriminin yüksek olması nedeniyle, bu tür kurutma yönteminin fenolik içerik kaybının düşük olması nedeniyle metabolit içeriğini koruyabildiği gösterilmiştir.

Doğrudan güneş ışınlarının yokluğunda ve bitki materyali üzerinde etkili olan düşük konvektif ısı akışıyla, uçucu içeriklerin, özellikle ısıya duyarlı kimyasalların korunması desteklenir.

Sonuç olarak, gölgede kurutma, yüksek uçucu yağ üretimi muhafazasına izin verir. Öte yandan, kurutma işlemi sırasında düşük ısı, bitki materyalinin trikومlarının korunmasına yardımcı olur ve bu bitki hücrelerinde uçucu yağların kaybını önler. Örneğin, Mokhtarihah [38] tarafından yürütülen araştırmada, mızrak nane (*Mentha spicata* L.) yapraklarının glandüler trikومları, fırında kurutma, vakumlu kurutma ve kızılötesi kurutma gibi diğer yapay yöntemlere kıyasla gölgede kurutmadan sonra daha iyi korunmuştur. Gölgede kurutma işleminin, farklı kurutma işlemlerine kıyasla yapraklarının yüzeyinde *Lippia Citriodora* tri chomes'a daha küçük hasara neden olduğu kanıtlanmıştır [52].

Bitkilerin salgı bezlerini uzun kuruma süresi boyunca koruyarak, kurutulmuş malzemenin ekstraksiyon işleminden önce uçucu yağların buharlaşması gerçekleşmez. Bununla birlikte, bu kurutma prosedürünün en dikkate değer dezavantajı, bitki materyali üzerindeki glandüler trikومların kurutma aşaması boyunca patlamasıyla sonuçlanan olağandışı uzun kurutma süresidir. Bununla birlikte, bu kurutma yöntemi, kırsal alanlarda ve küçük işletmelerde düşük maliyeti ve yüksek ürün kalitesi nedeniyle kurutmada hala tercih edilen yöntemlerden biridir [22,33].

2.6 Yapay Kurutma Yöntemleri

Uzun süreli kurutma süreleri, kurutma sırasında açığa çıkan ve istenmeyen etkiler (radyasyon, etken madde kaybı, vitamin kaybı vb.), doğal kurutma yöntemlerinin olumsuz avantajlarıdır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak veya azaltmak için yapay kurutma yöntemleri kullanılmaktadır. Olağan yapay kurutma yöntemleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

2.6.1 Konveksiyon kurutma

Güneşte kurutma ve gölgede kurutma uzun zaman aldığından, imalat endüstrisinde kullanılan bir diğer standart kurutma yöntemi, ısı transfer yöntemi olarak konveksiyon kullanan, fırında kurutma olarak da bilinen sıcak havayla kurutmadır. Bu kurutma yöntemi, güneşte kurutma ve gölgede kurutmanın etkisiz olduğu tropik olmayan ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [32]. Önceki yöntemlerden farklı olarak, bu kurutma yöntemi, bitkileri ve bitkileri kuruturken belirli kurutma sıcaklığı, hava hızı ve kuruma süresi üzerinde tam kontrol sağlar.

Isının taşınım yolu ile kurutulacak maddeye iletilmesi prensibine dayanır. Hava ya da havada yer alan diğer gazların ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanıldığı ve bu akışkanın sistemde dolaştırıldığı kurutma sistemleri taşınım ile yapılan kurutma sistemleridir. Tünel kurutucular (ürünün hareket ettiği hava akışlı), kabinli ve bölmeli kurutucular (tepsilere sererek sıcak havanın ürün üzerine gönderildiği) ve döner kurutucular (ürünün sıcak hava akımı içerisine gönderildiği) taşınım ile yapılan kurutma işleminde kullanılan kurutucu tipleridir [23].

Sonuç olarak, daha yüksek kaliteli kurutulmuş bitkiler ve şifalı otlar üretmek için birçok kurutma işlemi faktörü araştırılmış ve optimize edilmiştir [32].

Djamila [48] tarafından yapılan bir çalışmada, nane (*Mentha aquatica* L.) yaprakları için 50 °C'de fırında kurutmanın, çalışılan diğer kurutma yöntemlerine kıyasla en uygun kurutma tekniği olduğu gösterilmiştir.

Bu özel kurutma yöntemi, uçucu yağ veriminin en yüksek tutulmasını sergilemiştir. Benzer şekilde, Ali [51] tarafından yapılan bir çalışmada; *Moringa* yaprakları için yaklaşık 50 °C'lik bir kurutma sıcaklığının, biyoaktif bileşiklerin ve rengin maksimum korunması için optimum kurutma koşulu olduğu gösterilmiştir. Benzer şekilde, Mokhtarikhah [38] nane (*Mentha spicata* L.) yaprakları için 40 ila 60 °C arasında bir kurutma koşulu önermiştir çünkü bu, yaklaşık %50-53'lük en yüksek karvon içeriğini korumaya yardımcı olur. Bu eğilim, fırında kurutulan yaprakların, en iyi uçucu yağ koruması için kabaca 40-60 °C'lik karşılaştırılabilir bir kurutma sıcaklığına ulaşacağını gösterebilir.

Bir başka benzerlik, 40°C'de fırında kurutmaya tabi tutulan paçuli (*Pogostemon cablin*) yapraklarının olumlu sonuçlara sahip olduğu görülmüştür. Uçucu içerik, diğer

kurutma sıcaklıklarına kıyasla büyük ölçüde korunmuştur. Bu sonuç, uçucu yağ çıkışı azaldıkça kurutma sıcaklığı 40°C'yi aştığında ortaya çıkar [64].

Tersine, Łyczko [70] tarafından yapılan bir çalışmada, lavanta yaprakları (*Lavandula angustifolia* Mill.) olumlu sonuçlar göstermiştir. 60°C'de etüvde kurutularak kurutulan örnekler bitkinin aroma özelliklerini korumuş ve arttırmıştır. Benzer şekilde, lavanta çiçekleri de optimum kurutma koşulu olan 50°C [44] ile uçucu yağ muhafazasında konvektif kurutmaya benzer bir elverişlilik göstermiştir.

Buna karşılık, Zotti-Sperotto [61] tarafından yapılan bir çalışmada, kurutulmuş örnek en yüksek uçucu yağ verimini ve düşük renk özelliklerini bozunmasını sağladığından, 70 °C'lik bir kurutma sıcaklığının *Lippia organoids* yaprakları için uygun olduğu görülmüştür. Çalışma ayrıca *Schinus terebinthifolius* meyveleri için 50 °C'lik bir kurutma sıcaklığında maksimum verimle sonuçlanan uygun kurutma yöntemini araştırdı [61].

Benzer şekilde, An [71] tarafından yapılan bir çalışmada, sıcak havayla kurutmanın Çin zencefili (*Zingiber officinale* Roscoe) rizomları için uygun bir kurutma yöntemi olduğu gösterilmiştir. Kurutma işlemi, gingeroller, toplam fenolik içerik (TPC), toplam flavonoid içeriği (TFC) ve daha yüksek antioksidan etki gibi önemli biyoaktif bileşiklerin korunmasına yardımcı olur. Ayrıca Wang [66] tarafından yapılan bir çalışmada, *Amomum tsao-ko* Crevost et Lemaire meyvesi 25 °C ile 100 °C arasında değişen çeşitli kurutma sıcaklıklarına tabi tutulmuştur. Buna karşılık, kurutulmuş örneklerin uçucu yağı, kurutma sıcaklığı 55 °C'nin üzerine çıktıkça verimde bir düşüş göstermiştir. Bir bitkinin belirli kısımları için bir kurutma yönteminin uygunluğunun oldukça yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Bitkinin biyolojik yapısına bağlıdır. Bu nedenle, belirli bitki parçaları için optimum kurutma parametrelerinin daha fazla araştırılması önemlidir.

Farklı kurutma hava hızları do Nascimento Silveira Dorneles [69] tarafından, *Piper umbellatum* L. yapraklarının incelendiği çalışıldı.

0,4 m/s ve 0,7 m/s kurutma hava hızına tabi tutulmuştur. Çalışma, daha düşük bir hava hızının (0,4 m/s) daha yüksek bir uçucu yağ verimi gösterdiği sonucuna varmıştır. Bu, sert hava hızının uçucu yağda bulunan uçucu bileşenlerin zorla buharlaşmasını başlatabileceğini ve böylece bir bitkinin toplam verimini ve kalitesini düşürebileceğini gösterebilir.

Bu kurutma yönteminin dezavantajlarından biri, bitkiler üzerinde etkili olan yüksek zorunlu kurutma sıcaklığının kullanılması nedeniyle, uçucu bileşiklerin ve nemin buharlaşmasının yanı sıra ürünlerin büzülme yaşını indükleyen, bitkilerdeki aromatik bileşiklerin büyük ölçüde bozunmasıdır [32,51,72]. Ayrıca, sıcak havayla kurutma, tüm yöntemlerle en yüksek enerji tüketimine sahip olarak kabul edilir, farklı kurutma faktörlerinin araştırılması, enerji tüketimini ve süresini azaltırken verimliliği artırır. Tersine, kurutma sıcaklığı arttığında daha düşük bir uçucu bileşik verimi gözlenmiştir [73]. Daha sonraki çalışmalar, kaffir limon yaprakları, Achillea frarantissima L. yaprakları ve Artemisia herb-alba L. yaprakları gibi bitkiler için bu gözlemi desteklemiştir [74,75]. Bu nedenle, sıcaklığın daha fazla artması, uçucu bileşiklerin aşırı kaybına, antioksidan aktiviteye ve birçok bitkide pigmentasyon kaybına ve yaprak yüzeyindeki trikoma zarar görmesine ve büzülmesine neden olacaktır [65, 76, 99].

Bununla birlikte, Shahhoseini [77] tarafından yapılan bir çalışma, kurutma sıcaklığındaki bir artışın, limon mineçiçeği numuneleri için belirli aroma bileşiklerinin daha yüksek içeriği ile sonuçlandığını belirtmiştir. Bu nedenle, yeni bir bitkinin sıcak havayla kurutulması, en iyi uçucu yağ verimini elde etmek için daha fazla araştırma gerektirecektir [22].

2.6.2 Kondüksiyon kurutma

Kurutulacak olan maddenin ısıyı iletim yolu ile aktararak alması prensibi ile açıklanır. Kondüksiyon kurutma yapılacak olan maddelerden düzlemsel bir metal destek aracılığıyla içerisinden nem buharlaştırılarak kurutma sağlanır. Maddeler arasında ısı iletim yoluyla geçişi sağlandığından temas halinde kurutma sağlanır. Tambur tipli kurutucular bu kurutma metodunda değerlendirilir [23].

2.6.3 İletimle kurutma

İletimle yönteminde kurutulması tercih edilen ürünün, sıcak yüzeye doğrudan teması bulunması durumudur. Doğrudan temas birlikteliğinde iletimle aktarılan ısı transferinin birlikteliği ile ürün kurutulur. Kurutma silindirleri veya topları, düz yüzeyler, açık kazanlar ve daldırma ısıtıcılar iletimle kurutmaya örnek verilebilir.

2.6.4 Radyo frekansı kurutma

Radyo frekansı, radyo frekansıyla ısıtma ve konvektif kurutmanın birleşimidir. Malzemelerin ısıtılması, büyük ölçüde söz konusu malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Bu yöntem, kullanılan dalga frekanslarındaki farkla mikrodalga kurutmaya benzer [79]. Bitki kurutmada bu tip kurutma yöntemi sınırlıdır çünkü sadece birkaç makale bu yöntemi araştırmaktadır. Radyo frekanslı kurutma ve konvektif kurutmaya içeren kurutma yöntemleri ve dereotu yeşillikleri üzerindeki etkileri karşılaştırıldığında, radyo frekanslı kurutmanın konvektif kurutmaya göre daha yüksek kuruma hızına sahip olduğu görülmüştür. Yinede, radyo frekansıyla kurutulan numuneler, konvektif kurutma ile kurutulanlardan daha düşük biyoaktif bileşikler gösterdi [78].

Benzer şekilde, düşük nemli havayla kurutma ve radyo frekansıyla kurutmadan oluşan bir hibrit kurutma tekniği, biberiye (*Rosmarinus officinalis* L.) uçucu yağındaki ısıya duyarlı bileşenlerin korunmasında büyük potansiyel göstermiştir [80]. Buna karşılık, çalışmada ayrıca, radyo frekanslı kurutmada en kısa kuruma süresine rağmen, dondurularak kurutulmuş numuneye kıyasla sadece kurutulmuş numunelerden radyo frekansıyla elde edilen olumsuz sonuçlar da belirtilmiştir.

Konvektif ısı transferi ve bitki materyalleri üzerine etki eden radyasyon kombinasyonunun, özellikle yapraklar gibi ince biyo-yapıları olanlar için, geleneksel radyasyon dalgalarına kıyasla aşırı olabileceği öne sürülmektedir. Bununla birlikte, bu tür bitki kurutma, bitkilerin korunması için uygun olabilecek bir kombinasyon kurutma tekniği olarak düşünülmelidir. Bu nedenle, radyo frekansıyla kurutma, şifalı otlar için uygun bir kurutma yöntemi olmayabilir. Bununla birlikte, belirli kurutma tekniklerinin eklenmesi olumlu olabilir ve bu yöntem üzerine araştırma eksikliği kabul edilmelidir [22].

2.6.5 Radyasyon kurutma

Isının Radyasyonda ışınım yolu ile etkisi altındaki malzemeye aktarılmasını temel olarak uygulamaktadır. Kurutmada gereken ısı, içerisinde kullanılacağı malzemede, elektromanyetik kızılötesi ışınlar sayesinde aktarılır. İçerisinde buldukları ortama katkı sağlayamazlar fakat içerisinde buldukları malzemelerin ısı değerlerini yükseltirler. Bu şekilde film şeridi oluşturarak malzeme üzerinde kurutulma

sağladığından, bu şekilde istenilen kuruma işleminde tercih edilir. Bu da tekstil endüstrisinde tercih edilmesine olanak sağlar [23].

2.6.6 Mikrodalga kurutma

Mikrodalga kurutma, sıcak havayla kurutma yönteminin yanı sıra, genellikle üretim endüstrisinde kullanılan bir başka kurutma yöntemidir.

Bu kurutma yöntemi, bitkilerden ve bitkilerden daha kısa bir süre için hızlı su içeriği buharlaşmasını sağladı. Sonuç olarak, kurutulmuş ürünler daha az çekme ve daha az renk değişimi sergilemiştir. Bununla birlikte, mikrodalga kurutma yöntemi genellikle mikrodalga gücü ve kurutma süresi gibi nihai ürünü etkileyebilecek çok sayıda parametre kullanır [81].

Sarimeseli [82], mikrodalga kurutma yöntemi için güç çıkışını 180'den 900 W'a yükseltmenin, kişniş yaprakları örneklerinin kuruma süresini ve rehidrasyon kapasitesini düşürürken, yayılma katsayısını arttırdığını bulmuştur. Özünde, bu tür bir kurutma yöntemi için güç çıktısını manipüle etme yeteneği, kurutma süresinin azaltılmasında yardımcı olacaktır çünkü kısa süre, yukarıda tartışılan önceki kurutma yöntemine kıyasla bitkilerdeki uçucu bileşiklerin korunmasına yardımcı olacaktır.

Divya [83] Hamrouni-Sellami [84] ve Sukadeetad [38] tarafından yapılan çalışmaları karşılaştırarak, yukarıdaki ifadeyi gösteren bitkilerin uçucu yağ bileşenlerini korumak veya arttırmak açısından ortak bir eğilim fark edildi. Böylece, mikrodalga kurutma ile, 850 W'ta bir kişniş yaprağı numunesi, konveksiyonlu kurutmadan elde edilen numunelere kıyasla daha yüksek bir trans-b-karoten içeriği elde edildi [83]

Adaçayı yaprağı örneklerinin 800 W'da mikrodalga kurutmaya tabi tutulduğu bir başka çalışma, çalışmada keşfedilen diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında elde edilen uygun miktarda toplam flavonoid içeriği ile en yüksek polifenol içeriğini göstermiştir [84] Ek olarak, Sukadeetad [38] tarafından yapılan bir çalışma da benzer sonuçlar göstermiştir.

Gynura pseudochina, mikrodalga kurutma yöntemi kullanılarak kurutulan numuneleri, dondurarak kurutmadan elde edilen numunelere kıyasla yüksek miktarlarda toplam fenolik ve flavonoid içeriği ve antioksidan aktiviteyi korumaya yardımcı olmuştur. Bununla birlikte, mikrodalga kurutma, özellikle büyük ölçekli kurutma malzemeleri için önemli dezavantajlara sahiptir, çünkü mikrodalga kurutma,

homojen olmayan bir ısıtma prensibi kullanır, bu da nem kaybı ve ısıtma kinetiği açısından kaymaya veya eşit olmayan ürün kalitesine neden olur [85]. Simi Djamil [48], *Mentha aquatica* L. esansiyel yağının en iyi ekstraktını ürettiği için 600 W'ta mikrodalga kurutma için olumlu sonuçlar sergilemiştir. Tombul yapraklarına gelince, Kempri [88] mikrodalgada kurutulmuş örneklerin dondurularak kurutulmuş örneklerle karşılaştırılabilir olduğu ve her ikisinin de en yüksek uçucu yağ verimini elde ettiği bir çalışma yürütmüştür. Diğer kurutma teknolojileriyle karşılaştırıldığında, mikrodalga kurutma, maksimum kalitede kurutulmuş otlar üretmek için en kısa kuruma süresine sahiptir. Bu sonuç, mikrodalgada kurutulmuş kırmızı sarımsağın (*Allium sativum* L.), sıcak havayla kurutulmuş örneklere kıyasla en yüksek biyoaktif bileşikler elde ettiğini göstermektedir [90]. Benzer şekilde, Paławska [89] tarafından yapılan bir çalışmada, mikrodalga kurutma ile kurutulan limon kekiği örneklerinin, diğer kurutma yöntemlerine kıyasla kısa kuruma süresi nedeniyle bitkinin rengini ve antioksidan içeriğini korumada en uygun yöntem olduğu gösterilmiştir. Aghdam [91] ayrıca güneşte ön kurutma işlemi ile 100 W mikrodalga kurutma ile kurutulan *Lippia citriodora* yapraklarının en yüksek uçucu yağ kalitesini sergilediğini göstermiştir.

Buna karşılık, çoğu bitkinin daha küçük ve daha ince doğası nedeniyle bu büyük bir engel olmayabilir, ancak biberiye [86] ve mercanköşk [87] gibi bazı otlar için kabul edilmesi gereken birkaç istisna vardır. Örneğin, Rubinskiene' [92] mikrodalga kurutmadan kaynaklanan kurutulmuş nane yapraklarının yeşilliğini kaybetmiştir.

Bu nedenle, uçucu yağ içeriğinin en iyi kalitesini elde etmek için çeşitli parametreler açısından belirli otlar için mikrodalga kurutmanın optimize edilmesi üzerine değerlendirme ve araştırma yapılmalıdır [22].

Bu tarz kuruma sırasında, kurutulacak malzeme üzerine gönderilen mikrodalga ışınlar ilk olarak gıda içerisindeki moleküller tarafından hapsedilir. Bu sırada rastgele dağılık olan su moleküllerinin yapısındaki yükler, gelen mikrodalga moleküllerini elektrik alanın dağılımına göre sıralar. Bu dağılık moleküller mikrodalganın dizilimi sırasına uygun hale gelirler. İçerideki elektromanyetik alan sürekli yayılım sağladığından gıda maddeleri içeride ısı oluşturarak malzemenin ısınmasına katkı sağlar. Ve içeriğindeki su moleküllerinin bu ısınması, yüksek etkileşim sayesinde çok kısa bir sürede gerçekleşir. [23]

2.6.7 Vakumda kurutma

Bu kurutma yönteminde, kurutulacak malzemenin düşük değerdeki basınç etkisiyle süreç için gereken ısının azaltılmasına yarayan kurutma işlemidir. Bu kurutma yönteminde kullanılan cihazlar vakumlu kurutucu ismiyle adlandırılır ve evlerde kullanılabilir şekilde kullanımda değerlendirilmiş, basit arayüzlü kurutuculardır. Örneğin döşemelik ve mobilya için gereken oda büyüklüğündeki kapasitelere kadar değişebilir. Kurutma işlemi çoğunlukla ısı alımı ile gerçekleşir ancak vakumda kurutma da ısının değerinin çok yüksek seviyelerde bulunmasına gerek kalmadan süreci azaltan bir kuruma elde edilir. Bu kurutmada önemli ve yüksek seviyede kuruma işlemi gerçekleştirilir.

Vakumda kurutmanın diğer bir avantajı enerjiden tasarruf sağlayabilmesi. Kurutma işlemi için gereken düşük enerji gerekliliği, kurutmanın birim maliyet oranlarının azaltılmasını bu da rekabet gücünü artırır. Eş zamanlı olarak vakumda kurutma süre baz alındığında diğer kurutma yöntemlerine göre daha düşük değerde olmaya yatkındır. İşlem süresinin daha kısa olması üretimin performansının artmasıyla doğrudan orantılıdır.

Kurutmanın diğer bir avantajı da daha az deformasyon sağlayan kurutma işlemi olmasıdır. Bazı bitkilerde yüksek seviyedeki sıcaklık değerlerinde uygunsuzluklar açığa çıkabilir. Örnek olarak kurutulma esnasında sert yüzeyi prüzsüz kabuklar oluşması gibi. Bu kurutma da ortam sıcaklık seviyesi yüksek olmadığından malzemeler uygunsuz etkilere maruz kalmazlar bu da ürünün kalitesinin daha yüksek olmasını sağlar.

2.6.8 Akışkan yataklı kurutma

Akışkan yataklı kurutucular, biyolojik ve doğal ürünlerin nemlerinin alınarak uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sürecin en önemli görülen değeri yatak içinde tanecik karışımının yüksek seviyede olması ve bu nedenle kurutma için daha eşit dağılımlı bir prosesin açığa çıkmasıdır. Ürün yüksek sıcaklıklara maruz kalmıyor olması ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında akışkan yataklı kurutucunun tercih sebeplerindedir. Ürün taneciklerinin fiziksel olarak zarara uğrama riski, şeklinin farklılaşması ve içeriğinin topaklaşıp akışkanlığı zorlaştırmaları ise akışkan yataklar için uygunsuz durumlar oluşmasına yol açmaktadır.

2.6.9 Akışkanlaştırılmış kurutma

Akışkan yataklı kurutma, malzemelerin akışkanlaştırma ısıtmasını oluşturmak için kurutma malzemelerinin yerleştirildiği bir yataktan yüksek hızlı sıcak havanın geçirildiği ve geleneksel konvektif kurutma yönteminden daha hızlı bir kurutma hızı ile sonuçlanacak bir yöntemdir [35]. Malzemeler ve sıcak hava akışı arasındaki yüksek ısı verimliliği ve verimli gaz-katı teması, bunu gıda endüstrisinde popüler bir kurutma yöntemi haline getirir [102]. Bununla birlikte, geniş yüzey alanı-hacim oranı ve nem içeriği, zayıf hava sızması nedeniyle ot kurutmaya uygun olmayabilir.

Bu nedenle, yukarıdaki sorunları çözmek için vibro-akışkan yataklı kurutma yöntemi adı verilen yeni bir teknoloji geliştirilmiştir [40].

Bu yöntem, konjonktürde akışkan yataklı kurutucu teknolojisini kullanır. Nem kaybı ve homojenlik açısından proses verimliliğini artırmak için bir titreşim modülü ile. De Aquino Brito Lima-Corrêa [40] tarafından, elde edilen fesleğen yapraklarının normal akışkan yataklı kurutmaya kıyasla gerekli nem azaltımını sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak örneklerin öjenol içeriği 45°C ve 60°C kurutma sıcaklıklarında azalmıştır.

Ayrıca, Paślawska [89], sıvılaştırmanın limon kekiği kurutmak için yıkıcı bir yöntem olabileceğini ve onu otlar gibi küçük malzemeler için etkisiz hale getirdiğini belirtmiştir. Bu kurutma yönteminde araştırma eksikliği nedeniyle, bu teknolojinin daha da geliştirilmesi düşünülmelidir [22].

2.6.10 Vakumlu kurutma

Vakumla kurutma, güneşte kurutma ve gölgede kurutma gibi diğer geleneksel yöntemlere kıyasla, kurutma yöntemlerinin en son teknolojilerinden biri olarak kabul edilecektir. Yinede, bu kurutma yöntemi son 20 yıldır çalışıldığı için tam olarak yeni değil. Isı veya ısı eksikliği nedeniyle, bu tür kurutma işlemi, ısıya aşırı duyarlı malzemeler için uygundur. Vakum yoluyla boşluk boyunca atmosfer altı basınca maruz kaldığı için ilaç ve kimya endüstrilerinde sıklıkla kullanılır [45,93].

Mikrodalga kurutma tekniğinin olumlu avantajları nedeniyle, çoklu kurutma işlemleriyle entegre edilerek yeni keşifler ve yenilikler geliştirilmiştir. En popüler yaklaşım, vakum ve mikrodalga kurutmanın birleştirilmesidir [32]. Standart konvektif kurutma teknikleri ve mikrodalga kurutma yöntemlerine kıyasla, nemi

dışarı atmak için vakum odası üretirken ısıyı malzemelere aktarmak için ışınlama kullanıldığında kuruma süresinin daha hızlı olduğu bulunmuştur [94].

Dehghani Mashkani [41], 35°C sıcaklıkta vakumla kurutma yoluyla kurutulan *Thymus daenensis* örneklerinin en yüksek uçucu yağ içeriğini çıkardığını göstermiştir. Buna karşılık, 55°C sıcaklıkta vakumla kurutulan numunelerin en yüksek timol ve karvakrol içeriğini elde ettiği gösterilmiştir. Benzer bir sonuç, 60 °C'de vakumla kurutma kullanılarak kurutulan limon mineçiçeği örneklerinin diğer kurutma yöntemlerine kıyasla kısa sürede toplam uçucu yağ içeriğini korumada etkili bir yöntem olduğunu gösterdiği Ebadi [52] tarafından da gözlemlenmiştir.

Vakum-mikrodalga kurutmaya tabi tutulan lavanta (*Lavandula angustifolia* Mill.) çiçekleri, diğer kurutma yöntemlerine kıyasla en yüksek uçucu yağı elde etmiş ve aromatik bileşik oran profilini arttırmıştır [44]. Benzer şekilde Ye [53], *A. roxburghii* için 60 C'lik bir vakumlu kurutma tekniği önermiştir. Bu özel kurutma yöntemi, bitkinin taze örneklerine benzer şekilde, biyoaktif bileşiklerini ve aromasını korumaya yardımcı olduğu göz önüne alındığında; bu sonuç, bitkilerde bulunan önemli biyoaktif bileşikleri korurken nemi tamamlamaya zorlamada vakumun yeteneklerini kanıtlayacaktır.

Buna karşılık, Mokhtarikhah [38], 60°C'de kurutulan nane numunesi için yüksek konsantrasyonda karvon ve limonen sergiledi.

Bununla birlikte, bu kurutulmuş numune, en yüksek uçucu yağ verimini elde etmemiştir. Bu nedenle, uçucu yağdaki belirli bileşenlerin korunması bitki üzerinde etkili olan vakum gücüne bağlı olabilir bu da kurutmanın etkinliğini kanıtlamaktadır

Bitkilerden uçucu yağ elde etme ve belirli bileşenlerden yüksek bir içerik elde etme yöntemi. Ancak, bu kurutma yöntemi genellikle kurutmayı artırmak için diğer kurutma yöntemleriyle birleştirilir.

Verimliliği artırmak ve ürün kalitesini artırmak [45] avantajlı yönü ile bu kurutma yöntemi, ekipmanın vakum pompası kapasitesi ile ilgili sınırlamalara sahiptir. Vakum pompası, aşağıdaki nedenlerden dolayı maksimum kapasitesinin dışında verim gerçekleştirilebilir: yüksek nem içeriği, işlemin düşük kaliteli bir sonucuna neden olur [22,35].

2.6.11 Isı pompalı kurutma

Bu kurutucu ana mantık olarak, ısıtıcı, kompresör ve yoğuşturucudan olarak 3 bölümden oluşmaktadır. Isıtıcıda ısınan kuru hava nemi, kompresör ile kurutma birimine yönlendirilir. Kurutma biriminde kurutulacak olan malzemenin içerisindeki nem havaya aktarılır ve nemli hava yoğuşturucuya yönlendirilir. Yoğuşturucuda, yoğunlaşan nem sistem dışarısına gönderilir. Hava ise aynı döngüde ısıtıcıya aktararak çevrimini tamamlamış olur. Yoğuşturucuya gelen nemli havanın sahip olduğu enerji geri kazanılarak ısıtıcıda kullanmak amacıyla sisteme tekrar verilir. Bu sistemlerde enerji verimliliği oldukça yüksektir.

Isı pompası destekli kurutma yöntemi, geleneksel konvektif kurutma yöntemini geliştirmek ve kurutma verimliliğini artırmak için geliştirilmiş yeni bir teknoloji tekniğidir. Bu yöntemin avantajları, çıkış havasının nemini ortadan kaldırma ve geniş bir sıcaklık ve hava hızı aralığında çalışma yeteneği olacaktır [35].

Gan'a [60] göre, java çayı örnekleri ısı pompasıyla güneşte kurutma kullanılarak kurutulduğunda, kurutma odasının bağıl nemi daha yönetilebilirdi. Ayrıca, çalışmada kullanılan diğer kurutuculara kıyasla numunenin kuruma hızını artırmıştır.

Ek olarak, ot kurutmada ısı pompası destekli kurutma yöntemlerinin kullanılmasına ilişkin son çalışmalar, daha yüksek kalitede kurutulmuş otlar üretmede ve biyoaktif bileşenlerin korunmasında benzer ve olumlu sonuçlar göstermiştir. Örneğin, Misai Kucing tesisinin güneş enerjisi destekli ısı pompası destekli yöntemle kurutulması, güneşte kurutulmuş numunelerden daha iyi renk tutma ve biyoaktif bileşiklerin korunmasını göstermiştir [60]. Benzer bir sonuç, bir ısı pompalı nem alıcı kurutucu kullanılarak kurutulan Java çay numuneleri için de gözlemlendi.

Kurutma sıcaklığı 40-60 C aralığında ayarlandığında andrographolid, neoandrographolide ve toplam fenolik içerik dahil olmak üzere biyoaktif bileşenlerin daha yüksek konsantrasyonunu koruduğu gözlemlendi [47]. Ayrıca, Klungboonkrong [49], 60 C sıcaklıkta ısı pompası yöntemiyle kurutulan java çay numunelerinin, dondurularak kurutulmuş numunelere kıyasla toplam fenolik bileşiklerin ve antioksidan bileşiklerin korunmasına yardımcı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ısı pompası tekniği kullanılarak kurutulduğunda elde edilen java çay numunelerinin hücre yapısında Klungboonkrong ve Tummanichanont'un daha düşük büzülme olduğunu gözlemlenildi [47,49].

Dereotu (*Anethum graveolens*) yeşillikleri üzerinde ısı pompasıyla kurutmanın kullanılmasında, sıcak havayla kurutulmuş numune ve radyo frekansıyla kurutulmuş numuneye kıyasla kurutulmuş numunelerin renginde mükemmel koruma göstermiştir [78]. Bununla birlikte, sıcak havayla kurutmanın bitki materyali üzerine yoğun konvektif ısı uyguladığı göz önüne alındığında, bu, uçucu yağdaki uçucu bileşenlerin aşırı buharlaşmasına veya değişmesine neden olacaktır. Bu nedenle, bu kurutma yöntemi, bitki kalitesinin korunmasında olumlu bir sonuç göstermiştir. Bununla birlikte, bitki kurutma yeteneklerini tam olarak keşfetmek için bu yöntemi kullanarak bitki kurutma teknikleri üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir [22].

2.6.12 Kızılötesi kurutma

Kızılötesi kurutma, 15 yıl önce bu kurutma yönteminin geliştirilmesine yönelik araştırmalar ortaya çıkmasına rağmen, bitki ve şifalı bitkilerde uygulanan en son teknolojilerden biridir. Kızılötesi teknolojisi, moleküler titreşim değişiklikleri nedeniyle içeriden ısı üreten malzemeler tarafından iletilen ve emilen kızılötesi dalga boyundaki radyasyondan üretilen elektromanyetik enerjiyi kullanır [102,103]. Bu yöntemin hızlı ısıtma ve kurutma hızı, uyarlanabilir ve basit yeteneklerine ve geliştirilmiş enerji verimliliğine ek olarak, bu kurutma yöntemini diğer kurutma yöntemleri arasında kendi yüksek avantajlı yönleri haline getirir [104].

Buna rağmen, son yıllarda sadece birkaçı yapıldığından, bu yöntemin bitki kurutmada kullanımına ilişkin araştırma makaleleri azdır. Miraei Ashtiani [104], konvektif kurutmaya kıyasla kızılötesi kurutmayı kullanırken enerji verimliliği ve nane yapraklarının kurutma hızında bir fark olduğunu fark etti. Buna karşılık, Torki-Harchegani safran örneklerinin kızılötesiyle kurutulmasının ana bileşiklerin daha yüksek konsantrasyonuyla sonuçlandığını bildirmiştir: krosin ve safranal bileşikleri. Benzer bir sonuç, 45°C'de kızılötesi kurutmanın, *Laurus nobilis* L. yapraklarının uçucu yağdaki belirli bileşen konsantrasyonunu arttırırken, uçucu bileşiklerde hafif bir kayıp gösterdiğini gösteren Sellami [105] tarafından da sergilenmiştir.

Elektromanyetik enerjinin bitkiyle temas etmesi için kısa bir seyahat mesafesi gerektirdiğinden, ince tabaka yapılı bir bitkinin kızılötesi kurutma için uygun olması gerektiği öne sürülmüştür. Örneğin, Alwi [106], *Aquilaria* alt bütünleşik yapraklarında bulunan antioksidan içeriğini araştırdı ve 50°C'lik uzak kızılötesi kurutma, çalışılan tüm sıcaklıklar arasında en yüksek etkiyle sonuçlandı. Benzer

şekilde, zencefil rizomlarının kızılötesi kurutmaya tabi tutulduğu An [71], sıcak havayla kurutmaya kıyasla daha yüksek gingeroller, toplam fenolik içerik (TPC), toplam flavonoid içeriği (TFC) ve antioksidan içeriği koruyabildi.

Tersine, kızılötesi kurutmanın mikrodalga kurutmaya benzer bir dezavantajı olduğu belirtilmelidir. Bu kurutma yöntemi, aromatik bitkilerin kalitesinde bozulmaya neden olabilen bitkilerde homojen olmayan ısıtma sergilemiştir [107], Bu nedenle, bitki kurutma ile ilgili çalışmalarda gösterilen oldukça avantajlı özellikler nedeniyle bu kurutma yönteminin geliştirilmesinde bir artış beklenebilir, ancak bu yöntemin çalışılması ve optimize edilmesinde homojen olmayan ısıtma ile mücadele bir öncelik olmalıdır [22].

2.6.13 Tünel tipi kurutucu ile kurutma

Tünel tipi kurutucularda, kurutulacak malzeme konveyör aracılığıyla sürekli hareket halinde tünel içerisinde dönen tepsilerin içerisine konumlandırılarak, uçları dışarıya açık tünel şeklinde ısıtıcı fırınlardan geçirilir. Bu fırınlarda konveyörün hareketi ile paralel doğrultuda sıcak hava akımı aracılığıyla kurutma işlemi yapılır. Tünel tipi kurutucuda hava akışı, zıt veya aynı yönlü olarak akışa sahip olabilir. Kurutulacak ürünlerdeki kurutma oranı, kullanılan tünelin boyu, konveyörün hızı ve hava parametrelerinin değerleri değiştirilerek hesaplanabilir.

2.6.14 Konveyör tipi kurutucu ile kurutma

Konveyör tipi kurutucular, temelde tünel tipi kurutucular ile benzerlik gösterir. Bu tip kurutucular arasındaki temel fark, tünel tipi kurutma işleminde sıcak hava ürünle aynı doğrultuda hareket ederken, konveyör tipi kurutucularda kurutulacak ürünün hareket yönüne dik doğrultuda yönlendirilir. Bazı konveyör tipi kurutucularda tepsiler ızgara tipi seçilerek havanın akışı kolaylaştırılır.

2.6.15 Döner kurutucular ile kurutma

Bu kurutucular ile kurutma işleminde, kurutulmak istenen malzeme silindirik boyutlu tasarlanmış kurutucu haznenin içerisine verilir. Kurutma için gereken sıcak hava kurutma haznesinin alt kısmına verilir. Hava akışı her iki taraflı olabilir. Bu kurutma işleminde kuruyan malzeme kurutucunun alt haznesinde toplanır.

2.6.16 Turbo kurutucu ile kurutma

Turbo tip kurutma işleminde dairesel düzende üst üste sıralı rafların ortasında turbo fanlar ve ısıtıcılar mevcuttur. En üst taraftan sistem içerisine gönderilen kurutulacak malzeme süpürücü yardımı ile altındaki raflara yönlendirilmesi sırasında sıcak havanın ürüne maruz kalması ile kurutma işlemi yapılır. En alt rafta ürün sıcaklığı düşmüş ve neminden uzaklaştırılmış olarak bulunur. Turbo tip kurutucularda sürekli kurutma işlemi yapılır.

2.6.17 Dielektrik kurutma

Bu tarz kurutma işlemlerinde, malzemenin termal enerji üretebilmesi için oldukça yüksek frekansa sahip elektromanyetik alan içerisinde konumlandırılması gerekir. Bunlarda radyo frekansı ya da mikrodalga bölgesi gibi yerler olabilir. Moleküller etkileşim sayesinde elektromanyetik etkinin alanı içerisinde hızlı değişimler sağlayarak sürtünmenin etkisiyle ısı açığa çıkarırlar [23].

2.6.18 Ozmotik kurutma

Ozmatik kurutma metodunda, bitki hücreleri üzerindeki çift katlı zar yapısının iç kısmı ve dış kısmı arasındaki ozmatik basınç farkından yararlanılarak, yarı gerçigen yapıdan materyalin nem değeri azaltılmaya çalışılır. Malzeme ozmatik basıncı kendi iç basıncından daha yüksek bir içeriğe bırakılarak, iç neminin dışarıya çıkarılmasını sağlar. Bu tip konsantrasyon farkı da etkili olmak üzere gıdalarda tuzlu çözeltiler de hazırlanarak, benzer bir nem kaybı yaşanır mikrodalga ve konvektif kurutma tip kurutucular bu tarzdaki kurutucu tipleri arasında yer almaktadır [23].

2.6.19 Sprey (püskürtmeli) kurutucular ile kurutma

Bu tip kurutma işleminde, bu sistemde önceden yoğunlaştırılmış ürün yüksek basınçlarda sprey halinde kurutma hacmine yönlendirilir. Eş zamanlı dış taraftan gelen hava ısıtıcı bobinler aracılığıyla (93-760°C) ısıtılarak kurutma birimine yönlendirilir. Kurutma hacminde sıcaklık ile damla halindeki ürünlerdeki nem gaz haline değişir. Kurutulmuş ürün partiküller ile kütle çekim etkisiyle kurutucunun dip kısmında bulunan toplama kısmında birikir. Gaz fazındaki su buharı filtrelerden geçerken içeriğindeki nem ve buhar ve baca aracılığıyla sistemden uzaklaştırılır.

2.6.20 Süper kritik CO₂ kurutma

Süperkritik CO₂ kurutma yöntemi, çalışma sıcaklığının oda sıcaklığında ayarlandığı ve çok az oksijenin bulunduğu veya hiç oksijen bulunmadığı bir kurutma ortamı olarak süper kritik karbon dioksit kullanır. Henüz tam olarak incelenmemiş en yeni teknolojilerden biridir. Benzer şekilde, bir sıcaklıkta sıcak havayla kurutma yoluyla kurutulan tay fesleğen (*Ocimum basilicum* var. *thyrsoflorum*) yapraklarını incelendi. Bu faktörlere göre, bu yaklaşım, düşük bitki hücresi büzülmesi ve yüksek rehidrasyon kapasitesi gibi düşük işlem gereksinimleri ve yüksek ürün kalitesinden yararlanır. Bu teknoloji hala nispeten yeni olduğu ve büyük ölçekli deneylerde sıklıkla kullanıldığı için, son 5 yılda bitkiler için bu kurutma yöntemini inceleyen birkaç araştırma raporu yapılmıştır [106, 108,109].

Kurutma yönteminin konvektif ve dondurarak kurutma gibi diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığı fesleğen yaprakları üzerinde süper kritik CO₂ yöntemini araştırıldı. Süperkritik CO₂ ile kurutulan numunelerin, dondurarak kurutma işleminden sonra kurutulmuş fesleğen kalitesinin korunmasında ikinci en iyi yöntem olduğu gösterilmiştir. İncelenen diğer yöntemlere göre kuruma süresinin kısa olması nedeniyle uygun kurutma yöntemi olarak önerilmiştir. Michelino,[112] kişniş yapraklarının süperkritik CO₂ içinde kurutulmasının maya, küf ve mezofilik bakterilerin büyümesini azalttığını ve bu kurutma yönteminin mikrobiyal aktiviteyi engellediğini ima ettiğini bulmuştur. Bu kurutma yöntemi, bitkilerin kurutulması ve korunması için umut verici sonuçlar göstermiştir. Bununla birlikte, bu yöntemin, araştırma eksikliği nedeniyle bitki kurutma için sınırlı potansiyeli vardır.

Bu arada, zambon, çileklerin mikrobiyal güvenliğini kurutmak ve arttırmak için süper kritik CO₂'nin fizibilitesini araştırdı. Çalışma, bu kurutma yönteminin, yalnızca numuneleri basınç altına alarak ve basınçlarını azaltarak etkin olmayan maya ve küfü etkin bir şekilde ortadan kaldırabildiğini gösterdi. Tomic, tarafından yapılan aynı araştırma modeli, üç kurutma yöntemini karşılaştırdı: hava, dondurma ve süper kritik CO₂ kurutma. Bu çalışma, 12 aylık depolama süresince süperkritik CO₂ ile kurutulmuş elma meyvesinin kimyasal stabilitesini ve duyu özelliklerindeki değişiklikleri ve kabul düzeyini araştırdı.

Sonuçlar, havada kurutma ve dondurarak kurutma gibi geleneksel kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldı. Süper kritik CO₂ kurutma, kurutulmuş elma

aperatiflerinin üretiminde alternatif bir yeni kurutma yöntemi için umut verici bir potansiyel gösterdi. Sonuçlar, tüketicilerin dondurarak kurutma, havayla kurutma ve süper kritik CO₂ ile kurutmayı güvenilir kurutma teknolojileri olarak kabul ettiğini doğruladı. Uzun raf ömürleri nedeniyle ağırlıklı olarak kurutulmuş ürünleri tüketirler. Bu teknolojinin gıda ürünlerinin besinlerini, rengini ve tadını koruduğu bilimsel olarak kanıtlanmışsa, test edilmiş tüketiciler süper kritik CO₂ ile kurutulmuş ürünleri satın almakla ilgilenecektir. Dolayısıyla bu teknoloji gelecek vaat eden ve kabul edilebilir bir teknoloji olacaktır. Ancak, reel endüstride büyük ölçekli üretim için özellikle ekonomik açıdan daha çok araştırma yapılması gerekiyor.

2.6.21 Tepsili (Raflı) kurutucu ile kurutma

Bu metod endüstride kurutma amacıyla çoğunlukla kullanılan metdoldardandır. Kurutulacak malzeme paslanmaz çelikten yapılmış ve eşit büyüklükteki tepsiler üzerinde serilerek kuruma işlemi yaptırılır. Malzeme tepssi üzerinde sıralı raflara yerleştirilerek, rafların asılı olduğu terazi sayesinde malzemeden uzaklaştırılan buhar da sistemsel olarak takip edilebilmektedir. Tepsi tipleri kullanılacak ve kurutulacak malzemeye göre farklı tipte seçilerek, cihazda kurutma işlemi tamamlanır. Laboratuvar ortamlarında tercih edilen fakat hava akımından (cam, kapı) fazlaca etkilenip, analiz sonucunu değerlendirilmesinde uygunsuzluklar yaratabilmektedir. Cihazların çalışma prensibi; üst üste dizilmiş raflar üzerinden hava akımı bir fan yardımıyla desteklenir. Bu hava akımı malzeme üzerinden geçerken malzemenin kurumasını sağlar. Ve tepsilerin bağlı olduğu terazi sayesinde, uzaklaştırılan nem değeri ve kütle kaybı takip edilir.

2.7 Dondurarak Kurutma

Liyofilizasyon işlemi, yani bilindik adıyla dondurarak kurutma; tarihte ilk defa İnkalar tarafından patatesin bitkisinin saklanması amaçlanarak düşünülmüştür. İnkalar bu ürüne “chuno” ismini vermiştir. Yakın tarihimizde 2. Dünya Savaşı sıralarında hastalıkların giderilmesi için kullanılan medikal malzemelerin dış faktörlerden korunması amaçlanmıştır. Şimdilerde bu kurutma, ilaç ve gıda endüstrisinde, suyun etkilerinden zarar görmüş dökümanların onarımında, orijinal olmayan deri imalatında, yarı iletken teknolojisinde kullanılan seramik malzemelerin üretiminde değerlendirilmektedir.

Dondurarak kurutma yöntemi amaç olarak malzemenin dondurulması ile doğal özelliklerinin uygunsuz hale geçmeden saklanabilmesine olasılık sağlayan bir kurutma işlemidir. Bu yöntemde ürün ilk durumuyla dondurulur ve daha sonra kurutma yöntemi uygulanır. Bu amaç ile ürün üzerinde oluşabilecek bakteriyel yaşam formlarının oluşumu engellenmiş olur. Dondurarak kurutma yönteminde kurutulan üründe tat, boyut, renk ve şekil bakımından çoğunlukla değişim görülmez. Bunun sebebi bu kurutma yönteminde, ürünün kurutulması için yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılmamasıdır. Kuruma işlemi uygulanan malzeme içerisindeki su, süblimasyon ile önce katı fazdan, sıvı faza geçmeden, direkt gaz fazına geçirilerek ortamdan ayrılması sağlanır. Sonrasında nemi uzaklaştırılarak kurutulan ürünler tazeliğini korumuş olarak kullanılabilir.

Bu kurutma yöntemi, diğer kurutma yöntemlerine göre maliyeti yüksek bir uygulama olmasına rağmen kurutulmuş ürün kalite değerlerinin uygun olması ve yüksek sıcaklıklara maruz kalmadığından bakteriyel etkilerin gözlenmemesi, öncelikle medikal ve gıda sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gıda sektöründe tazeliğini uzun süre koruyabilmesi ve kurutma işlemi yapıldıktan sonra kütlelerinin yaklaşık %80-90 oranında eksilmesi ile lojistik masraflarının düşürülmesi ile avantajlı olmaktadır.

Tartışılan diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında yukarıda, dondurarak kurutma veya liyofilizasyon, bir kurutma yöntemi kullanıldı. Donma sıcaklığını kullanarak malzemelerin su içeriğini donduran ve malzemelerin içeri girmesine izin vererek çevredeki basıncı azaltıp anında katıdan gaz fazına süblimleşir [45]. Bu kurutma yöntemi, düşük çalışma sıcaklığı ve basıncı kullanılarak gerçekleştirilir. Aynı zamanda muhafazaya uygun kurutma yöntemlerinden biridir.

Bitki kurutmaya uygun, kuru, katı halde kolayca depolanabilen çok uçucu bileşenler içerir [100].

Birçok çalışma, dondurarak kurutma kapasitesini bildirmiştir. Diğer kurutma yöntemlerine kıyasla bitkilerin aromatik bileşiklerini muhafaza etme yöntemleri ile daha uygun malzeme değerleri ölçülmüştür. Örneğin, Antal [101] dondurarak kurutma kullanılarak kurutulan nane örneklerinin konveksiyon yönteminden daha yüksek aromatik konsantrasyon sergilediğini kanıtlamıştır. Buna karşılık, Ghasemi Pirbalouti [63], dondurarak kurutmanın, yüksek uçucu yağ verimini korumak için en

uygun yöntem olduğunu göstermiştir. Kısa bir kuruma dönemi olması için yeşil fesleğen bitkisini yerel türlerinden ve renk koruma döneminde kullanmıştır.

Diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar gözlemlendiği için örneğin, hava yoluyla kurutulan kişniş parçaları örnekleri dondurarak kurutmanın yüksek miktarda koruduğu rapor edilmiştir. Uçucu yağ ve uygun ve hızlı kurumasından dolayı tavsiye edilir bitki için yöntem, daha önce belirtildiği gibi kullanılır [46]. Dondurarak kurutma için kullanılan düşük sıcaklık nedeniyle tercih edilen, yaprakları *Andrographis paniculate*, konveksiyonla kurutmaya göre daha az büzülme sergilemiştir, bu da ürünün uçucu bileşenlerinin korunmasına yardımcı olur.

Söz konusu yaprakların uçucu yağ içeriği [47] Ghasemi Pirbalouti [46] elde edilen en yüksek İran kişnişi (*Coriaria sativum* L.) uçucu yağının yaprak örnekleri olduğunu göstermiştir ve dondurarak kurutma işlemiyle kurutulur. Aynı şekilde, havadaki kısımların dondurularak kurutulması İran ejderi bitkisi, kısa kuruma süresinde en yüksek uçucu yağ veriminin elde edildiği benzer sonuçlar vermiştir [34]. Dondurarak kurutma da yüksek verimlilik sergilemiştir.

Bitkilerin biyoaktif bileşikleri, örneğin; Sárosi [67] dondurularak kurutulmuş kekik numunelerinin timol içeriğinin etüvde kurutulan örneklerle göre diğerlerinden daha yüksek ve gölge kurutma ve Orphanides [68] tarafından benzer bir sonuçtur. Ek olarak, nane yapraklarının antioksidan bileşikleri, dondurularak kurutulmuş numunede diğer kurutma yöntemlerine göre belirgin şekilde daha yüksek olması çalışmada incelenmiştir.

Dondurularak kurutulmuş numunede bulunan lavandulifolia esansiyel yağı, bitki dokusunun liyofilizasyonunun önemli biyoaktif bileşiklerin korunmasına yardımcı olduğunu göstererek arttığı kaydedildi [36]. Benzer şekilde, Meng [55] tarafından uygun koşulları araştıran bir çalışma önemli biyoaktif bileşiklerin korunmasında kurutma tekniği dondurarak kurutmanın *D. officinale*'nin en iyi kalitede korunmasını sağladığını kaydetmiştir.

Dondurarak kurutma, yüksek uçuculuğun korunmasına yardımcı olsa da şifalı otların bileşikleri, çok sayıda çalışma daha düşük olduğunu gösterdi üretilen uçucu yağ veriminin yanı sıra kuru otların kalitesi dondurarak kurutmadan. Rahimmalek & Goli [111] kekiği kanıtladı dondurarak kurutma yoluyla kurutulan numuneler yüksek miktarda esansiyel madde vermiştir. Yağ ve renk tutma, ancak içinde bulunan

aromatik bileşikler numuneler mikrodalga kurutma ile kurutulanlardan daha düşüktü. Ek olarak, Calín-Sánchez [65] ile benzer sonuçlar göstermiştir.

Dondurarak kurutma sırasında ana aromatik bileşiklerin buharlaştığı kekik örnekleri, diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında konvektif ve vakumlu kurutma, dondurarak kurutma gibi fenolik bileşikler, rosmarinik asit ve antioksidan aktivite gibi biyoaktif bileşiklerde önemli bir kayıp olduğunu belirtmektedir [110]. Dondurarak kurutma, bitkilerin korunmasında çok elverişli olmuştur. Otları kurutmak için gerekli olan, ancak bunun yerine kullanılan ısı eksikliğine bitki materyalinden nemin uzaklaştırılmasını başlatmak için liyofilizasyon işlemi uygulanır. Bu kurutma işlemi, teknik olarak ağır bir enerji tüketimi olarak kabul edilir. Sonuç olarak, bunu kullanmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [22].

Dondurarak kurutma yönteminde kurutma süresi birkaç gün ya da daha uzun sürelerle uzayabilir. Düşük sıcaklıkların kullanılması bundaki başlıca etkidir. Sıcaklık değerinin yükseltilmesi bu süreci kısaltabilir. Fakat sıcaklık artı yönde değiştirilirken kurutulan malzemenin sıcaklıktan olumsuz yönde etkilenmeyecek olması değerlendirilmelidir. Dondurarak kurutma işlemi 3 aşamadan oluşur. Bu aşamalar;

- Dondurma safhası,
- Birinci kurutma safhası,
- İkinci kurutma safhası.

2.7.1 Dondurma safhası

Dondurulma aşaması dondurarak kurutma prosesinin olmazsa olmaz aşamasıdır. Başlıca nedeni dondurarak kurutma işleminde ürün üzerinde süblimasyon gerçekleştiği için kurutulan ürünün gözenek yapısı ve dondurma işlemi sonrası ürün içerisindeki donmuş suyun yapısı önemlidir. Dondurma aşamasından önce malzeme yüzey alanını artırma dondurma işlemini etkilemek için küçük yüzeylere ayrılabilir. Yüzey alanının fazla olması süblimasyon etkisine olumlu yönde etki eder. Örnek olarak, ince dilim halinde kesilmiş yiyecekler daha hızlı donarken, bütün halde kesilmemiş yiyeceklerin iç kısmının daha geç donduğu bilinir. Dondurulan malzemenin kalınlık farkından kaynaklı, iç ve dış yüzeyindeki donma farkı oluşur.

Çizelge 2’de çeşitli kurutma işlemlerinin ve safhalarının elde edilen avantaj ve dezavantajların kıyaslaması yapılmıştır.

2.7.2 Birinci kurutma safhası

Bu yöntemde dondurulan malzeme içerisinde yer alan su katı halde dondurulduktan sonra düşük basınçta altında gaz haline geçirilerek süblimasyon işlemi gerçekleşir ve ürün içerisinde nem uzaklaştırılır. Süblimasyon işlemi için vakum pompası desteği alınır. Kurutma işleminin yapıldığı bölgedeki hava, vakum pompası ile sistem dışarısına çıkartılır. Vakum değeri için istenen değere ulaşıldığında malzeme içerisindeki donmuş su katı halden gaz haline geçerek süblimasyon işlemi gerçekleşir. Sistem içinde vakum pompası önüne konumlandırılan yoğuşturucu aracılığı ile gaz halindeki suyun vakum pompası ile çekilmesi ve orada yoğunlaşmadan sistemden uzaklaştırılması gerçekleşmiş olur.

Gaz haline geçmesi için gerekli olan ısı ürünün üzerinden elde edilir. Bu nedenle ürünün kendi sıcaklığı azalır. Sıcaklık düşüşü süblimasyonun etkisinin azalmasına neden olur. Bu sıcaklık düşüşünden olumsuz etkilenmemek için sistem içerisine ısıtıcı yerleştirilir. Sistem içerisine yerleştirilen ısıtıcının sıcaklığı uygun parametreler ile hesap edilir. Sıcaklığın ürünlerdeki mikrobiyal oluşumların buruşma, renk değişimi, bozulma, biyokimyasal aktivitelere sebep olan bir değer ve üstündeki bir değerde olmaması önemlidir. Bu aktivitelerin tamamı bitene kadar süblimasyon işlemi devam eder.

2.7.3 İkinci kurutma safhası

İkinci kurutma safhası, dondurarak kurutma işleminin son aşamasıdır. Bu aşamada malzeme içerisindeki su uzaklaştırılır. Bu aşamada birinci kurutma safhasındaki gibi vakum altında sıcaklık verilir. Bu işlem sonrasında sıcaklık düşer, bu aşamada kullanılan sıcaklık birinci kurutma safhasına oranla daha yüksektir. Sıcaklık değişimi hızlı bir şekilde yapılamayacağından, biyolojik değişim ve bozulmalar göz önüne alınarak, hesaplanan değerler kullanılmalıdır. İkinci kurutma safhası sonunda ürün kurumuş olarak değerlendirilir.

2.8 Süblimasyon

Doğada maddeler 3 temel halde bulunur. Katı, sıvı ve gaz hallerdir. Madde bu 3 halin birisi, ikisi ya da 3 ü şeklinde de bulunabilir. Madde bu 3 faz arasında mevcutta olan enerji ve basınç değişimleriyle birbirine dönüşebilir. Maddenin katı fazdan sıvı fazına geçmesine erime, sıvı fazdan buhar fazına geçmesine buharlaşma, katı fazdan

buhar fazına direk geçmesine ise süblimleşme denir. Süblimasyon hal değişiminin gerçekleşebilmesi için maddenin hal değişimi grafiği o maddeye ait basınç-sıcaklık diyagramında süblimasyon eğrisinin üzerinden geçmelidir. Bunun için düşük basınç en önemli etkidir [114].

Çizelge 2.1: Kurutma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Kurutma Yöntemi	Avantajları	Dezavantajları	Kaynak
Güneş	Erişilebilir ve ucuz	Uzun kuruma süresi, aşırı biyoaktif kaybı bileşikler, oksidasyon yoluyla olası değişiklik görülür	[37]
Gölge	Işığa duyarlı bileşenler için iyi koruma, trikoma daha az hasar, yüksek kalite için düşük maliyetli ürün	Aşırı uzun kuruma süresi, aromatik kayıp bileşik, oksidasyonla olası değişiklikler	[52] [62] [119]
Konveksiyon	Çalışma parametrelerinde tam kontrol edilebilirlik, bağlı kurutma süresi	Aromatik bileşiklerde büyük bozunma, yüksek enerji tüketimi, büyük optimizasyon gerekli	[54] [72] [92] [123]
Dondurarak	Son derece uçucu bileşenleri büyük ölçüde korur, biyoaktif bileşikler, aromatik bileşikler ve renk, hızlı kuruma süresi	Belirli aromatik bileşik açığa çıkma olasılığı buharlaşan, nispeten yüksek işletme maliyeti	[46] [47] [71]
Mikrodalga	Kısa kuruma süresi, daha az hasar ve bütülme trikoma, çoğu biyoaktif bileşiği korur ve renk	Uçucu bileşikler daha yüksek güç seviyelerinde bozulur, geniş yüzey alanına sahip malzemeler için uygun değildir ve eşit olmayan ısı transferi nedeniyle kalınlık farkı	[38] [119] [120]
Mikrodalga-Vakum	Mikrodalga kurutmada daha iyi koruma ve sadece vakumlu kurutma	Diğer kurutmaya benzer sonuçlar üretebilir, tamamen olmadıkça daha yüksek bir işletme maliyetine sahip yöntemler	[120] [121]
Güneş destekli kızılötesi	Güneşte kurutmada daha iyi koruma Hızlı ısı transferi ve kuruma süresi, daha yüksek koruma uçucu yağ verimi ve biyoaktif bileşik	Bu özel kurutma yöntemiyle ilgili sınırlı çalışmalar Bu özel kurutma yöntemiyle ilgili sınırlı çalışmalar Nedeniyle sadece ince katmanlı biyoyapılı bitkiler için uygundur düzensiz ısı transferi	[58] [59] [60] [96] [97]
Akışkanlaştırılmış	Geleneksel ile karşılaştırıldığında büyük nem azaltma konvektif yöntem	Küçük için yıkıcı bir yöntem olarak kabul edilebilir.	[40] [89]
Isı Pompası	Herhangi bir hava hızında büyük nem azaltma	Yoğun sıcaklık uçuculuğu değiştirebilir bileşenler	[47] [60] [78]
Radio Frekans	Mikrodalga kurutmaya benzer hızlı kuruma süresi	Geniş yüzey alanına sahip malzemeler için uygun değildir ve eşit olmayan ısı transferi nedeniyle kalınlık	[80] [122]
Kızılötesi	Uçucu yağ bileşiminin düşük eldesi	Yüksek enerji tüketimi	[107]

3. KURUTMA KİNETİĞİ VE MATEMATİKSEL MODELLERİ

Kinetik teoremlerden bakılarak kuruma işleminin analiz edilmesiyle, malzeme ve dışarısındaki havadan nem alışverişi, kuruma işlemi devam ettiği zaman diliminde önemli olduğundan işlem hassas bir şekilde takip edilir. Malzemelerin kuruması sırasında kurutma kinetiği açısından incelendiğinde malzemenin içerisindeki nem değeri, kuruma hızı ile kuruma süresi, malzemenin sıcaklık değerleri ve denge nemi gibi değerler önemli olduğundan süreç boyunca takip edilir. Malzemenin neminin tamamen uzaklaştırılması için kuruma işlemi sırasında önemli olan 3 evre değerleri hesaplamalarda ve süreçte kullanılır. Bu evreler, materyalin ısınma evresi (IE), sabit hızla kuruma evresi (SHE) ve azalan hızla kuruma evresi (AHE) şeklinde adlandırılabilir.

Kurutma sırasında ürünün takip edilen zaman içerisinde uzaklaştırılan nem oranı, ile başlangıçtaki nem oranı farkı MR ile ifade edilir.

$$MR = \frac{M_{kb,t} - M_e}{M_{kb,0} - M_e} \quad (3.1)$$

Bu denklemde, kuruyan malzemenin t süresinde toplamda içerdiği nem değeri ise başlangıçtaki nem içeriği ve denge nemidir.

3.1 İnce Tabaka Kurutma İşleminde Kullanılan Modeller ve Denklemler

Her deneysel çalışmada olduğu gibi kurutma deneylerinde elde edilen kinetik verilerin standart bir hale getirilmesi istenmiş ve bu doğrultuda çeşitli modeller oluşturulmuştur. İnce tabaka kurutma yöntemi ise numunelerin ince bir tabaka halinde yayılarak kurutulma işlemine denir. Bu modeller deneysel yarı-teorik ve ampirik olarak üç gruba ayrılır. Ancak gıda üzerine yapılan deneylerde kullanım açısından pratik olması bakımından yarı-teorik ya da ampirik modeller kullanılır. Teorik modeller ve yarı-teorik modellemeler Fick'in 2. yasasından üretilir. Ayrıca yarı-teorik modelleri uygulamak daha kolaydır ve uygulamak için daha az kabul yapılır. Ampirik modeller ise yarı-teorik modellerle benzerlik gösterirler. İrkisi

de deney koşullarına bağlıdır ve kurutma hakkında çok detaylı bilgi edinilemez. Bu modellerde "ANO" olarak gösterilen, ayrılabilen nem oranıdır ve aşağıda bulunan formül ile hesaplanır "a, b, n, k, g, h" model katsayıları, "t" süredir.

$$ANO = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte, M, ürünün belli bir t anındaki kütlesi, Me, denge esnasındaki kütle ve M₀, ürünün başlangıç kütlesidir. Me değeri, diğer terimlerle kıyaslanırsa çok küçük olduğu görülecektir. Uzun süren kurutmalarda bu değer ihmal edilerek ANO 2. Formülle hesaplanabilir. Yapılan deneye en uygun modelin belirlenmesi için önce belli katsayıların belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar RMSE (tahmini standart hata), R² (determinasyon katsayısı) ve F2 (ki-kare) değerleridir. Tahmini standart hata (RMSE), modelden elde edilen tahmini ve deneysel veri arasındaki sapmayı ve ki-kare (F2) uyumun uygunluk derecesini göstermektedir. En uygun model seçilirken, RMSE ve ki-kare değerlerinin sıfıra, determinasyon katsayısının ise bire yakın olması bize uygun modele yakınlaştığımızı göstermektedir.

Çeşitli matematiksel modellerle çıkarılan eşitliklerin değerlendirilebilmesi Çizelge 3'te gösterilmiştir. Farklı model eşitlikleri ve bu modellerin kurutma eğrisi eşitlikleri verilmiştir.

3.2 Kurutma Eğrisi Modelleri

Çizelge 3.1: Kurutma eğrisi modelleri

No	Model Adı	Model Eşitliği	Kaynak
1	Lewis	$M_R = \exp(-kt)$	[124]
2	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	[125]
3	Geliştirilmiş Page Eşitliği-I	$M_R = a \exp[-(kt^n)]$	[126]
4	Geliştirilmiş Page	$M_R = \exp[-(kt)^n]$	[127]
5	Henderson ve Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$	[128]
6	Logaritmik	$M_R = a \exp(-kt) + c$	[129]
7	İki terimli	$M_R = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	[130]
8	İki terimli exponansiyel	$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	[131]

Çizelge 3.1 (devamı) Kurutma eğrisi modelleri

9	Wang ve Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	[132]
10	Difüzyon yaklaşımı	$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$	[133]
11	Verma ve ark.	$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$	[134]
12	Geliştirilmiş Henderson ve Pabis	$M_R = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[135]
13	Simplified Fick's diffusion (SFFD) eşitliği	$M_R = a \exp[-c(t/L_k^2)]$	[136]
14	Geliştirilmiş Page eşitliği-II	$M_R = \exp[-k(t/L_k^2)^n]$	[137]
15	Midilli ve ark.	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	[138]
16	Weibull dağılımı	$M_R = a - b \exp[-(kt^n)]$	[139]
17	Aghbashlo ve ark.	$M_R = \exp(-k_1 t / 1 + k_2 t)$	[140]
18	Jena Das	$M_R = a \exp(-kt + b\sqrt{t}) + c$	[141]
19	Demir ve ark.	$M_R = a \exp(-kt)^n + c$	[142]
20	Alibas Modeli	$M_R = a \exp((-kt^n) + (bt)) + g$	[143]

M_R , nem oranı; a, b, c, g, h , katsayılar; t , kurutma süresi, (d); n , kurutma parametresi; k, k_0, k_1, k_2 , kurutma sabitleri, (min^{-1}) L_k , materyalin kalınlığı (mm) [113].

Yapılan analizde sonucunda bulunan değerlere en uygun modelin belirlenebilmesi için matematiksel modelde yer alan kat sayıların hesaplanması gerekmektedir. Değerler regresyon analizi yapılarak RMSE (tahmini standart hata), R^2 (determinasyon katsayısı) ve F^2 (ki-kare) değerleridir. Tahmini standart hata (RMSE), modelden elde edilen tahmini ve deneysel veri arasındaki sapmayı ve ki-kare (F^2) uyumun uygunluk derecesini göstermektedir. En uygun model seçilirken, RMSE ve ki-kare değerlerinin sıfıra, determinasyon katsayısının ise bire yakın olması bize uygun modele yakınlaştığımızı göstermektedir [31].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Materyal

Araştırmada; Bursa/Yenişehir ilçesinde nisan ayında ekilip, eylül ayında hasat edilmiş, hasat yapıldıktan sonra güneşte belli bir oranda taze nemini kaybetmesi için bırakılmış, sonrasında kullanılacak analizler için dondurucuda ve oda sıcaklığında ağzı kapalı ambalajlarda saklanan ayçiçekleri kullanılmıştır. Bu ayçiçeklerinin çekirdeği kullanılmıştır. Çekirdek kabukları selülozik yapılı olmasından dolayı analiz sonrasında değerlendirilmek üzere ayrılmıştır. Çekirdekler ön işlemlere kadar serin ve karanlık bir yerde muhafaza edilmiştir. Saklanan ayçiçekleri Bursa Teknik Üniversitesi kimya mühendisliği laboratuvarında bulunan Gunt marka tepsili kurutucuda kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Ayçiçekleri kurutulmadan önce ön işlem olarak dondurucuda dondurulmaya tabii tutulmuştur. Bu işlem, buzdolabı sıcaklığında (+4°C) muhafaza edilmiş ve deneylerin yapılmasından önce buzdolabından çıkartılarak ortam sıcaklığına gelmesi için 2 saat beklenmiştir. Sonrasında tepsili kurutucunun tek rafına yerleştirilerek kurutulmak üzere analiz yapılacak sıcaklığa ayarlanmış cihaza yerleştirilmiştir. Her bir ölçümde 100 gr ayçiçeği kullanılmıştır. Her analizde tepsi üzerine homojen olarak dağıtılmıştır. Cihaz tepsilerinin yüzey alanı 0,1098 m²'dir ve içerisinde 100 gr ayçiçeği kabuklu şekilde yerleştirilmiştir. Tepsiler kurutma cihazı rafına yerleştirilerek, 3 dakika aralıklarla hassas terazi yardımıyla tartım alınarak kuruma değerleri ölçülmüştür. Malzeme içerisindeki %20 denge nemi kaybolana kadar test devam ettirilerek, kuruma grafikleri çizilmiştir.

Analiz süresince ölçümler cihazdan otomatik olarak kaydedilmiş, hesaplanan nem dengesi kaybedildiğinde analiz durdurularak tamamlanmıştır.

4.2 Kullanılan Cihaz

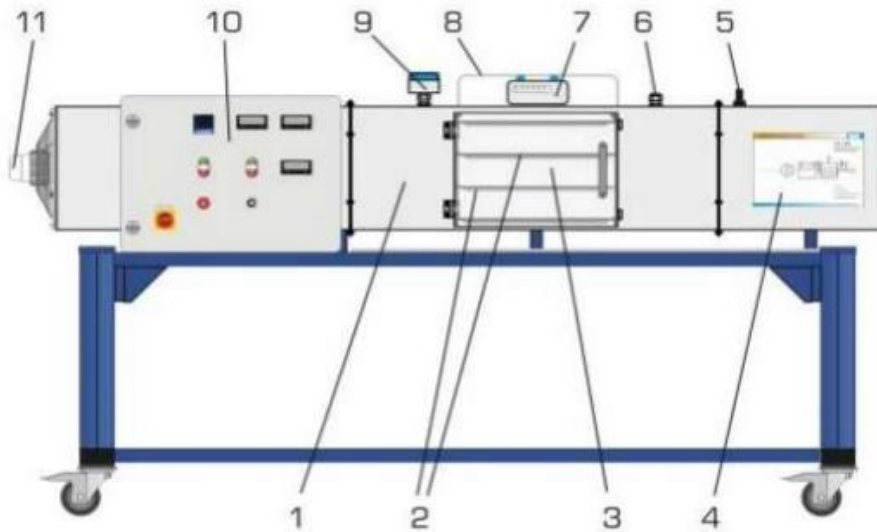
Gunt marka CE130 serisi konveksiyonel kurutma sağlayan cihaz yardımıyla analiz sonuçları alınmıştır. Kuruma grafikleri çizilerek değerlendirilmiştir.

Bu şekilde akış hızlarının ve ön işlemlerin referans kurutma işlemine göre nasıl etki edeceği teorik ve kinetik modellerle ne kadar sürede istenilen nem değerine inileceği hesaplanacaktır. Şekil 4.1. ve Şekil 4.2'de kullanılan tepsili kurutucu şematize edilmiş görseli bulunmaktadır.



Şekil 4.1: Tepsili kurutucu[115].

4.2.1 Cihazın bölümleri



Şekil 4.2: Tepsili kurutucu bölümleri[115].

Cihazın Bölümleri;

- 1- Kurutucu kanal
- 2- Cihaz tepsileri
- 3- Malzeme konumlandırma alanı
- 4- Cihaz akış şeması
- 5- Cihaz hava akış sensörü
- 6- Sensör yardımcı ölçüm noktası
- 7- Dijital hassas terazi
- 8- Tepsilerin terazi ölçüm desteği
- 9- Sensör yardımcı ölçüm noktası
- 10- Kontrol Paneli
- 11- Fan

4.3 Yöntem

Tez konusunda değerlendirilen farklı sıcaklıklarda, farklı akış hızlarındaki ön işlem olarak dondurulmuş ya da toplanma sonrası ayçiçeklerinin kuruma grafikleri çizilerek, kurutma işleminin sıcaklık arttıkça ve akış hızı hızlandıkça değişen grafikleri değerlendirilmek üzere oluşturulmuştur. Cihazın çalışma aralığı olan 0,7 m/s ; 1 m/s ve 1,5 m/s olarak 3 farklı akış hızı kullanılmıştır. Bu akış hızlarının da 40 - 50 ve 60 derece sıcaklıklardaki değişimi ölçülmüştür ve 3 farklı sıcaklıkla, 3 farklı akış hızı 9 analiz olarak tekrar edilmiştir. Bu işlem dondurularak kurutma işlemine maruz kalan ve toplanma sonrası kurutulma işlemine tabi tutulan 2 farklı şekilde bulunan ayçiçeği üzerinde tekrar edilmiştir. Bu şekilde toplam 18 analiz tamamlanmıştır. Ayçiçeklerinin hasat sonrasında içerisinde kalan dal ve kabuk kısımlarından temizlenerek tamamen içleri çekirdek tohumu ile dolu kabuklu ayçiçekleri analiz edilmiştir.

Çalışılacak sıcaklıklar ise kullanılan kurutucunun maksimum çıkabildiği sıcaklık olan 60 derece santigrat baz alınarak 60-50-40 derece santigrat olarak seçilmiştir. Kullanılan tepsili kurutucuda minimum 0,7 m/s hava hızında çalışılabildiği için en düşük değer olarak 0,7 m/s seçilmiştir. Cihazda analiz yapılacak değere ulaşılan kadar beklenmiş ve akış hızının sabitlendiği değer görülünce, tepsiler cihaza yerleştirilmiş ve içleri ayçiçek serili tepsilerde kurumaya bırakılmıştır. Kuruma işlemi tamamlanması için kabul edilen değer, hassas terazi üzerinde tartım sonucu

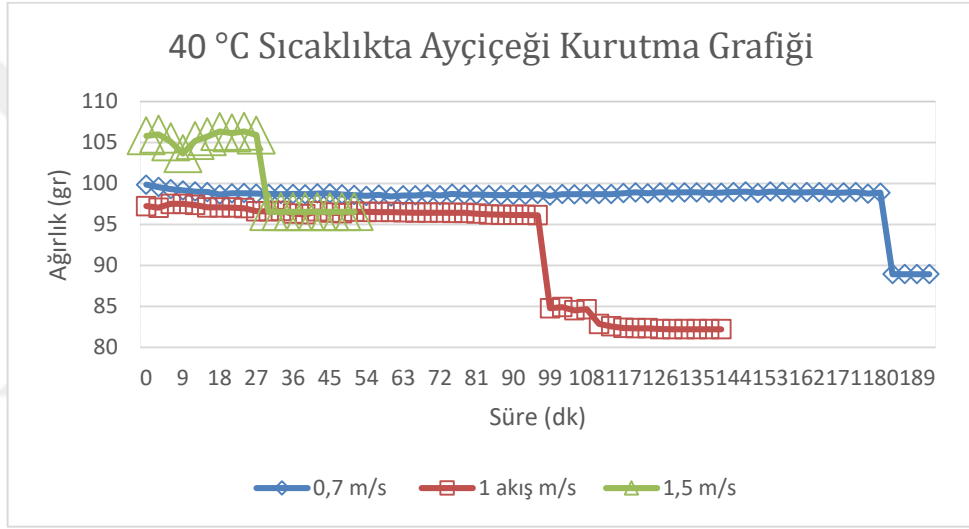
değerinin sabitlendiği ve süre sonunda değişmediği değer kabul edilmiştir. Aynı zamanda etüvde kurutulan ayçiçeklerinden denge nemi hesaplanmıştır.

Bu şekilde 18 farklı analizin ve aynı sıcaklıktaki farklı akış hızlarının kuruma sonuçları değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

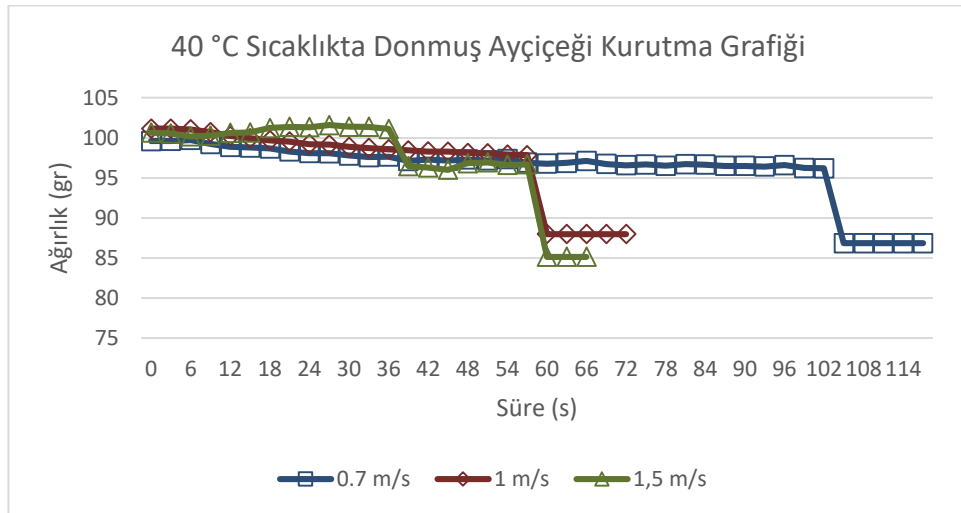


5. BULGULAR ve TARTIŞMA

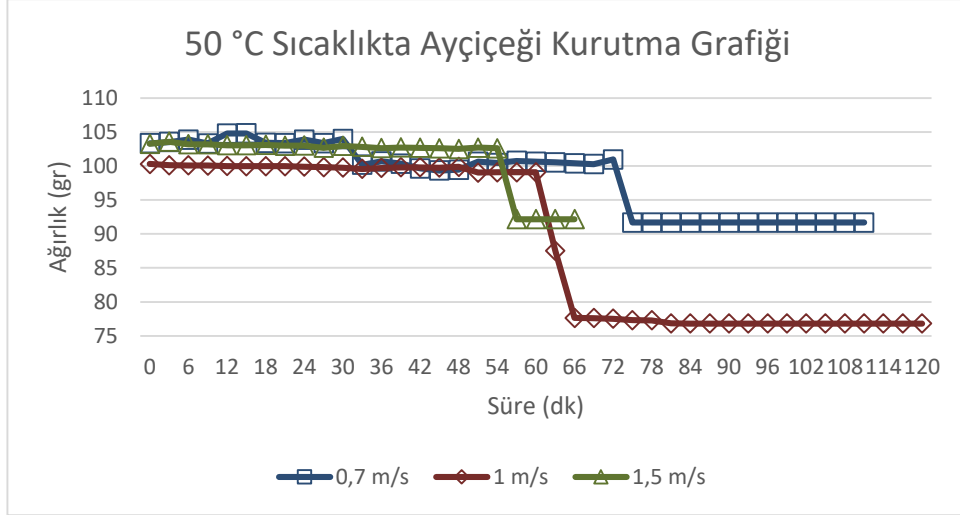
Kurutma cihazından alınan kütle tartımına ait zaman grafikleri; grafikler 3 farklı sıcaklıkta ayçiçeği ve dondurulmuş ayçiçeğinin 3 farklı akış hızı tek grafikte verilerek değerlendirilmiştir. Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, ve Şekil 5.6’da yapılan analizdeki ayçiçeklerinin kuruma-süre grafikleri paylaşılmıştır.



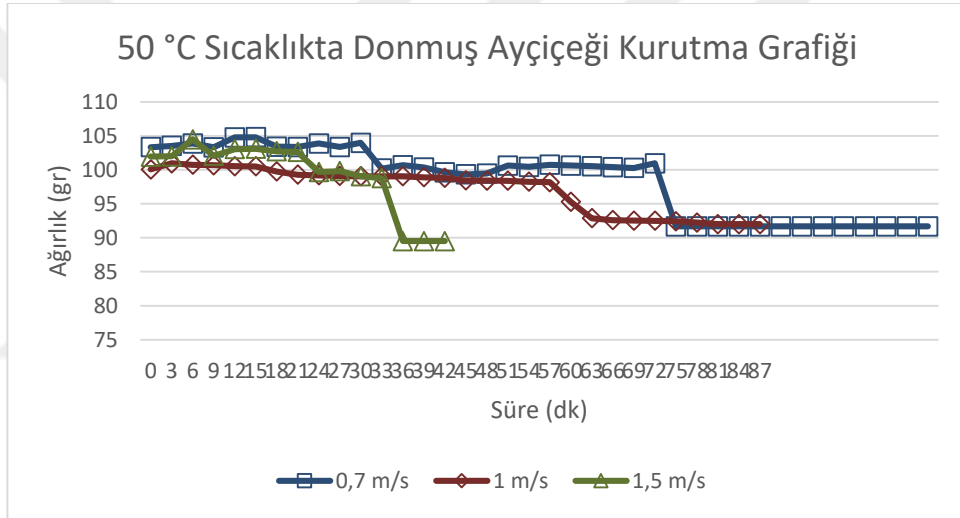
Şekil 5.1: 40°C Sıcaklıkta ayçiçeği kuruma grafiği.



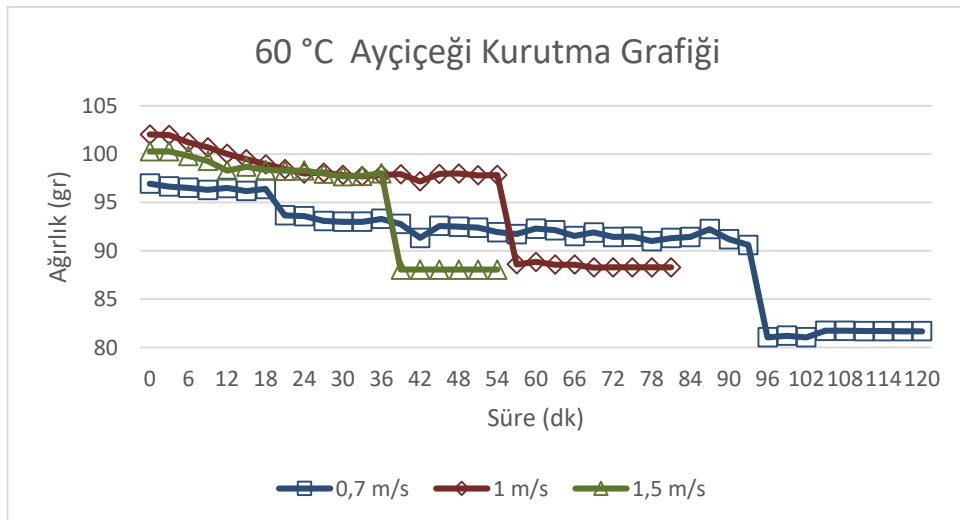
Şekil 5.2: 40°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma grafiği.



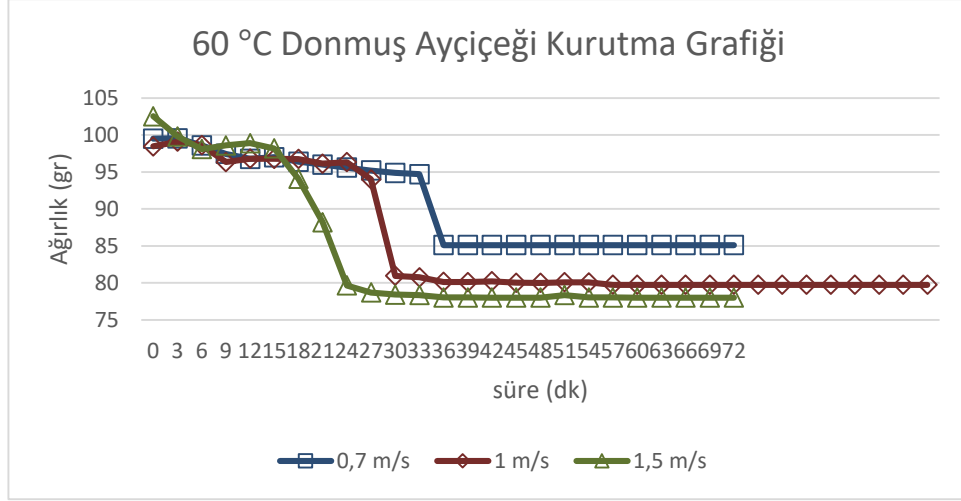
Şekil 5.3: 50°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma grafiği.



Şekil 5.4: 50°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma grafiği.



Şekil 5.5: 60°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma grafiği.

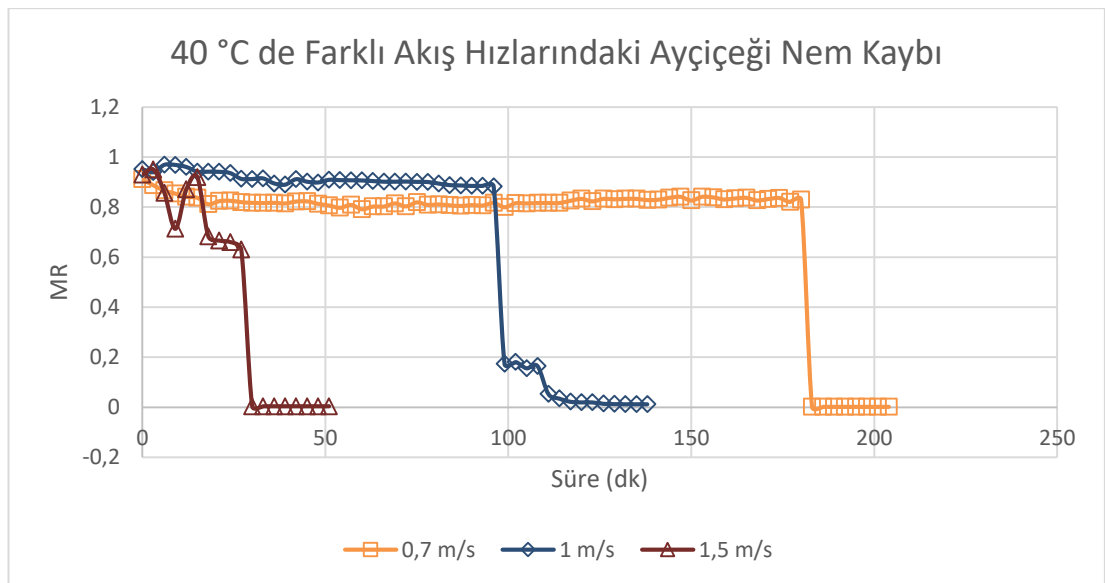


Şekil 5.6: 60°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma grafiği.

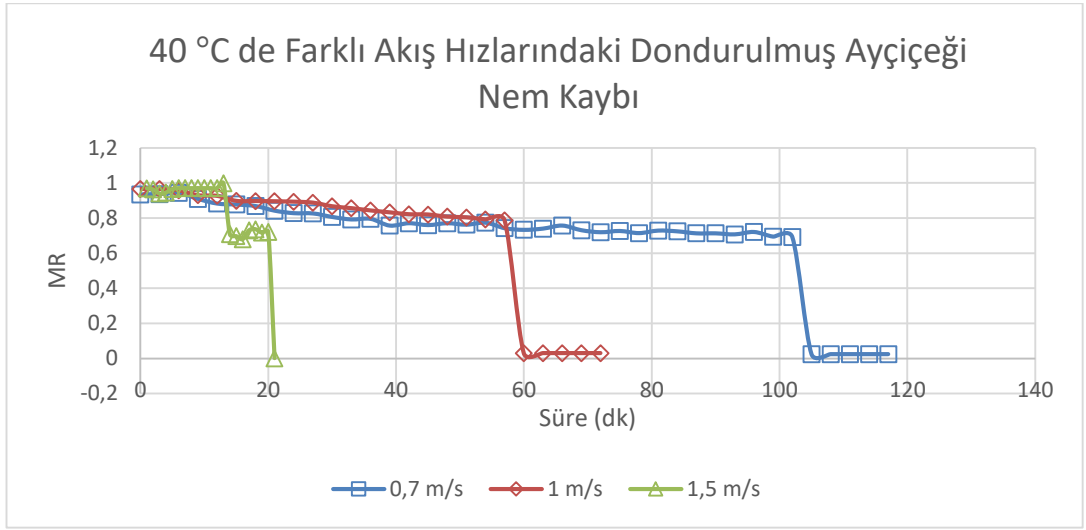
3 sıcaklıkla, ön işlem olarak dondurulma ön işlemi uygulanmış ayçiçekleri ve toplanma sonrası ayçiçeklerinin kurutma grafiklerine ait kurutma sırasındaki kütle kaybı, kuruma süreleri belirlenmiştir. Denge nemi kabul edilen etüv kurutucuda 2 saat 150 °C sıcaklıkta bekletilerek kütle kaybı miktarı hesaplanarak denge nemine göre kuruma denge nemleri için çizilen grafiklerde şekillerde gösterilmiştir.

5.1 Nem İçeriği Grafikleri

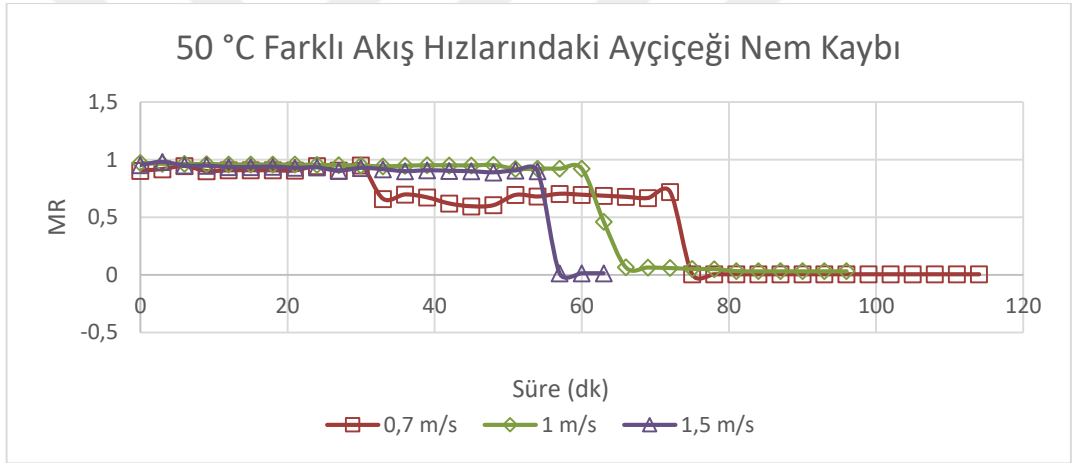
Ayçiçeklerinin kurutma sonrası denge nemi ile hesap edilen MR değerlerine ait grafiklerde 3 farklı sıcaklık ve her sıcaklıktaki 3 farklı akış hızı için ön işlem durumuyla birlikte Şekil 5.7 ve Şekil 5.12 arasında aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



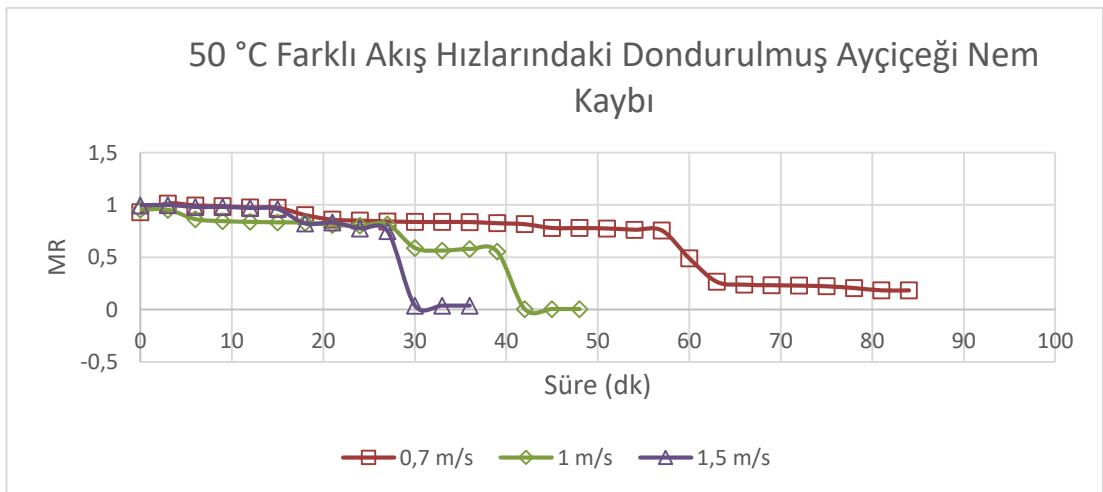
Şekil 5.7: 40°C Sıcaklıkta ayçiçeğinin kurutma nem-süre grafiği.



Şekil 5.8: 40°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma nem-süre grafiği.

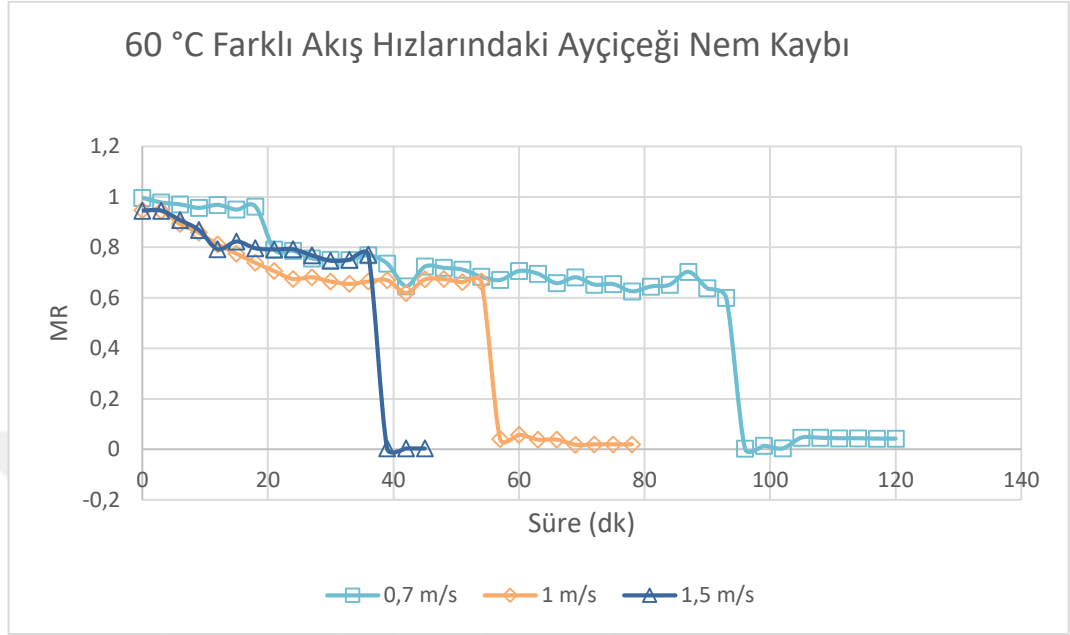


Şekil 5.9: 50°C Sıcaklıkta ayçiçeğinin kurutma nem-süre grafiği.

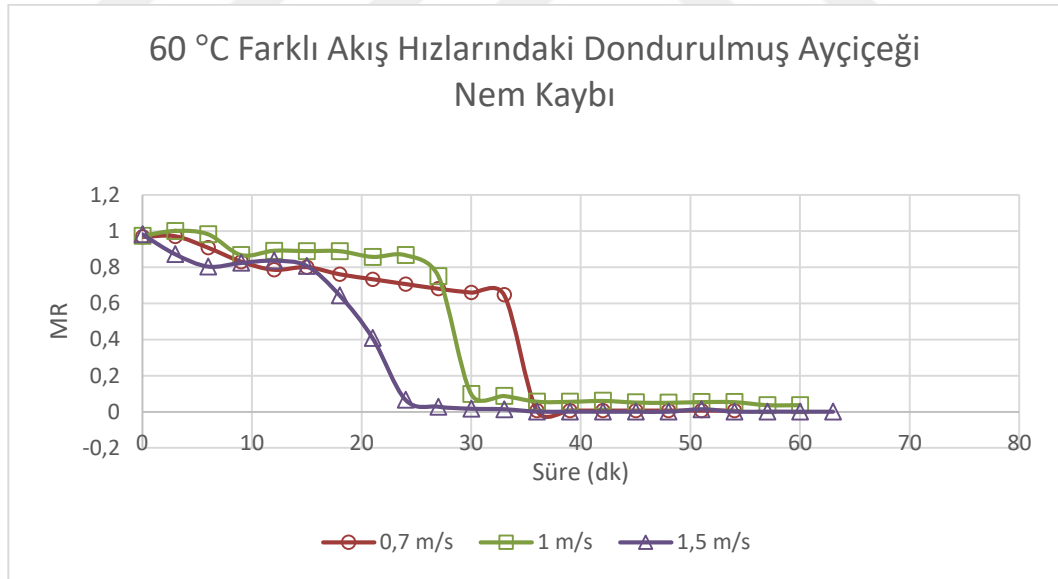


Şekil 5.10: 50°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma nem-süre grafiği.

50°C en kısa sürede kurumanın gerçekleştiği değer 1,5 m/s akış hızında gerçekleşmiştir. Dondurulmuş ayçiçeklerinde bu sürenin daha hızlı gerçekleştiği de gözlenmiştir.



Şekil 5.11: 60°C Sıcaklıkta ayçiçeğinin kurutma nem-süre grafiği.



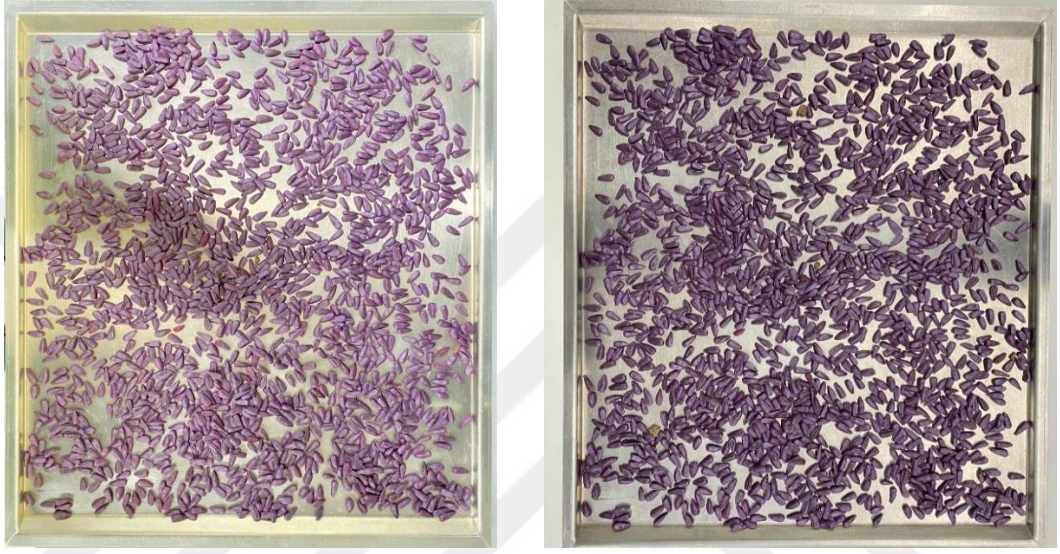
Şekil 5.12: 60°C Sıcaklıkta ön işlem sonrasında kurutma nem-süre grafiği.

Grafiklerde görüldüğü üzere kurutma öncesinde ayçiçeklerinin dondurulması, normal halde kurutulmasına göre daha kısa sürede tamamlanmıştır. Nem kaybı normal haşde kurutulmasına göre dondurarak kurutulması 3 farklı akış hızında daha önce gerçekleşmiştir. 1,5 m/s hızda en hızlı nem kaybı gerçekleşirken, 0,7 m/s akış hızında aynı sıcaklıktaki en yavaş nem kaybı gözlenmiştir.

5.2 Kurutma Öncesi ve Sonrası Tepsili Kurutucu Rafındaki Görünümü

Ayçiçeklerinin ön işlem görmüş ve görmemiş hallerinin sıcaklık ve akış hızına göre görselleri aşağıdaki şekillerde; analiz öncesi ve sonrası olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.13 – Şekil 5.21 arasında yapılan analizlerin öncesi ve sonrası görselleri paylaşılmıştır.

5.2.1 40 derece 0,7m/s akış hızı ile ayçiçeği



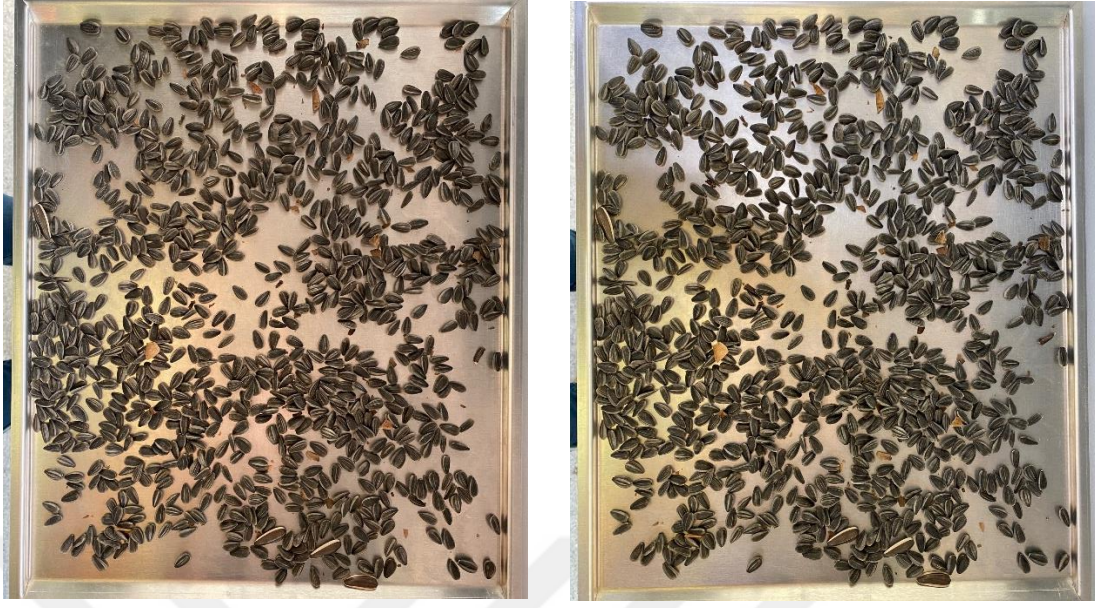
Şekil 5.13: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.2 40 derece 1m/s akış hızı ile ayçiçeği



Şekil 5.14: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.3 40 derece 1,5m/s akış akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)



Şekil 5.15: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.4 50 derece 0,7m/s akış akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)



Şekil 5.16: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.5 50 derece 1m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)



Şekil 5.17: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.6 50 derece 1,5m/s akış hızı ile ayçiçeği



Şekil 5.18: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.7 60 derece 0,7m/s akış hızı ile ayçiçeği



Şekil 5.19: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.8 60 derece 1 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)



Şekil 5.20: Analiz öncesi, analiz sonrası.

5.2.9 60 derece 1,5 m/s akış hızı ile ayçiçeği (Ön işlem dondurulmuş)



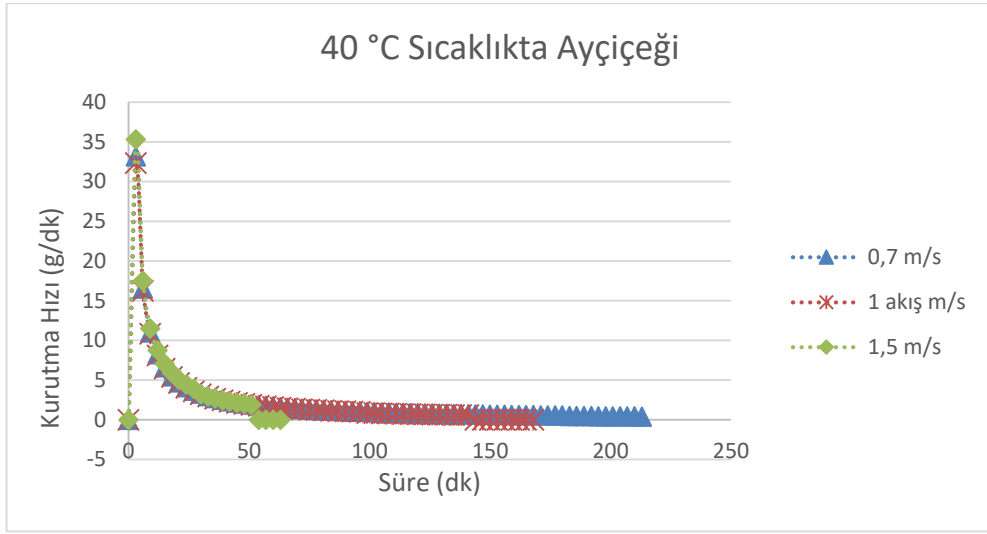
Şekil 5.21: Analiz öncesi, analiz sonrası.

Analizler sonrasında minitab programı ile yapılan regresyon analizinde 40 °C sıcaklıkta 1m/s akış hızı ile ölçülen değerler ve programın ekran görüntüleri Şekil 5.22 gösterilmiştir. Program yardımıyla hesaplanan güven aralığı %98,64 olarak hesaplanmış ve en uygun değer olarak kullanılmıştır.

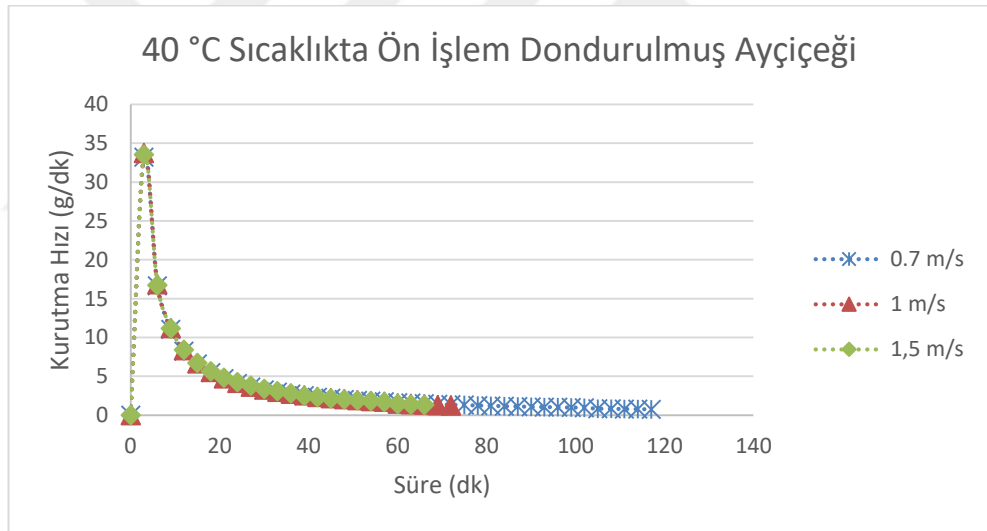
5.3 Kurutma Hızı - Zaman Grafikleri

Kurutma yapılan ayçiçeğinin farklı sıcaklıklardaki kurutma hızı – zaman grafikleri incelendiğinde; yüksek hızla başlayıp, kurutma hızının zamanla azaldığı bir eğim göstermiştir. Kurutma işlemi tamamlanana kadar da düşüşü görülmektedir. Kurutma hızı ön işlem olarak kurutulmuş ayçiçeklerinde ve toplanma sonrası kurutulan ayçiçeklerinde benzer bir hız göstermişlerdir. Dondurulma ön işlemi yapılan ayçiçeklerinde sürenin daha kısa sürdüğü ve kuruma işleminin daha kısa sürede tamamlandığı görülmüştür. Ayçiçeklerinin kurutulma işleminde aynı sıcaklık değerinde akış hızının artması kurutma hızında etkili değişiklik göstermemiştir.

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te 40 derece sıcaklıkta ön işlem uygulanmadan, ön işlem dondurulan ayçiçeklerinin kuruma hızının zamana karşı değişimi grafikte verilmiştir.

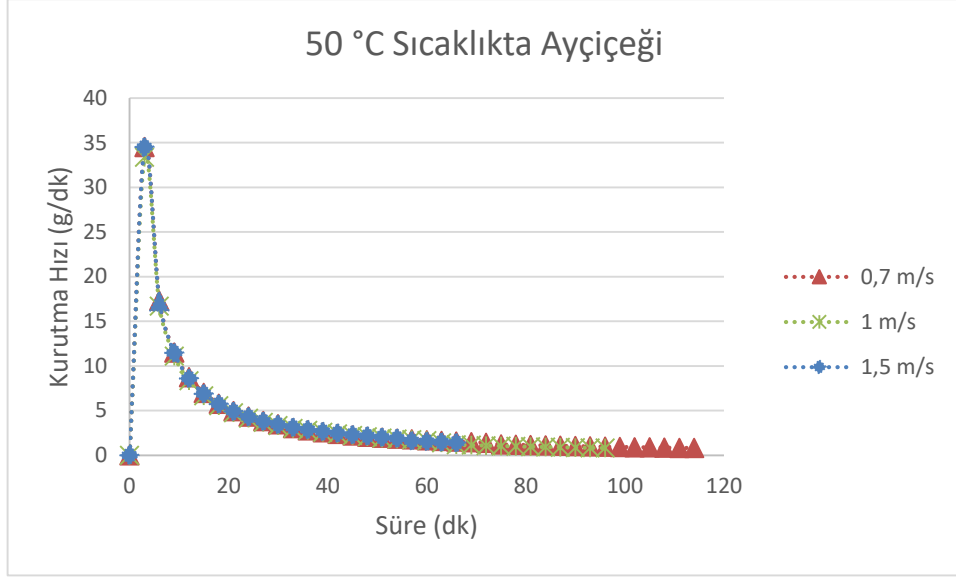


Şekil 5.22: 40°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma hızı grafiği.

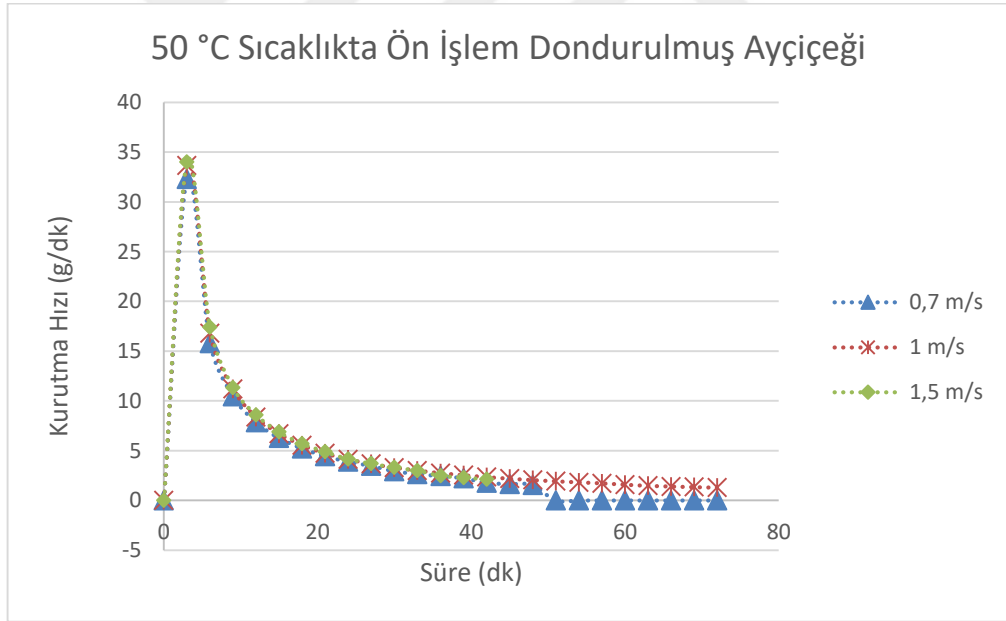


Şekil 5.23: 40°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ön işlem uygulanmış ayçiçeği kurutma hızı grafiği.

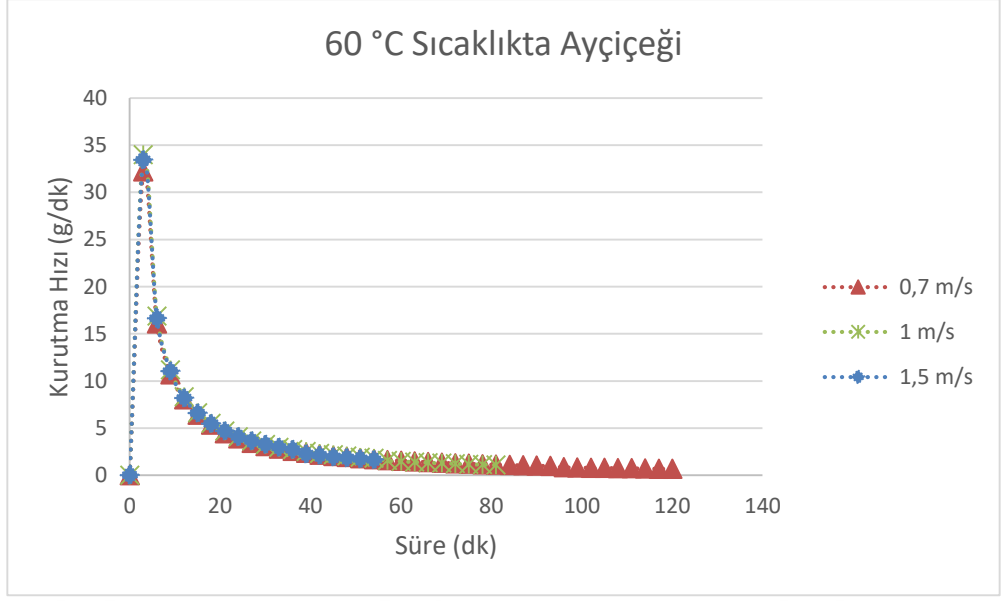
Ayçiçeklerinin zamana karşı azalan hızla kurudukları grafikleri Şekil 5.24 ve Şekil 5.27 arasında 50 ve 60 derece sıcaklıklarda kurutma hızının zamanla değişimi grafiksel olarak gözlenmiştir.



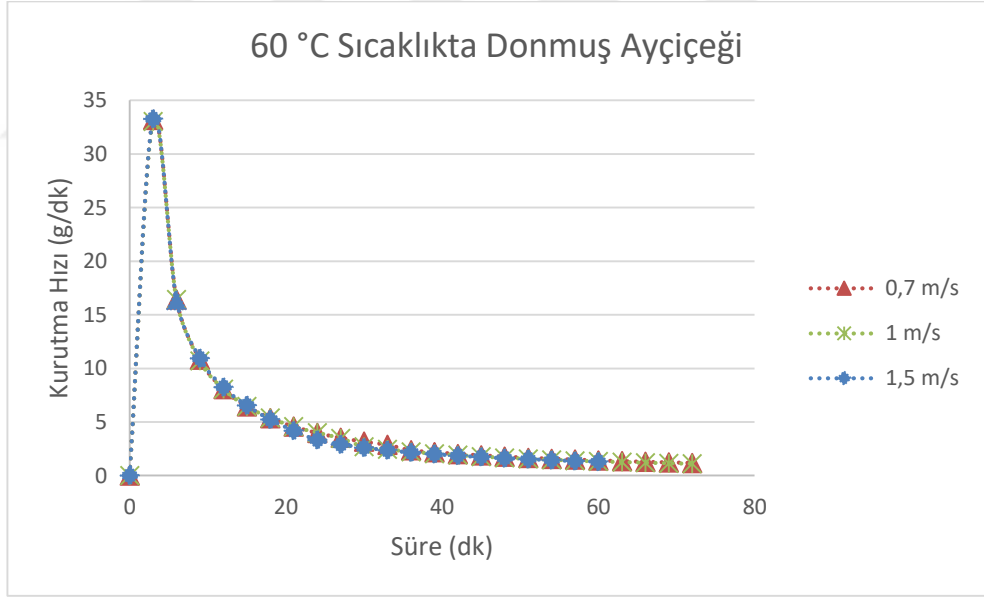
Şekil 5.24: 50°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma hızı grafiği.



Şekil 5.25: 50°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ön işlem uygulanmış ayçiçeği kurutma hızı grafiği.



Şekil 5.26: 60°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ayçiçeği kurutma hızı grafiği.

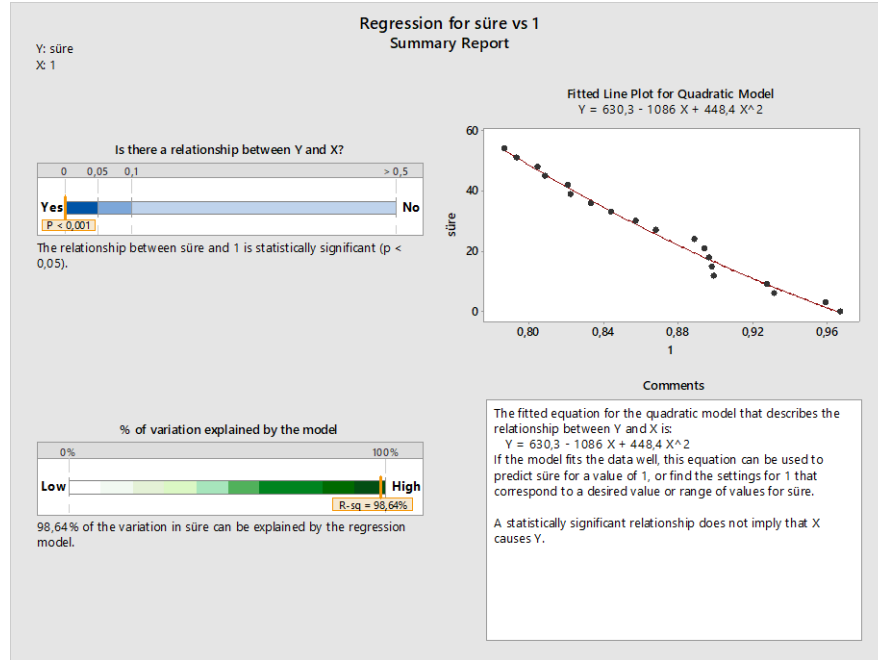


Şekil 5.27: 60°C Sıcaklıkta farklı akış hızlarında ön işlem uygulanmış ayçiçeği kurutma hızı grafiği.

6. SONUÇLAR

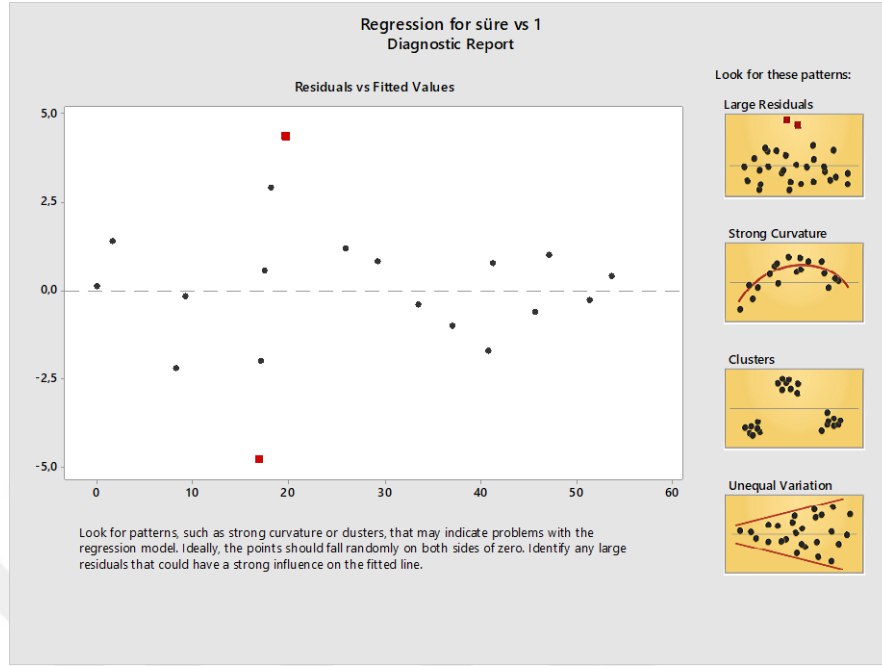
Yapılan analizler sonunda ayçiçeklerinin kuruma işlemindeki kütle değişimleri, kuruma süresince nem kaybederek tamamlanan zamana bağlı kurutma hızı ve nem değişimleri hesaplanıp grafiklerle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak ayçiçeklerinin ön işlem olarak dondurulması malzeme içeriğinin zarar görmeden saklanabilmesi yanında, kurutma süresini de azalttığı yöndeki etkisi görünmektedir. Ayçiçeklerinin kurumasında içeriğindeki nemin azalarak geçen süre sonunda selülozik kabuk yapısının bozulması ve gözenek yapısının bir andaki değişimi dolayısıyla ani ve hızlı bir şekilde içeriğindeki nemin tamamını kaybettiği gözlenmiştir.

Bu grafikler ve değerlerle hesaplanan minitab programında yapılan regresyon analizinde Şekil 5.28'de programla hesap edilen nem değerlerinin süreye karşı oluşturulan regresyon analizindeki verilerin nominale yaklaşımı ve dağılımı gösterilmiştir.

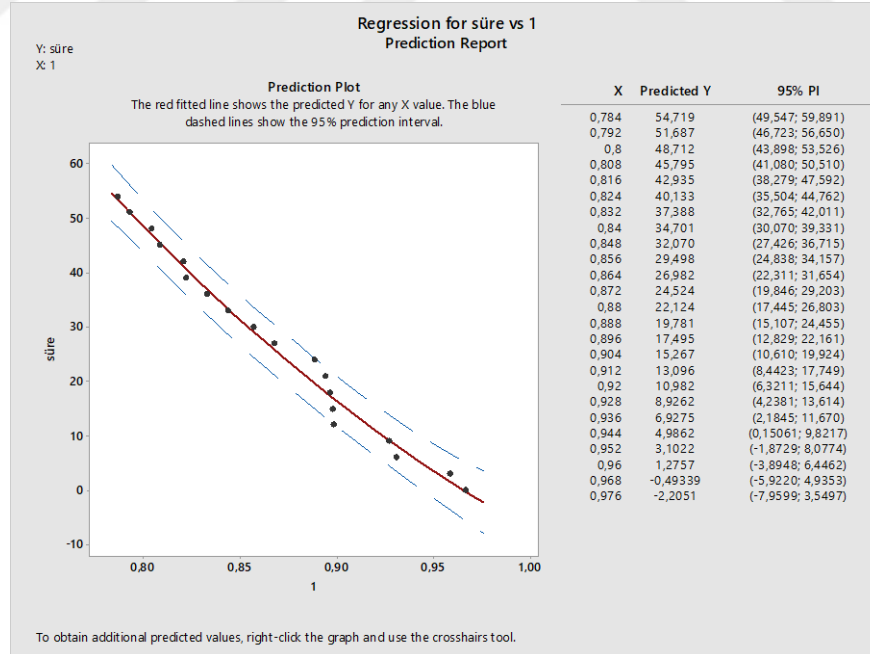


Şekil 6.1: Minitab program çıktısı (pvalue < 0,5).

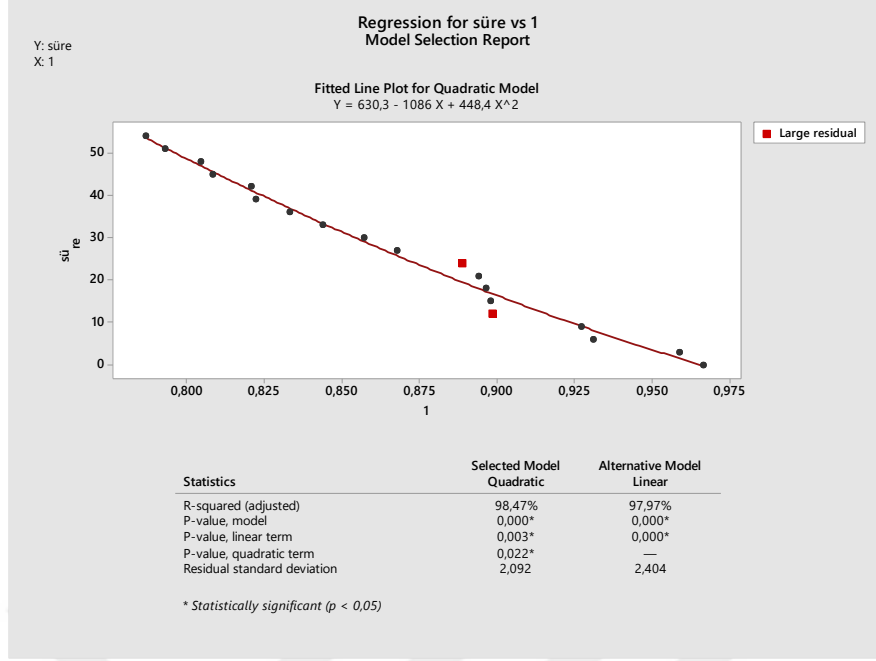
Şekil 5.29'da nem değerlerinin yakınsama yapılan analiz sonucu eğrisi gösterilmiştir. Şekil 5.30 ve Şekil 5.31 çıkan eğrinin matematiksel denklemi ile eğimini vermiştir.



Şekil 6.2: Minitab programı regresyon analizi dağılımı (süreye karşı akış hızındaki nem değeri).



Şekil 6.30: Minitab programı regresyon analizi %99 güven aralığındaki dağılım.



Şekil 6.31: Minitab programıyla dağılımın modellenmesi.

Programdan elde edilen denklem ile kinetik teorilerdeki benzerlik değerlendirildiğinde; Regresyon analizi sonrasında eğrinin denklemi:

$$“Y = 630,3 - 1086 X + 448,4 X^2” \text{ olarak belirlenmiştir.} \quad (5.1)$$

Wang ve Singh (1978) matematiksel modeli, çizilen eğriyle uygunluk göstermektedir. Bu şekilde; ayçiçeğinin 40 derece sıcaklıkta, dondurulması sonrası kurutma işleminde 1m/s hızla kurutma işlemi sonucu gerçekleşen nem değerlerine göre çıkartılan model belirlenmiş olur.

Sıcaklık arttıkça; kuruma süresinin azaldığı ve akış hızı arttıkça; kuruma süresinde azalma olduğu gözlenmiştir. Kurutulan malzeme içerisindeki nem miktarını malzemedan uzaklaştırmak için, su moleküllerinin kinetik enerjilerinin artırılması gerektiği görülmüştür. Ön işlem uygulanarak dondurulan ayçiçekleri, dondurulmadan kurutulan ayçiçeklerinden daha kısa sürede kuruduğu görülmüştür. Aynı zamanda kütle aktarım hızının sıcaklık artışıyla doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Dondurma işleminin, ayçiçek içerisindeki nemin uzaklaştırılmasında süreyi kısaltıcı yönde etkilediği analiz sonucunda grafiklerde gözlenmiştir. Ayçiçeklerinin selülozik kabuk yapısındaki bozulma sonucunda nem kaybının ani ve hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Martínez, A.L., Quiroz, F. J., & Carrera, A. D.** (2021). Detection of *Plasmopara halstedii* in sunflower seeds: A case study using molecular testing. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 395-400.
- [2] **Nuccio, M. L., Paul, M., Bate, N. J., Cohn, J., & Cutler, S. R.** (2018). Where are the drought tolerant crops? An assessment of more than two decades of plant biotechnology effort in crop improvement. *Plant science*, 273, 110-119.
- [3] **Meral, Ü. B.** (2019). Ayçiçeği (*helianthus annuus* l.) bitkisinin önemi ve üretimine genel bir bakış. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 2(2), 58-71.
- [4] **Bilek, S., Melikoğlu, A. Y., & Cesur, S.** (2019). Tarımsal atıklardan selüloz nanokristallerinin eldesi. karakteristik özellikleri ve uygulama alanları. *Akademik Gıda*, 17(1), 140-148.
- [5] **Turgut, D. Y., & Topuz, A.** (2020). Depolama süresinin farklı kurutma yöntemleri ile kurutulmuş kamkat dilimlerinin bazı kalite özelliklerine etkisi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(1), 44-56.
- [6] **Bilgic, E., Yaman, S., Haykiri-Acma, H., & Kucukbayrak, S.** (2016). Limits of variations on the structure and the fuel characteristics of sunflower seed shell through torrefaction. *Fuel Processing Technology*, 144, 197-202.
- [7] **Prabhanjan, D.G., Ramaswamy, H. S., & Raghavan, G. V.** (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food engineering*, 25(2), 283-293.
- [8] **Prabhanjan, D.G., Raghavan, G. S. V., & Rennie, T. J.** (2002). Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(2), 185-191.
- [9] **Madamba, P.S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A.** (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal Of Food Engineering*, 29(1), 75-97.
- [10] **Cesur, Ö.** (2013). *Kurutma metodları ve şartlarının nar tanesinin kurutma kinetiği ve kalitesi üzerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- [11] **Ertekin, C., & Yaldiz, O.** (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal Of Food Engineering*, 63(3), 349-359.

- [12] Cemerođlu, B. (2001). Meyve ve sebze işleme teknolojisi. *Gıda Teknoloji Dergisi*, 6, 479-480.
- [13] Bingöl, G., & Devres, O. (2019). *Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri*. İstanbul: İstanbul Sanayi Odası., 39
- [14] Rodriguez, Ó., Eim, V., Rosselló, C., Femenia, A., Cárcel, J. A., & Simal, S. (2019). Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 98(5), 1660-1673, 2018.
- [15] Doymaz, İ., & Karasu, S. (2018). Effect of air temperature on drying kinetics, colour changes and total phenolic content of sage leaves(*Salvia officinalis*). *Quality Assurance And Safety Of Crops & Foods*, 10(3), 269-276, 2018.
- [16] Babalis, S. J., & Belessiotis, V. G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal Of Food Engineering*, 65(3), 449–458,
- [17] Özdemir, M., & Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal Of Food Eng*, 42(4), 225-233,
- [18] Köse, Y. (2018). Usage possibilities of mathematical modelling in drying technology. *International Journal Of Scientific And Technological Research*, 4(6), 6.
- [19] Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal Of Food Engineering*, 83(4), 541-549.
- [20] Gezer, P. G. (2011). *Modeling drying kinetics of grape seeds and skins from Turkish cultivars* (Yüksek lisans tezi). Middle East Technical University.
- [21] Arkain, B. (2021). *Gölgede, mikrodalga, konvektif ve kombine mikrodalgakonvektif kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş muşmula meyvesinin kurutma kinetiği ve kalite parametreleri açısından incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi.
- [22] Nurhaslina, C. R., Bacho, S. A., & Mustapa, A. N. (2022). *Review on Drying Methods For Herbal Plants*. Materials Today: Proceedings.
- [23] İzli, N. (2012). *Bazı tarımsal ürünlerin mikrodalga konvektif kurutma yöntemiyle ince tabaka kurutma kuramına göre kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi* (Doktora tezi), Bursa Uludağ University.
- [24] Işık, E., Okursoy, R., & Alibaş, İ. (2000). Optik algılayıcılar kullanarak zeytinin renklerine göre ayrılması üzerine bir araştırma. *Türkiye 1. Zeytincilik Sempozyumu*, Bursa.
- [25] Cemerođlu, B., & Özkan, M. (2004). Kurutma teknolojisi. *Meyve Ve Sebze İşleme Teknolojisi*, 2, 479-618.
- [26] Geankoplis, C. J. (2003). *Separation Process Principles*.

- [27] Ashworth, J.C., & Keey, R. B. (1972). The evaporation of moisture from wet surfaces. *Chemical Engineering Science*, 27(10), 1797-1806.
- [28] Doymaz, I. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices. *Journal of Food processing and preservation*, 33, 145-160.
- [29] Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., & Hepbasli, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11-12), 1667-1679.
- [30] Strumillo, C. (1986). *Drying: principles, applications, and design* (Vol. 3). CRC Press.
- [31] Kutlu, N., İsci, A., & Demirkol, Ö. Ş. (2015). Gıdalarda ince tabaka kurutma modelleri. *Gıda*, 40(1), 39-46.
- [32] Orphanides, A., Goulas, V., & Gekas, V. (2016). Drying technologies: Vehicle to high quality herbs. *Food Eng. Rev.*, 8(2) 164–180. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9128-9>.
- [33] Janjai, S., & Bala, B.K. (2012) Solar drying technology. *Food Eng. Rev.* 4(1) 16– 54, <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9044-6>
- [34] Morshedloo, M.R., Amani Machiani, M., Mohammadi, A., Maggi, F., Aghdam, M.S., Mumivand, H., & Javanmard, A. (2021). Comparison of drying methods for the extraction of essential oil from dragonhead (*dracocephalum moldavica* l., lamiaceae). *J. Essent. Oil Res.*, 33(2) 162–170. <https://doi.org/10.1080/10412905.2020.1848652>.
- [35] Thamkaew, G., Sjöholm, I., & Galindo, F.G. (2021). A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 61(11), 1763–1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>.
- [36] Hazrati, S., Lotfi, K., Govahi, M., & Ebadi, M.T. (2021) A comparative study: Influence of various drying methods on essential oil components and biological properties of *stachys lavandulifolia*. *Food Sci. Nutr.* 9(5) 2612–2619. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2218>
- [37] Alara, O.R., Abdurahman, N.H., Abdul Mudalip, S.K., & Olalere, O.A. (2018). Mathematical modeling of thin layer drying using open sun and shade of *Vernonia amygdalina* leaves. *Agric. Nat. Resour.*, 52(1), 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.05.013>
- [38] Sukadeetad, K. Nakbanpote, W. Heinrich, M., & Nuengchamnon, N. (2018). Effect of drying methods and solvent extraction on the phenolic compounds of *Gynura pseudochina*(L.) DC. leaf extracts and their anti-psoriatic property, *Ind. Crops Prod.*, 120(April) 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.020>
- [39] Mokhtarikhah, G., Ebadi, M.T., & Ayyari, M. (2020). Qualitative changes of spearmint essential oil as affected by drying methods. *Ind. Crops Prod.*, 153 112492. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112492>
- [40] de Aquino Brito Lima-Corrêa, R., dos Santos Andrade, M., da Silva, M.F.D.G.F., Freire, J. T., & Ferreira, M.D.C. (2017). Thin-layer and vibrofluidized drying of basil leaves(*Ocimum basilicum* L.):

analysis of drying homogeneity and influence of drying conditions on the composition of essential oil and leaf colour. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants*, 7, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.05.001>.

- [41] **Dehghani Mashkani, M.R. Larijani, K. Mehrafarin, A., & Naghdi Badi, H.** (2018). Changes in the essential oil content and composition of *Thymus daenensis* Celak. under different drying methods. *Ind. Crops Prod.*, 112(June 2017) 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.012>
- [42] **Ceylan, I., & Gürel, A.E.** (2016). Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves, *Appl. Therm. Eng.*, 106(June) 899–905. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.077>
- [43] **Rabha, D.K. Muthukumar, P., & Somayaji, C.** (2017). Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*capsicum chinense* jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renew. Energy*, 105583–589. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.091>.
- [44] **Lyczko, J., Surma, G., & Carbonell-Barrachina, S.** (2019). Determination of various drying methods' impact on odour quality of true lavender (*lavandula angustifolia* mill.) flowers. *Molecules*, 24(16), 2900. <https://doi.org/10.3390/molecules24162900>.
- [45] **Parikh, D.M.** (2015). Vacuum drying: Basics and application. *Chem. Eng. (United States)*, 122(4), 48–54.
- [46] **Ghasemi Pirbalouti, A., Salehi, S., & Craker, L.** (2017). Effect of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil from the aerial parts of coriander. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants*, 4, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.07.006>
- [47] **Tummanichanont, C., Phoungchandang, S., & Srzednicki, G.** (2017). Effects of pretreatment and drying methods on drying characteristics and quality attributes of *Andrographis paniculata*. *J Food Process Preserv*, 41(6), e13310. <https://doi.org/10.1111/jfpp.2017.41.issue-610.1111/jfpp.13310>.
- [48] **Djamila, B., Fatima Zohra, K., Lahcene, K., & Zohra, R.F.** (2021). Drying methods affect the extracts and essential oil of *Mentha aquatica* L. *Food Biosci.* 41(November) 2019, <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101007>.
- [49] **Klungboonkrong, V., Phoungchandang, S., & Lamsal, B.** (2018). Drying of *Orthosiphon aristatus* leaves: Mathematical modeling, drying characteristics, and quality aspects. *Chem. Eng. Commun.*, 205(9), 1239–1251. <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1443080>.
- [50] **Bhardwaj, A.K., Chauhan, R., Kumar, R., Sethi, M., & Rana, A.** (2017). Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi(medicinal herb). *Case Stud. Therm. Eng.*, 10, 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.07.009>.

- [51] Ali, A., Yusof, Y.A., Chin, N.L., & Ibrahim, M.N. (2017). Processing of Moringa leaves as natural source of nutrients by optimization of drying and grinding mechanism. *J Food Process Eng.*, 40(6), e12583. <https://doi.org/10.1111/jfpe.2017.40.issue-610.1111/jfpe.12583>.
- [52] Ebadi, M.T., Azizi, M., Sefidkon, F., & Ahmadi, N. (2015). Influence of different drying methods on drying period, essential oil content and composition of *Lippia citriodora* kunth. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants*, 2(4), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.06.001>.
- [53] Ye, S., Wang, Z., Shen, J., Shao, Q., Fang, H., Zheng, B., & Younis, A. (2019). Sensory qualities, aroma components, and bioactive compounds of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. as affected by different drying methods, *Ind. Crops Prod.*, 134, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.063>.
- [54] Mahayothee, B., Thamsala, T., Khuwijitjaru, P., & Janjai, S. (2020). Effect of drying temperature and drying method on drying rate and bioactive compounds in cassumunar ginger (*Zingiber montanum*). *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants*, 18, 100-262, <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100262>.
- [55] Meng, Q., Fan, H., Li, Y., & Zhang, L. (2018). Effect of drying methods on physico-chemical properties and antioxidant activity of *dendrobium officinale*, *J. Food Meas. Charact*, 12(1) 1–10, <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9611-5>.
- [56] Ahmed, A., Ayoub, K., Chaima, A.J., Hanaa, L., & Abdelaziz, C. (2018). Effect of drying methods on yield, chemical composition and bioactivities of essential oil obtained from Moroccan *Mentha pulegium* L. *Biocatal. Agric. Biotechnol*, 16 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.10.016>.
- [57] Şevik, S. (2014). Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. *Sol. Energy*, 105, 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.037>.
- [58] Morad, M.M., El-Shazly, M.A., Wasfy, K.I., & El-Maghawry, H.A.M. (2017). Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying peppermint plants. *Renew. Energy*, 101, 992–1004. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.042>.
- [59] Amer, B.M.A., Gottschalk, K., & Hossain, M.A. (2018). Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. *Renew. Energy*, 121, 539– 547, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.055>
- [60] Gan, S.H., Ng, M.X., Tham, T.C., Chua L.S., Aziz, R., Baba, M.R., Chuah Abdullah, L., Ong, S.P., & Law, C.L. (2017). Drying characteristics of *Orthosiphon stamineus* Benth by solar-assisted heat pump drying. *Dry. Technol.*, 35(14), 1755–1764, <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1275673>.
- [61] Zotti-Sperotto, N.C., de Ávila, M.B.R., de Souza, R.A., Melo, E.D.C., Governici, J.L., Gonzaga, D.A., Fonseca, M.C.M., Carneiro, A.P.D.S., Demuner, A.J., Pinheiro, P.F., & Lisbôa, C.F. (2021).

Intermittent drying of *Lippia origanoides* H.B.K. leaves and *Schinus terebinthifolius* raddi fruits. *Ind. Crops Prod.*, 161, 113–152. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113152>

- [62] Rababah T.M., et al. (2015). Effects of drying process on total phenolics, antioxidant activity and flavonoid contents of common mediterranean herbs. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 8(2), 145–150. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150802.1496>
- [63] Pirbalouti, A.G., Mahdad, E., & Craker, L. (2013). Effects of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil of two basil landraces. *Food Chem.*, 141(3), 2440–2449, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.098>
- [64] Pandey, S.K., Sarma, N., Begum, T., & Lal, M., (2020). Standardization of different drying methods of fresh patchouli (*pogostemon cablin*) leaves for high essential oil yield and quality. *J. Essent. Oil-Bearing Plants*, 23(3), 484–492. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2020.1798289>
- [65] Calín-Sánchez, Á., Figiel, A., Lech, K., Szumny, A., & Carbonell-Barrachina, Á.A. (2013). Effects of drying methods on the composition of thyme (*thymus vulgaris* l.). *Essential Oil. Dry. Technol.*, 31(2), 224–235. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.725686>.
- [66] Wang, J., Li, Y., Lu, Q., Hu, Q., Liu, P., Yang, Y., Li, G., Xie, H., & Tang, H. (2021). Drying temperature affects essential oil yield and composition of black cardamom (*Amomum tsaoko*). *Ind. Crops Prod.*, 168, 113580. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113580>.
- [67] Sárosi, S., Sipos, L., Kókai, Z., Pluhár, Z., Szilvássy, B., & Novák, I. (2013). Effect of different drying techniques on the aroma profile of *Thymus vulgaris* analyzed by GC–MS and sensory profile methods. *Ind. Crops Prod.*, 46, 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.028>.
- [68] Orphanides, A., Goulas, V., & Gekas, V. (2013). Effect of drying method on the phenolic content and antioxidant capacity of spearmint. *Czech J. Food Sci.*, 31(5), 509–513.
- [69] do Nascimento Silveira Dorneles, L., Luís Duarte Goneli, A., Andrea Lima Cardoso, C., Bezerra da Silva, C., Rosemari Hauth, M., Cardoso Oba, G., Schoeninger, V., (2019). Effect of air temperature and velocity on drying kinetics and essential oil composition of *piper umbellatum* l. leaves. *Ind. Crops Prod.*, 142, 111846. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111846>.
- [70] Łyczko, J., Jałoszynski, K., Surma, M., Masztalerz, K., & Szumny, A., (2019). Hs-spm analysis of true lavender (*lavandula angustifolia* mill.) leaves treated by various drying methods. *Molecules*, 24(4) 1–13. <https://doi.org/10.3390/molecules24040764>.
- [71] An, K., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y., & Xiao, G. (2016). Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale*

Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. *Food Chem.*, 197, 1292–1300, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.033>.

- [72] **Bee Lin, C., Figiel, A., Chong, C.H., Wojdyło, A., Szumny, A., & Lech, K.** (2019). Characterisation of the convective hot-air drying and vacuum microwave drying of cassia alata: Antioxidant activity, essential oil volatile composition and quality studies, *Molecules* 24(8), 1625, <https://doi.org/10.3390/molecules24081625>.
- [73] **Calín-Sánchez, Á., Lech, K., Szumny, A., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á.A.** (2012). Volatile composition of sweet basil essential oil (*ocimum basilicum* L.) As affected by drying method. *Food Res. Int.*, 48(1) 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.03.015>.
- [74] **Jirapakkul, W., Tinchana, P., & Chaiseri, S.** (2013). Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C., Rutaceae) leaves. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 48(1) 143–149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03170.x>.
- [75] **Salih Abbas, I., Hamzah, M.J., & Majeed, A.H.** (2013). Analysis with evaluation of drying temperature on essential oil content of *Achillea frarantissima* L. and *artemisia herb-alba* L. *Int. J. Pharm. Pharm. Sci., Jan.* 5 913–914.
- [76] **Yi, W., & Wetzstein, H.Y.** (2011). Effects of drying and extraction conditions on the biochemical activity of selected herbs. *Hortscience*, 46(1), 70–73, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.1.70>.
- [77] **Shahhoseini, R., Ghorbani, H., Karimi, S.R., Estaji, A., & Moghaddam, M.** (2013). Qualitative and quantitative changes in the essential oil of lemon verbena (*lippia citriodora*) as affected by drying condition. *Dry. Technol.* 31(9), 1020–1028. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.771649>
- [78] **Madhava Naidu, M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., & Hebbar, H.U.,** (2016). Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food Chem.*, 192, 849–856. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.076>.
- [79] **Nijhuis, H.H., Torringa, H.M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., Kloek, W.** (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends Food Sci. Technol.*, 9(1), 13–20. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)00007-1).
- [80] **Shewale, S.R., & Hebbar, H.U.** (2021). Low humidity air and radiofrequency wave based sequential drying of *Rosmarinus officinalis* for improvement of quality. *Ind. Crops Prod.*, 162, 113303. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113303>.
- [81] **Moses, J.A., Norton, T., Alagusundaram, K., & Tiwari, B.K.** (2014). Novel drying techniques for the food industry. *Food Eng. Rev.*, 6(3), 43–55. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>.

- [82] Sarimeseli, A. (2011). Microwave drying characteristics of coriander(*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Energy Convers. Manag.*, 52(2) 1449–1453. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.007>.
- [83] Divya, P., Puthusseri, B., & Neelwarne, B. (2012). Carotenoid content, its stability during drying and the antioxidant activity of commercial coriander(*Coriandrum sativum* L.) varieties. *Food Res. Int.*, 45(1), 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.09.021>.
- [84] Hamrouni-Sellami, I., Rahali, F.Z., Rebey, I.B., Bourgou, S., Limam, F., & Marzouk, B. (2013). Total phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of sage(*salvia officinalis* L.) Plants as affected by different drying methods. *Food Bioprocess Technol.*, 6(3), 806–817. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0877-7>.
- [85] Ozkan, I.A., Akbudak, B., Akbudak, N. (2007) Microwave drying characteristics of spinach. *J. Food Eng.*, 78(2), 577–583, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.026>.
- [86] Rao, L.J., Singh, M., Raghavan, B., & Abraham, K.O. (1998). Rosemary(*rosmarinus officinalis* L.): Impact of drying on its flavor quality. *J. Food Qual.*, 21(2), 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1998.tb00508.x>.
- [87] Raghavan, B., Rao, L.J., Singh, M., & Abraham, K.O. (1997). Effect of drying methods on the flavour quality of marjoram (*oreganum majorana* L.). *Nahrung – Food*, 41(3), 159–161, <https://doi.org/10.1002/food.19970410309>
- [88] Kemprai, P., Protim Mahanta, B., Kumar Bora, P., Jyoti Das, D., Lakshmi Hati Boruah, J., Proteem Saikia, S., & Haldar, S., A. (2020). 1H NMR spectroscopic method for the quantification of propenylbenzenes in the essential oils: Evaluation of key odorants, antioxidants and post-harvest drying techniques for piper betle L. *Food Chem.*, 331, 127-278. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127278>.
- [89] Pasławska, M., Sala, K., Nawirska-Olszan'ska, A., Stepien', B., & Pla'skowska, E. (2020). Effect of different drying techniques on dehydration kinetics, physical properties, and chemical composition of lemon thyme p. 1934578X2090452 *Nat. Prod. Commun.*, 15(2), <https://doi.org/10.1177/1934578X20904521>.
- [90] Concurso, C., Cincotta, F., Tripodi, G., Merlino, M., & Verzera, A. (2019). Influence of drying technologies on the aroma of Sicilian red garlic. *Lwt.*, 104, 180–185, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.026>
- [91] Rezvani Aghdam, A., Naghdi Badi, H., Abdossi, V., Hajiaghaee, R., & Hosseini, S.E. (2019). Changes in essential oil content and composition of lemon verbena(*lippia citriodora* kunth.) Under various drying conditions. *Jundishapur J. Nat. Pharm. Prod.*, 14(4). <https://doi.org/10.5812/jjnpp.66265>.
- [92] Rubinskiene', M., Viškelis, P., Dambrauskiene', E., Viškelis, J., & Karkleliene', R. (2015). Effect of drying methods on the chemical composition and colour of peppermint(*Mentha piperita* L.) leaves.

Zemdirbyste-Agriculture, 102(2), 223–228.
<https://doi.org/10.13080/z-a.2015.102.029>.

- [93] Bazyma, L.A., Kutovoy, V.A., & Kutovoy, V.A. (2005). Vacuum drying and hybrid technologies. *Stewart Postharvest Rev.*, 1(4), 1–4. <https://doi.org/10.2212/spr.2005.4.7>.
- [94] Soysal, Y., Arslan, M., & Keskin, M. (2009). Intermittent microwave-convective air drying of oregano. *Food Sci. Technol. Int.*, 15(4), 397–406. <https://doi.org/10.1177/1082013209346588>.
- [95] El-Sebaili, A.A., & Shalaby, S.M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Convers. Manag.*, 74, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.006>.
- [96] Tham, T.C., Ng, M.X., Gan, S.H., Chua, Aziz, L.S.R., Chuah, L.A., Hii, C.L., Ong, S.P., Chin, N.L., Law, C.L. (2017). Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump. *Dry. Technol.*, 35(14), 1721–1732. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1271984>.
- [97] Mghazli, S., Ouhammou, M., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A., & Mahrouz, M. (2017). Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves, *Renew. Energy* 108, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.022>.
- [98] Mortezapour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., & Khoshtaghaza, M.H. (2012). Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. *Dry. Technol.*, 30(6), 560–566. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.645261>.
- [99] Alara, O.R., Abdurahman, N.H., & Olalere, O.A. (2019). Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernonia amygdalina* leaves. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 18(3) 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.09.003>.
- [100] Hazarika, U., & Gosztola, B. (2020). Lyophilization and its effects on the essential oil content and composition of herbs and spices. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* 19(4), 467–473. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2020.0853>.
- [101] Antal, T., Figiel, A., Kerekes, B., & Sikolya, L. (2011). Effect of drying methods on the quality of the essential oil of spearmint leaves (*Mentha spicata* L.). *Dry. Technol.*, 29(15), 1836–1844. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.606519>.
- [102] Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., & Sharma, S.C. (2020). Infrared drying of food materials: recent advances. *Food Eng. Rev.*, 12(3) 381–398, <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w>.
- [103] Krishnamurthy, K., Khurana, H.K., Soojin, J., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 7(1), 2–13. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00024.x>.

- [104] **Miraei Ashtiani, S.H., Salarikia, A., & Golzarian, M.R.**, (2017). Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), 128–139.
- [105] **Sellami, I.H., Wannas, W.A., Bettaieb, I., Berrima, S., Chahed, T., Marzouk, B., & Limam, F.** (2011). Qualitative and quantitative changes in the essential oil of *Laurus nobilis* L. leaves as affected by different drying methods. *Food Chem.* 126(2), 691–697. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.022>.
- [106] **Alwi, H., Md Zaki, N.A., Che Radzi, N., Mohd Rodhi, M.N., Ami, M.A., & Ku Hamid, K.H.** (2017). Heat effects from far-infrared source towards antioxidant activity in *aquilaria subintegra* leaves. *Mater. Sci. Forum*, 890, 146–149. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.890.146>.
- [107] **Chua, L.Y.W., Chong, C.H., Chua, B.L., & Figiel, A.** (2019). Influence of Drying Methods on the Antibacterial, Antioxidant and Essential Oil Volatile Composition of Herbs: a Review. *Food Bioprocess Technol.*, 12(3), 450–476. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2227-x>.
- [108] **Dawson, B.S.W., Pearson, H., Kimberley, M.O., Davy, B., & Dickson, A.R.** (2020). Effect of supercritical CO₂ treatment and kiln drying on collapse in *Eucalyptus nitens* wood, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 78(2), 209–217. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01500-5>.
- [109] **Yang, L., Liu, H.** (2020). Effect of supercritical CO₂ drying on moisture transfer and wood property of *Eucalyptus urophylla*, *Forests* 11(10), 1–11. <https://doi.org/10.3390/f11101115>.
- [110] **Hossain, M.B., Barry-Ryan, C., Martin-Diana, A.B., & Brunton, N.P.** (2010). Effect of drying method on the antioxidant capacity of six Lamiaceae herbs. *Food Chem.* 123(1), 85–91, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.003>.
- [111] **Rahimmalek, M., & Goli, S.A.H.** (2013). Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymus daenensis* subsp. *daenensis*. *Celak leaves, Ind. Crops Prod.*, 42, 613–619. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.012>.
- [112] **Michelino, F., Zambon, A., Vizzotto, M.T., Cozzi, S., & Spilimbergo, S.** (2018). High power ultrasound combined with supercritical carbon dioxide for the drying and microbial inactivation of coriander. *Journal of CO₂ Utilization*, 24, 516–521.
- [113] **Günaydın, S.** (2020). *Mikroalga, konvektif ve gölgede kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş kuşburnu meyvesinin kurutma kinetiği, renk ve besin elementi içeriği açısından incelenmesi* (Yüksek lisans tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi.
- [114] **Suicmez, A.O.** (2014) *Dondurarak kurutma sistemlerinde kurutma parametrelerinin deneysel incelenmesi Experimental study on drying parameters of freeze drying systems* (Yüksek lisans tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- [115] Aktas B., Akin Y. & Eser H.S. (2020) *Yer elmasinin tepsili kurutucuda kurutulmasi uzerine kurutma kosullari etkisi ve kurutma kinetigi* (Lisans Bitirme Tezi)
- [116] Demirtas, C., Ayhan, T., & Kaygusuz, K. (1998). Drying behaviour of hazelnuts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(4), 559-564.
- [117] Geankoplis, C. J. (2011). *Transport Processes and Separation Process Principles*, Prentice Hall.
- [118] Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549.
- [119] Sriwichai, T., Sookwong, P., Siddiqui, M.W., & Sommano, S.R. (2019). Aromatic profiling of *Zanthoxylum myriacanthum*(makwhaen) essential oils from dried fruits using different initial drying techniques. *Ind. Crops Prod.*, 133(March) 284–291, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.031>.
- [120] Calín-Sánchez, Á., Figiel, A., Lech, K., Szumny, A., Martínez-Tomé, J., & Carbonell-Barrachina, Á.A. (2015). Dying methods affect the aroma of *Origanum majorana* L. analyzed by GC-MS and descriptive sensory analysis. *Ind. Crops Prod.*, 74, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.067>.
- [121] Choo, C.O., Chua, B.L., & Mah, S.H. (2020). Hybrid drying of *Murraya koenigii* leaves: anti-diabetic and anti-ageing activities. *SN Appl. Sci.*, 2(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3107-3>.
- [122] Naidu, M.M., Khanum, H., Sulochanamma, G., Sowbhagya, H.B., Hebbar, U.H., Prakash, M., & Srinivas, P. (2012). Effect of drying methods on the quality characteristics of fenugreek(*trigonella foenum-graecum*) greens. *Dry. Technol.*, 30(8), 808–816, <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.666607>.
- [123] Güçlü, G., Keser, D., Kelebek, H., Keskin, M., Emre Sekerli, Y., Soysal, Y., & Selli, S. (2021). Impact of production and drying methods on the volatile and phenolic characteristics of fresh and powdered sweet red peppers. *Food Chem*, 338, 128-129, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128129>.
- [124] Lewis, W., K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- [125] Page, G. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer* (Master Thesis), PU Department of Mechanical Engineering, West Lafayette, USA.
- [126] Dinrifo, R., R. (2012). Effects of pre-treatments on drying kinetics of sweet potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(3), 136-145.
- [127] Overhults, D., G., White, G., M., Hamilton, H., E., & Ross, I., J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 112.

- [128] Henderson, S., M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7, 85–89.
- [129] Ghodake, H.M., Goswami, T.K., & Chakraverty, A., (2006). Mathematical modeling of withering characteristics of tea leaves. *Drying Technology*, 24, 159-164.
- [130] Henderson, S.M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transection of ASAC*, 17, 1167-1172.
- [131] Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L., & Hamdy, M.Y. (1980). A model for ear corn drying. *Transections of the ASAE*, 23, 1261-1271.
- [132] Wang, C.Y., & Singh, R.P.,. (1978). *A Single Layer Drying Equation For Rough Rice*. ASAE, St. Joseph.
- [133] Kassem, A.S. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. *13 th International Congress on Agricultural Engineering*, 2-6 February 1998, Morocco.
- [134] Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., & Wratten, F.T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296-301. doi:10.13031/2013.32245
- [135] Karathanos, V.T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39, 337-344. doi:10.1016/S0260- 8774(98)00132-0.
- [136] Diamante, L.M., & Munro, P.A. (1991). Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 26, 99. doi:10.1111/j.1365-2621.1991.tb01145.x
- [137] Diamante, L.M., Munro, P.A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51, 271-276. doi:10.1016/0038- 092X(93)90122-5
- [138] Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513. doi:10.1081/DRT-120005864
- [139] Babalis, S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V.G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75, 205-214. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.008
- [140] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S., & Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin- layer drying of carrot. *International Agrophysics*, 23(4), 313– 317.
- [141] Jena, S., Das, H. (2007). Modelling for vacuum drying characteristic of coconut presscake. *Journal of Food Engineering*, 79, 92-99. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.01.032
- [142] Demir, V., Gunhan, T., & Yağcıoğlu, A.K. (2007). Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering*, 98, 47–53. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.06.011

- [143] **Alibaş, I.** (2012a). Microwave drying of grapevine (*vitis vinifera* L.) leaves and determination of some quality parameters. *Journal of Agricultural Sciences*, 18, 43- 53. doi:10.1501/Tarimbil_0000001191



EKLER

EK A: Gunt marka cihazın kurutma işlemi sonrası verilerini aldığımız program çıktısı



EK A: 60 °C sıcaklıkta 0,7 m/s akış hızı ile kurutulan ayçiçeğinin kurutucu cihaz verileri.

60 derece sıcaklık 0,7 m-s akış hızı ile kurutulan ayçiçeği - Not Defteri

Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

Gunt Gerätebau GmbH
Hanskampring 15-17, Postfach 1125,
22885 Barsbüttel
Germany, Tel +4940 / 67 08 54 -0

Name: CE 130

Date: 05.01.2022

Time: 09:31:17

Comment: Comment Max. 70 Letters

Data Start

t	PHI1, Relative Humidity	T1, Air Temperature	dV/dt, Volumetric Flow Rate Air	IN_1, Heater	IN_2, Fan	IN_3, Over Temperature	m, Mass dm/dt 2, Drying Rate
h:min:s %	degC m³/h %	% g	g/h bar degC kJ/kg g/kg	kg/h W %	%		
09:31:16	17,6660 38,5596 274,8560	100,0000	100,0000 0,0000 100,2900 0,0000	1,0000 20,0000 58,1335 7,5107	306,2710	6736,8228 33,3255	
09:31:18	17,5879 38,6621 266,8579	100,0000	100,0000 0,0000 100,2900 0,0000	1,0000 20,0000 58,2595 7,5190	297,2628	6736,8228 33,2498	
09:34:18	14,2969 47,0410 287,2375	100,0000	100,0000 0,0000 99,8000 -1997,7470	1,0000 20,0000 71,9395 9,4976	311,5861	6734,9414 32,7799	
09:37:18	12,9297 52,8857 281,7773	100,0000	100,0000 0,0000 99,2900 10,1913	1,0000 20,0000 83,1828 11,5170	300,1475	6734,9414 33,7140	
09:40:19	12,2949 56,6504 252,3230	100,0000	100,0000 0,0000 98,3000 20,5908	1,0000 20,0000 91,3251 13,1538	265,6770	6735,8821 34,6404	
09:43:19	12,0117 58,6133 305,3101	100,0000	100,0000 0,0000 98,7000 -4,9991	1,0000 20,0000 95,8618 14,1152	319,5475	6736,8228 35,1784	
09:46:19	11,7969 59,7998 314,8462	100,0000	100,0000 0,0000 98,3500 4,3998	1,0000 20,0000 98,5184 14,6622	328,3458	3223,5330 35,3852	
09:49:19	11,6211 61,4551 295,5432	100,0000	100,0000 0,0000 98,2900 3,7931	1,0000 20,0000 102,7163	15,6116 306,6724	4865,1957 35,9446	
09:52:20	11,5234 61,7480 273,4717	100,0000	100,0000 0,0000 98,3000 -1,6000	1,0000 20,0000 103,2289	15,6914 283,5226	6047,9401 35,8833	
09:55:20	11,4648 61,8506 251,3232	100,0000	100,0000 0,0000 97,9900 -1,5987	1,0000 20,0000 103,3180	15,6848 260,4821	6736,8228 35,8038	
09:58:20	11,3770 62,9199 262,7051	100,0000	100,0000 0,0000 97,7100 13,1853	1,0000 20,0000 106,1911	16,3582 271,4009	6223,0060 36,2113	
10:01:20	11,2891 63,2861 259,3982	100,0000	100,0000 0,0000 97,7600 1,5965	1,0000 20,0000 106,9619	16,5072 267,6924	3652,0857 36,2105	
10:04:20	11,2695 63,3154 258,5522	100,0000	100,0000 0,0000 98,0200 -1,7996	1,0000 20,0000 106,9743	16,5004 266,7968	6736,8228 36,1803	
10:15:26	11,1719 63,7842 265,4736	100,0000	100,0000 0,0000 88,0500 47,6415	1,0000 20,0000 108,0185	16,7129 273,5563	6148,1855 36,2128	
10:18:26	10,8203 65,4834 272,4719	100,0000	100,0000 0,0000 88,0500 47,6415	1,0000 20,0000 111,8227	17,4896 279,3537	5377,6960 36,3187	
10:21:26	10,7520 66,0400 298,4656	100,0000	100,0000 0,0000 88,0500 47,6415	1,0000 20,0000 113,2805	17,8242 305,4969	6736,8228 36,4611	
10:24:26	10,7715 66,2012 297,8503	100,0000	100,0000 0,0000 88,0500 47,6415	1,0000 20,0000 113,8819	17,9893 304,7185	6144,5911 36,5977	
10:27:27	10,7715 65,9668 298,9270	100,0000	100,0000 0,0000 88,0500 47,6415	1,0000 20,0000 113,1350	17,7978 306,0352	5039,4143 36,4681	
10:30:27	10,7422 66,0107 357,2974	100,0000	100,0000 0,0000 88,0500 47,6415	1,0000 20,0000 113,1438	17,7837 365,7477	6639,3384 36,4213	

Data End

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Dila S. Konukluk

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : 2014, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği