

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
GIDA TEKNOLOJİLERİ BİLİM DALI**

**ENGİNARIN (*CYNARA SCOLYMUS L.*) MİKRODALGA  
VAKUM KURUTUCUDA KURUTULMASI VE MATEMATİKSEL  
MODELENMESİ**

**Çiğdem MUŞTU**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi İsmail EREN**



**MANİSA-2018**

**Çiğdem  
MUŞTU**

**ENGINARIN (CYNARA SCOLYMUS L.) MİKRODALGA VAKUM KURUTUCUDA  
KURUTULMASI VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

**2018**

## TEZ ONAYI

**Çiğdem MUŞTU** tarafından hazırlanan "**Enginarın (*Cynara Scolymus L.*) Mikrodalga Vakum Kurutucuda Kurutulması Ve Matematiksel Modellenmesi**" adlı tez çalışması 03/08/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak savunulmuştur.

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi İsmail EREN**  
Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Neriman Bağdatlıoğlu**  
Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Seher Kumcuoğlu**  
Ege Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Çiğdem MUŞTU**



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ .....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
ÖZET.....	VII
ABSTRACT.....	I
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	5
2.1. Enginar .....	5
2.2. Gıda Kurutma Yöntemleri ve Yenilikçi Yaklaşımlar.....	7
2.3. Mikrodalga Kurutmanın Temel İlkeleri .....	10
2.3.1. Dipol Dönmesi.....	12
2.3.2. İyonik Polarizasyon .....	14
2.3.3. Dielektrik Özellikler .....	14
2.4. Mikrodalga Vakum Kurutma Teknolojisi .....	15
2.4.1. Mikrodalga Vakum Kurutma İşlem Parametrelerinin Kuruma Hızına Etkisi .....	16
2.4.2. Mikrodalga Vakum Kurutma İşlem Parametrelerinin Kalite Karakteristikleri Üzerine Etkisi .....	19
2.4.3. Mikrodalga Vakum Kurutma Sistemlerinin Enerji Verimliliği Üzerine Etkisi .....	27
2.5. Matematiksel Modellemenin Kurutma Teknolojileri Açısından Önemi.....	29
2.6. Mikrodalga Vakum Kurutma İşleminin Ürün Kalite Karakteristikleri Üzerine Etkileri .....	31
2.6.1. Toplam Fenolik Madde .....	31
2.6.2. Renk.....	31
2.6.3. Rehidrasyon Oranı .....	32
2.6.4. Polifenol Oksidaz Enziminin Aktivitesi .....	33
2.6.5. Büzülme.....	34
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	35
3.1. Materyal.....	35
3.2. Yöntemler .....	35
3.2.1. Mikrodalga Destekli Vakum Kurutma Sistemi .....	35
3.2.2. Enginarın Mikrodalga Vakum Kurutucuda Kurutulması İşlemi .....	36
3.2.2. Enginarın Mikrodalga Vakum Kurutucuda Kurutulması İşlemi .....	36
3.2.3. Enginarın Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	37
3.2.3.1. Kuruma Eğrilerinin Oluşturulması ve Kuruma Hızının Belirlenmesi .....	37
3.2.3.2. Enginarın Kuruma Kinetiğinin Matematiksel Modellenmesi.....	38
3.3. Fiziksel ve Kimyasal Analizler .....	40
3.3.1. Dielektrik Özelliklerin Belirlenmesi .....	40
3.3.2. Nem Tayini .....	40
3.3.3. Su Aktivitesi Tayini .....	41
3.2.4. Toplam Fenolik Madde Tayini .....	41
3.2.5. Renk Tayini .....	41
3.2.6. Rehidrasyon Oranının Belirlenmesi .....	42

3.2.7. Polifenol Oksidaz Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi.....	42
3.2.8. Kuruma Verimliliği .....	43
3.2.9. Büzülme .....	44
3.2.10. İstatistiksel Analiz .....	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	45
4.1. Dielektrik Özelliklerin Nem İçeriğiyle Değişimi.....	45
4.2. İşlem Parametrelerinin Sıcaklık Profiline Etkisi .....	46
4.3. İşlem Parametrelerinin Enginarın Kuruma Kinetiğine Etkisi .....	49
4.4. Kuruma Kinetiğine ait Matematiksel Modeller.....	53
4.5. Kuruma İşleminin Enginarın Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri .....	55
4.5.1. Taze ve Kuru Enginarın Genel Özellikleri .....	55
4.5.2. Taze ve Kuru Enginarın Kalite Özellikleri .....	58
4.5.2.1. Taze ve Kuru Enginarın Polifenol Oksidaz Enzim Aktiviteleri.....	58
4.5.2.2. Taze ve Kuru Enginarın Toplam Fenolik Madde Miktarları .....	61
4.5.2.3. Taze ve Kuru Enginarın Renk Özellikleri .....	64
4.5.2.4. Kuru Enginarın Rehidrasyon Oranı.....	68
4.5.2.5. Kuru Enginarın Büzülme Katsayısı.....	71
4.6. Kuruma Verimliliği .....	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	76
KAYNAKLAR .....	78
EKLER .....	85
EK A. Taze ve Farklı İşlem Koşullarında Kurutulan Enginarlar .....	85
ÖZGEÇMİŞ .....	88

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>a<sub>w</sub></b>	Su Aktivitesi
<b>BK</b>	Büzülme Katsayısı
<b>GA</b>	Gallik Asit
<b>k</b>	Newton ve Page Model Katsayısı
<b>kb</b>	Kuru Baz
<b>KM</b>	Kuru Madde
<b>n</b>	Reaksiyon Derecesi
<b>PFO</b>	Polifenoloksidaz
<b>RHO</b>	Rehidrasyon Oranı
<b>RMSE</b>	Hata Kareleri Ortalaması Karekökü
<b>TFM</b>	Toplam Fenolik Madde
<b>TÜİK</b>	Türkiye İstatistik Kurumu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bir elektromanyetik dalganın şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.2. Elektromanyetik Spektrum .....	11
Şekil 2.3. Konveksiyonel ile mikrodalga ısıtma arasındaki sıcaklık dağılım yönleri .....	12
Şekil 2.4. Mikrodalganın su molekülüne etkisi .....	13
Şekil 2.5. Dipol Dönmesi .....	14
Şekil 3.1. Laboratuvar tipi Mikrodalga-Vakum Kurutma Sistemi düzeneği .....	36
Şekil 4.1. Dielektrik Sabiti ( $\epsilon'$ ) ve Dielektrik Kayıp Faktörü ( $\epsilon''$ )'nün nem içeriğine göre değişimi .....	45
Şekil 4.2. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların ortalama yüzey sıcaklıkların kuruma süresine göre değişimi .....	46
Şekil 4.3. Farklı işlem koşullarında gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde termal kamera ile belirlenen sıcaklık dağılımları .....	48
Şekil 4.4. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların boyutsuz nem içeriğinin zamanla değişimi .....	49
Şekil 4.5. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma süresine karşı kuruma hızları .....	50
Şekil 4.6. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma hızlarının serbest nem içerikleri ile değişimi .....	51
Şekil 4.7. Deneysel ve Page model ile tahminlenen boyutsuz nem içeriklerinin kuruma süresi ile değişimi .....	55
Şekil 4.8. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma süresine göre kalıntı enzim aktiviteleri .....	59
Şekil 4.9. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların RHO'larının rehidre edilme süresine göre değişimi .....	69
Şekil 4.10. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların büzülme değerlerinin nem içeriğine göre değişimi .....	71



## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 1.1. Türkiye’de enginar üretim alanı ve üretim miktarı.....	3
Tablo 2.1. Orta büyüklükteki bir enginar başının besin maddesi içeriği .....	6
Tablo 4.1. Enginarın kuruma kinetiğini tanımlayan modele ait parametreler ....	54
Tablo 4.2. Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların nem içerikleri .....	56
Tablo 4.3. Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların $a_w$ 'leri .....	56
Tablo 4.4. Farklı işlem koşullarının $a_w$ üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi.....	57
Tablo 4.5. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların polifenol oksidaz enzim aktiviteleri.....	58
Tablo 4.6. Farklı işlem koşullarının polifenol oksidaz enzim aktivitesi üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi .....	59
Tablo 4.7. Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların TFM miktarları .....	62
Tablo 4.8. Farklı işlem koşullarının TFM miktarı üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi.....	62
Tablo 4.9. Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların renk değerleri.....	65
Tablo 4.10. Farklı işlem koşullarının $\Delta E$ üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi .....	67
Tablo 4.11. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların RHO'ları .....	68
Tablo 4.12. Farklı işlem koşullarının RHO üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi .....	70
Tablo 4.13. Farklı işlem koşullarının büzümeye üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi.....	72
Tablo 4.14. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma verimliliği ve Es miktarı.....	74

## TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail Eren'e, bu çalışmada emeği geçen ve yardımcı olan tüm Manisa Celal Bayar Üniversitesi Gıda Mühendisliği çalışan ve personeline ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Enginarın dielektrik katsayılarının belirlenmesindeki katkılarından dolayı İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç.Dr. Filiz Altay'a teőekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, 2017-207 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında temin edilen fiberoptik sıcaklık ölçer ile desteklenmiőtir ve bu projede elde edilen verileri içermektedir. Manisa Celal Bayar Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne tez çalıőmasına sunmuőt olduğu destekten dolayı teşekkür ederim.

Çiğdem MUŞTU  
Manisa, 2018

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### **Enginarın (*Cynara Scolymus L.*) Mikrodalga Vakum Kurutucuda Kurutulması ve Matematiksel Modellenmesi**

**Çiğdem MUŞTU**

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail EREN**

Asteraceae familyasına ait olan enginar (*Cynara scolymus L.*), ekonomiye önemli ölçüde katkıda bulunan ve Akdeniz bölgesinde geleneksel olarak tüketilen bir sebzedir. 'Enginar başı' olarak adlandırılan yenilebilir kısmı, sağlık açısından önemli bileşenleri içermesi nedeniyle tüketiciler tarafından talebi artırmaktadır. Değerli bir besin kaynağı olan enginarın, taze olarak sınırlı bir tüketim mevsimi olması ve konserve veya dondurulmuş şekilde endüstriyel üretiminin oldukça sınırlı olması, bu yöntemlere alternatif olarak kurutulmuş enginarın arz çeşitliliğinin artırılması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Kurutma, meyve ve sebzelerin korunmasında kullanılan en eski yöntemlerden birisidir ve kurutulacak ürüne ve prosese göre farklı tipte kurutma yöntemleri (güneş, sıcak hava, dondurarak, vakum ve mikrodalga destekli hava/vakum gibi) mevcuttur. Mikrodalga vakum teknolojisinde, gıdanın elektromanyetik dalgalarla hızlı ve hacimsel ısıtılması ve vakum uygulanmasıyla buharlaşmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi sağlanır. Mikrodalga vakum kurutma işlemi ile kuruma süresi, geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla düşmektedir.

Bu çalışmada, mikrodalga vakum kurutma yöntemi ile kurutulan enginarların kalite özellikleri üzerine, güç, vakum şiddeti ve işlem süresinin etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Mikrodalga vakum kurutma sisteminde, 526 mm-Hg ve 667 mm-Hg olarak iki farklı seviyede vakum basıncı, 450 W ve 800 W olarak iki farklı seviyede mikrodalga gücü uygulanmıştır. Enginarların kuruma süresi, kuruma hızları ve kuruma verimliliği belirlenmiş, kuruyan ürünlerin toplam fenolik madde miktarı, renk değerleri, rehidrasyon oranı, polifenoloksidaz enzim aktivitesi ve büzülme katsayıları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler varyans analizi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Farklı işlem koşulları ile %10 nem içeriğinin altına kurutulan enginarların su aktivitelerinin azalmasında kuruma süresinin önemli olduğu belirlenmiştir. Tüm vakum seviyelerinde kuruma hızları, uygulanan mikrodalga gücünün artırılmasıyla artmıştır ve kuruma süresi 450 W'da 25 dk'dan, 800 W'da 15 dk'ya düşürülmüştür. Enginarların kuruma süresince sıcaklık profilleri belirlenmiştir ve ortalama yüzey sıcaklıkları -526 mm-Hg vakum şiddetinde 56.3-75.8°C ve -667 mm-Hg vakum şiddetinde 46.5-60.4°C aralığında bulunmuştur.

Sıcaklık inaktivasyon sıcaklığına kısa sürede (<3 dk) ulaştığı için, polifenoloksidaz (PFO) enzim aktivitesinin kuruma sırasında kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Mikrodalga gücü ve kuruma süresinin, PFO aktivitesi üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Polifenol oksidaz enzim aktivitesinin en düşük değeri (4,95±0,45 U/mg taze ürün) 526 mm-Hg ve 800 W'da kurutulan enginarlarda, en yüksek değeri ise (8,55±0,45 U/mg taze ürün) 667 mm-Hg'da 800 W'da kurutulan enginarlarda belirlenmiştir.

Kurutulmuş enginarların toplam fenolik madde içeriklerinin, işlem süresinin artması ve vakum şiddetinin azalması sonucu azaldığı gözlemlenmiş, en yüksek değer (12.46±0.78 mg ga /g km) 667 mm-Hg 800 W'da ve en düşük değer (8.82±0.05 mg ga/g km) 526 mm-Hg 450W'da olduğu bulunmuştur. L, a, b ve Hue değerleri birbirine yakın değerler almıştır. ΔE ise, en yüksek 667 mm-Hg 800 W'da kurutulmuş enginar (12,13 ± 0,20), en düşük -526 mm-Hg 450 W'da kurutulmuş enginar (8,35 ± 0,08) görülmüştür. Enginarların rehidrasyon oranı üzerine, en yüksek derecede etkili olan parametrenin vakum şiddeti olduğu, mikrodalga gücü ve kuruma süresinin de etkili olduğu belirlenmiştir. En düşük rehidrasyon oranı (1,7326±0,1673) 526 mm-Hg'da 450 W'da, en yüksek rehidrasyon oranı (3,3903±0,0932) 667 mm-Hg'da 800 W'da bulgulanmıştır. Rehidrasyon oranına benzer şekilde büzülme katsayısı en düşük (0,2280±0,0127) 526 mm-Hg 450 W'da, en yüksek (0,3205±0,0233) 667 mm-Hg 800 W'da kaydedilmiştir. Büzülme katsayısı ile rehidrasyon oranı arasında yüksek bir pozitif korelasyon katsayısı (r = 0,898) belirlenmiştir. Enginarların kurutulmasında en düşük spesifik enerji gereksinimi (6,32±0,42 MJ/kg su) ve maksimum kuruma verimliliği (%35,89±2,40) -667 mm-Hg 800 W'da kurutma koşullarında bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Enginar, Mikrodalga Vakum Kurutma, Polifenoloksidaz Aktivitesi, Toplam Fenolik Madde, Kuruma Verimliliği

**2018, 88 sayfa**

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Mathematical Modelling of Microwave Vacuum Drying of Artichoke (*Cynara Scolymus L.*)**

**Çiğdem MUŞTU**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Food Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. İsmail EREN**

Globe artichoke (*Cynara scolymus L.*), belonging to the family Asteraceae, is a traditionally consumed vegetable in the Mediterranean area where its commercial production contributes substantially to the agro-economy. The consumer demand for artichokes has increased because of their reputation as a health food due to their phytochemical composition. The economic use of this vegetable mainly concerns the consumption of the edible immature flower heads (capitula), commonly referred to as “artichoke heads”. The fact that artichokes have a freshly limited consumption season and shelf-life, it is necessary to increase the supply diversity by using alternative methods such as canning, freezing and drying. Drying is one of the oldest methods of fruits and vegetables preservation and is done by several methods like sun, hot air, freeze, vacuum, and microwave-assisted air/vacuum drying. Microwave vacuum drying, the emerging food dehydration method, combines the advantages of the rapid volumetric heating by microwaves and the low-temperature evaporation of moisture with faster moisture removal by vacuum. This reduces the drying time without significant quality degradation compared to conventional drying methods.

In this study, it is aimed to determine the effect of process parameters such as microwave power, vacuum intensity and drying time on drying kinetics and quality characteristics of artichokes during microwave vacuum drying. Two different levels of vacuum intensity (-526 mm-Hg and -667 mm-Hg) and microwave power (450 W and 800 W) were studied and the changes in drying rate, drying efficiency, total phenolics content, color values, rehydration ratio, polyphenoloxidase enzyme activity and shrinkage coefficients of artichokes were determined as a function of drying time. The obtained data were evaluated statistically by analysis of variance.

Artichokes were dried until the moisture content reached below 10% (w/w) and vacuum intensity and drying time were found to be the significant factors on lowering the water activity of dried artichokes. The drying rates were increased with the increase in microwave power all vacuum levels, and drying time reduced from 25 min at 450W to 15 min at 800W. Temperature profiles were also determined and average surface temperatures were found in the range of 56.3-75.8 °C at -526 mm-Hg vacuum intensity and 46.5-60.4°C at -667 mm-Hg vacuum intensity.

It was observed the activity of the polyphenoloxidase (PPO) enzyme during drying decreased gradually as the temperature reached the inactivation temperature in a short time (<3 min). Microwave power and drying time was found to be the statistically significant factors on the PPO activity. The lowest value of the polyphenol oxidase enzyme activity was found at 526 mm-Hg and at 800 W in dried artichokes ( $4.95 \pm 0.45$  U / mg fresh product), the highest value of the polyphenol oxidase enzyme activity was found at 667 mm-Hg and at 800 W in dried enginars ( $8.55 \pm 0.45$  U / mg fresh product).

The total phenolic content (TPC) of dried artichokes decreased with drying time and reduced vacuum intensity, the highest content of phenolic material was found to be at -667 mm-Hg and 800 W ( $12.46 \pm 0.78$  mg ga / g km) and the lowest at -526 mm-Hg and 450 W ( $8.82 \pm 0.05$  mg ga / g km). L, a, b and Hue values are close to each other, ( $\Delta E$ ) was at the highest 667 mm-Hg at 800 W dried artichoke ( $12.13 \pm 0.20$ ), at least -526 mm-Hg was seen at 450 W dried artichoke ( $8.35 \pm 0.08$ ). On the rehydration of artichokes, the vacuum intensity was found to be the most significant factor besides the microwave power and drying time. The lowest rehydration rate was found at 450 W at -526 mm-Hg ( $1.7326 \pm 0.1673$ ) and the highest rehydration rate at 800 W at -667 mm-Hg ( $3.3903 \pm 0.0932$ ). In terms of the rate of shrinkage, the shrinkage coefficient was found to be at least at 526 mm-Hg and 450 W ( $0.2280 \pm 0.0127$ ) and the highest at -667 mm-Hg and 800 W ( $0.3205 \pm 0.0233$ ). A high positive correlation coefficient ( $r=0.898$ ) was found between the shrinkage coefficient and rehydration ratio. The lowest specific energy requirement ( $6.32 \pm 0.42$  MJ / kg water) and maximum drying efficiency ( $35.89 \pm 2.40\%$ ) of the microwave drying system was found at drying conditions of -667 mm-Hg and 800 W.

**Keywords:** Artichoke, Microwave Vacuum Drying, Polyphenoloxidase Activity, Total Phenolics Content, Drying Efficiency

**2018, 88 pages**

## 1. GİRİŞ

Hasat edilen gıda maddeleri, tüketimlerine kadar geçen süre içerisinde enzimatik, mikrobiyal ve kimyasal süreçlere bağlı olarak önemli derecede bozulma riski taşımakta ve çeşitli kurutma yöntemleri ile raf ömrünün artırılması gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2, 3].

Gıda sanayinde kurutulacak ürüne ve uygulanacak prosese göre farklı tipte kurutma yöntemleri mevcuttur. Bu kurutma yöntemleri; güneşe maruz bırakarak kurutma, dondurarak kurutma, sıcak hava sirkülasyonu sağlanan fırınlarda kurutma, vakum ve mikrodalga yardımcı hava/vakum kurutma olarak sıralanabilir [4, 5].

Direkt olarak güneş altına serilerek yapılan kurutma tekniği ekonomik olmakla birlikte, bu yöntemle kurutulan üründe kontaminasyon başta olmak üzere birçok sorun ile karşılaşmaktadır. Bu kurutma tekniğinde işlem değişkenleri (bağıl nem, sıcaklık, hava hızı) kontrol altında tutulamadığından; ürünün kalitesi düşmektedir [6]. Aynı zamanda ürünlerde besinsel kayıplar, enzimatik degradasyon ve istenmeyen renk değişimlerine neden olması önemli dezavantajları arasında yer almaktadır [7, 8].

Güneş altında kurutmanın dezavantajlarına alternatif olarak en çok kullanılan yöntem gıdaların sıcak havada kurutulmasıdır. Kullanımının yaygın olmasının yanında sıcak havada kurutma yöntemi, karşıt sıcaklık ve nem değişimlerine bağlı olarak ısı ve nemin ters yönde taşınması ve böylece verimliliğin düşük olması nedeniyle avantajlı bir yöntem değildir [9].

Dondurularak kurutulmuş gıda ürünlerinde bozulma ve enzimatik reaksiyonların çoğunun durdurulması ve kalite kayıplarının olmaması, dondurarak kurutma yöntemini diğer kurutma yöntemlerine göre avantajlı kılmaktadır. Ancak dondurarak kurutma, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri ile uzun işlem süreleri nedeniyle kurutulmuş bir ürünün imalatı için en pahalı işlemlerden biridir [10].

Geleneksel kurutma yöntemlerinin (güneşte ve sıcak hava akımında kurutma vb.) düşük enerji verimliliği, mikrobiyal kalite ile besinsel ve duyuşsal özelliklerde

kayıpların yüksek olması, yeni teknolojiler kullanılarak alternatif yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Gelişmekte olan gıda dehidrasyon yöntemlerinden mikrodalga vakum kurutma işleminde iletkenlik ve konveksiyon yoluyla ısıtma yerine gıdanın elektromanyetik dalgalarla ısıtılması ve vakum uygulanarak buharlaşmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi, kurutma teknolojisindeki mevcut sorunların (düşük enerji verimliliği, ürün kalitesi vb.) çözümünde önemli bir alternatif oluşturmaktadır [2, 3].

Enginar, biyoaktif fenolik bileşikler bol miktarda içermesiyle insan sağlığının korunmasında son derece önemli bir kaynak ve koruyucu, anti-kanserojen, antioksidan, anti-bakteriyel, antigenotoksik, kolesterol düşürücü, hepatoprotektif, diüretik ve anti-inflamatuar kabul edilmektedir [2, 3, 11].

Enginarın kalbi olarak adlandırılan iç kısmı taze olarak sadece mevsiminde tüketilmektedir. Konserve veya dondurulmuş olarak endüstriyel üretimi ise özellikle ülkemizde oldukça sınırlıdır ve tüketici tercihlerinin fonksiyonel gıdalara yönelmesi enginarın arz çeşitliliğinin artırılması ihtiyacını doğurmaktadır. Enginarın uygun ve yenilikçi yaklaşımlar ile kurutulması üretim, depolama, ambalajlama ve taşıma maliyetleri açısından mevcut üretim tekniklerine alternatif oluşturabilecek potansiyele sahiptir.

Bu çalışmada, enginarın mikrodalga vakum teknolojisi ile kurutulması sırasında kurutma davranışı, ürün kalitesi ve kurutma enerji verimliliği üzerine mikrodalga gücü ve vakum şiddetinin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kuruma kinetiğinin matematiksel modellenmesi, dielektrik özelliklerin nem içeriğine bağlı olarak değişimi, enerji sarfiyatı, toplam fenolik madde miktarı, polifenol oksidaz enzim aktivitesi, renk, rehidrasyon oranı, büzülme katsayısı gibi kalite karakteristiklerindeki değişimlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilecek sonuçlar ile mikrodalga vakum kurutma sistemlerinin tasarımı için gerekli verilerin literatüre kazandırılacağı ve ölçek büyütme çalışmaları için bir altyapı oluşturulacağı düşünülmektedir.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Enginar

Akdeniz diyetinin önemli bir bileşenini teşkil eden enginar (*Cynara scolymus* L.), dünya üretiminin % 85'ini oluşturan, çoğunlukla Avrupanın tüm orta ve güney ülkelerinde yaygın olarak üretilen çok yıllık otsu bir bitki türüdür. *Asteraceae* familyasına ait olan ve M.Ö. 4. yüzyıldan beri hem yiyecek hem de ilaç olarak kullanılan bu bitki eski Mısırlılar, Rumlar ve Romalılar tarafından yaygınca kullanılmıştır [12].

Son yıllarda, beslenmedeki yeri önemli olan enginarın üretim alanı ve üretim miktarları, dünyada olduğu gibi ülkemizde de önemli artışlar göstermektedir. Dünyada enginar üretiminin yüksek olduğu ülkeler; İtalya, İspanya, Çin, Mısır, Fransa, Peru, Şili, Arjantin ve ABD olarak verilmektedir. Ülkemizde ise enginar üretimi daha çok İzmir, Bursa, Aydın, Antalya ve Adana illerinde yapılmaktadır [12].

Dünyada 2011 yılında enginar üretim alanı 129692 hektar iken, 2016 yılında % 5.44 oranında artarak 136751 hektar olarak; enginar üretim miktarı ise 2011 yılında 1547931 ton iken, 2016 yılında % 102,97 oranında artarak 3141861 ton olarak gerçekleşmiştir [13].

Türkiye'nin enginar üretim alanı 2011 yılında 2565 hektar iken, 2017 yılında % 15 oranında artarak 2956 hektar olarak gerçekleşmiştir. Enginar üretim miktarı ise 2011 yılında 33460 ton iken, 2017 yılında ise % 14,85 artarak 38431 tona yükselmiştir (Tablo 1.1) [14].

Türkiye'nin dünya enginar üretim alanı içindeki payının TÜİK verilerine göre, 2011 yılında % 1.88 iken 2016 yılında % 2.07 olduğu, enginar üretim miktarı içindeki payı 2011 yılında % 2.16 iken 2016 yılında % 1.16 olduğu belirlenmiştir [14].

**Tablo 1.1.** Türkiye’de enginar üretim alanı (hektar) ve üretim miktarı (ton) [14]

Yıllar	Enginar Üretim Alanı (hektar)	Üretim Miktarı (ton)	Verim (kg/ha)
2004	2357	30000	12728
2005	2779	36000	12954
2006	2925	35007	11968
2007	2835	33807	11925
2008	2856	36320	12717
2009	2904	34859	12003
2010	2364	29070	12297
2011	2565	33460	13045
2012	2523	32173	12752
2013	2666	34014	12758
2014	2680	34576	12901
2015	2572	32701	12714
2016	2835	36368	12828
2017	2956	38431	13001

Tohumla üretilen enginar çeşidi olarak Bayrampaşa, Sakız, yerli tip ve yabancı kaynaklı küçükbaşlı konservelik çeşitler Türkiye’de 2000’li yılların başlarından itibaren konserve ve dondurulmuş olarak endüstriyel tüketim amaçlı kullanılmaya başlanmıştır [15,16].

Enginar, diğer sebzelere kıyasla önemli derecede antioksidan bileşikleri içeren zengin bir biyoaktif fenolik bileşik kaynağıdır [15, 18, 19]. Bazı araştırmacılar enginar kalbindeki fenolik miktarını; 202.4 – 438.1 mg ga/100 g taze ürün aralığında belirlemişlerdir [17, 18, 20].

Curadi ve ark. (2005), İtalya’da yetişen enginar çeşitlerinin yenilebilir kısımlarının toplam fenolik içeriklerini karşılaştırmışlar ve toplam fenolik içeriklerini 7,31-13,05 mg klorojenik asit/ g taze ağırlık aralığında belirlemişlerdir [21].

Lattanzio ve ark. (2005), enginar kalbindeki fenolik bileşik içeriği konusunda bir araştırma yapmış ve TFM miktarını enginar kalbinde 1028.98 mg kafeik asit/100 g taze ürün olarak belirlemişlerdir [22].

Fратиanni ve ark. (2014), Güney İtalya’da yetiştirilen enginarın biyokimyasal özellikleri üzerine bir çalışma yapmış ve Güney İtalya’da yetiştirilen enginarları, gıda

endüstrisi için ve insanlarda çeşitli kronik hastalıkların önlenmesi için yararlı olan potansiyel biyoaktif bileşen rezervi olarak değerlendirerek polifenol içeriğini 528 µg ga / g taze ürün) olarak belirlemişlerdir [23].

Biyoaktif fenolik bileşikler bol miktarda içermesi nedeniyle enginar, insan sağlığının korunmasında iyi bir kaynak olmanın yanı sıra önemli bir üründür ve koruyucu, anti-kanserojen, antioksidan, anti-bakteriyel, antigenotoksik, kolesterol düşürücü, hepatoprotektif, diüretik ve anti-inflamatuar kabul edilmektedir [11, 15, 24]. Enginarın antioksidan özelliklerinin, yapısında bulunan kafeoilkinik asit türevleri ve luteolin glikozitler gibi flavonoidlerden oluşan polifenol fraksiyonuyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir [24].

Lif içeriği bakımından zengin olan enginar, idrar söktürücü özelliği, besleyiciliği, şeker hastalığına ve karaciğer fonksiyonlarının düzenlenmesine olumlu etkisi ile bitkisel ilaç olarak insan beslenmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca kandaki HDL (yüksek) ve LDL (düşük) kolesterolün seviyesinin düzenlenmesini sağlayarak kalp sağlığının korunmasında da fayda sağlamaktadır [25]. Bu etkilerin enginar ekstraktlarının içerdiği flavonlar, flavanonlar, flavonoller, kumarinler, fenolik asitler veya farklı miktarlarda ve kombinasyonlarda bulunabilen antioksidatif bileşenlerin potansiyeline bağlı olduğu bilinmektedir [17, 26]. Hem enginar kafalarının hem de yapraklarının farmasötik özellikleri, yüksek polifenolik bileşikler ve inülin düzeylerini içermesi ile beslenmedeki yerinin artması kaçınılmaz olmuştur [15].

Enginarın bazı temel besin öğeleri Tablo 2.1.'de görülmektedir. Sebze olarak tüketilmesi ve tıbbi özelliklerinden yararlanılmasının yanı sıra enginar; kozmetik, içki, yem, boya sanayinde ve çocuk mamalarının yapımında da kullanılmaktadır [27].

**Tablo 2.1.** Orta büyüklükteki bir enginar başının (128 g) besin maddesi içeriği [27].

Besin İçeriği	Birim	Miktar	Besin İçeriği	Birim	Miktar
Su	g	108.7	C vitamini	mg	14.98
Enerji	kcal	60.2	Tiamin	mg	0.092
Protein	g	4.26	Riboflavin	mg	0.084
Toplam Yağ	g	0.192	Niasin	mg	1.34
Karbonhidrat	g	13.45	Pantotenik asit	mg	0.433
Lif	g	6.91	B-6 vitamini	mg	0.148
Kalsiyum	mg	56.32	Folik asit	mcg	87.0
Demir	mg	1.64	B-12 vitamini	mcg	0.000
Magnezyum	mg	76.80	A vitamini	IU	236.8
Fosfor	mg	115.2	E vitamini	mg-ATE	0.243
Potasyum	mg	473.6	Yağ asitleri, doymuş	g	0.045
Sodyum	mg	120.3	Yağ asitleri, yarı doymuş	g	0.006
Çinko	mg	0.627	Yağ asitleri, doymamış	g	0.081
Bakır	mg	0.296	Kolesterol	mg	0.000
Selenyum	mg	0.256			

## 2.2. Gıda Kurutma Yöntemleri ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Gıdalar yüksek nem içeriğine sahip olması nedeniyle mikrobiyolojik, enzimatik ve biyokimyasal bozulmalara karşı oldukça duyarlıdır. Kurutma, ürünlerin kalitelerinin bozulmadan uzun süre saklanabilmeleri için içerisindeki su miktarını istenilen değere düşürme işlemidir. Bu amaçla, eşzamanlı ısı ve kütle transferi ile gıdaların yapısındaki suyun çoğunlukla buharlaştırılması yolu ile uygulanan önemli bir teknik olarak gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6, 28].

Enerji kullanımının yoğun olduğu temel işlemlerden biri olan kurutma, ürün sıcaklığının kurutma sıcaklığına ulaştırılması ile gerçekleşmekte ve suyun faz değişimi için gerekli olan ısı enerjisi iletkenlik, konveksiyon ve radyasyon yoluyla ürüne aktarılmaktadır. Oluşan su buharının uzaklaştırılması ise zorlanmış hava ve vakum destekli olarak gerçekleştirilmektedir [29].

Gıdaların kurutulmasında uygulanan kurutma yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir;

1. Doğal Kurutma Yöntemleri (Geleneksel Güneşte Kurutma)
2. Yapay Kurutma Yöntemleri
3. Alternatif Kurutma Yöntemleri
4. Kombine Kurutma Yöntemleri [30].

Doğal kurutma yöntemleri, ürünün direkt olarak güneş altına serilmesiyle yapılan kurutma tekniği olarak ekonomik olmakla birlikte, bu yöntemle kurutulan üründe kontaminasyon başta olmak üzere birçok sorun ile karşılaşmaktadır. Bu kurutma tekniğinde değişkenler (bağıl nem, sıcaklık, hava hızı vb.) kontrol altında tutulmadığından; ürünün kalitesi düşmektedir [6]. Aynı zamanda güneş altına sererek kurutma ürünlerde vitamin kaybı, enzim bozulması ve istenmeyen renk değişimlerini meydana getirdiği için pek tercih edilmemektedir [7, 8].

Ürünlerin güneşte kurutma metoduyla kurutulması oldukça uzun zaman alması, daha hızlı, hijyenik olan ve homojen özellik taşıyan endüstriyel boyutlu yapay kurutma metotlarının zamanla güneşte kurutmaya tercih edilmesini sağlamış ve bu sistemlerin gelişmesine olanak vermiştir [2, 3, 31]. Güneş altına sererek kurutmanın olumsuz etkilerini kısmen ortadan kaldırmak ve enerji ihtiyacının güneşten sağlanması ile maliyet avantajlarını sürdürmek amacıyla direk veya indirek olarak güneş enerjisinden yararlanılan güneş kolektörleri ve sera tipi solar kurutucular son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Kurutmanın kontrollü şartlarda yapılması önem kazanmakta ve bu konudaki çalışmalar sürmektedir. [2, 3, 32, 33].

Gıda endüstrisinde kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri dikkate alınarak (katı, sıvı, dilimlenmiş, bütün halde vb.) ve hedeflenen yüksek kapasite, kuruma hızı, ürün kalitesi ve enerji verimliliğine ulaşabilmek amacıyla kesikli ve sürekli sistemde çalışan sıcak hava akımlı kurutma, vakum kurutma, dondurarak kurutma, ozmotik kurutma, valsli kurutma ve püskürtmeli kurutma gibi çeşitli alternatif kurutma sistemleri yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur.

Gıdalarda nemin uzaklaştırılmasında kullanılan en yaygın yöntem olarak sıcak hava akımlı kurutucular kullanılmaktadır [34]. Ürün içerisindeki nemin buhar haline gelmesi için gerekli olan gizli ısı hava tarafından konveksiyon ve iletimle sağlanır. Su buharının üründen uzaklaştırılması ise hava vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Ürün ile sıcak havanın etkileşimi farklı tasarımlar ile çeşitlendirilerek sıcak hava akımlı kurutma sistemleri geliştirilmiştir. Sıcak hava akımlı kurutma sistemleri; kesikli sistemde kabin tipi tepsili kurutucu, yarı-kesikli sistemde tünel kurutucu ve daha yüksek üretim kapasitelerine olanak sağlayan sürekli sistemde konveyör bantlı, akışkan yatak, döner tamburlu kurutucu ve püskürtmeli kurutucu olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, düşük yatırım ve işletim maliyeti (bakım, onarım, işçilik vb.) gerektirmesi ve işlem kontrolünün etkili bir şekilde (sıcaklık, hava hızı, bağıl nem vb.) uygulanabilmesi ile avantaj sağlamaktadır [35, 36, 37]. Bu avantajların yanı sıra, ısı ve kütle transfer verimliliğinin az olması kuruma süresinin uzun ve enerji talebinin fazla olmasına neden olmaktadır. Sıcaklığın artırılması kuruma süresinin kısaltılmasında etkili olmasına karşın, renk, besin maddeleri ve aroma gibi kalite özelliklerinde önemli ölçüde kayıplara neden olabilmektedir [38]. Ayrıca, sıcak hava akımlı kurutucularda kurutulan ürünün yüzeyinde kabuk oluşumu, büzülme, yığın yoğunluğunu ve rehidrasyon kapasitesinde azalma görülmesi ve bu sistemlerin enerji gereksiniminin çoğunlukla doğal enerji kaynaklarından (kömür, doğal gaz vb.) karşılanması dezavantajlarını oluşturmaktadır [38].

Dondurarak-kurutma sistemleri, çok düşük basınç altında donmuş materyalden ya da donmuş çözeltilerden çözücünün (serbest su) süblimasyonla, bağlı suyun ise desorpsiyon işlemi ile uzaklaştırılması işlemidir. Gıda ve ilaç sanayi için önemli bir yapay kurutma yöntemidir. Donmuş üründe yapısal sertlik ve vakum etkisi, işlem sırasında katı matrisin çökmesini önleyerek kurutulmuş ürünün büzülmesini engelleyerek ve gözenekli yapıda ürünler elde edilmesini sağlar. Ayrıca, düşük sıcaklıkta olması ve vakum ile oksijenin uzaklaştırılması diğer kurutma yöntemlerinden daha kaliteli (renk, şekil, aroma, doku, biyolojik aktivite, vb.) ürünler elde edilmesine olanak sağlamasıyla dondurarak kurutma diğer yapay gıda kurutma yöntemlerine kıyasla en iyi yöntem olarak değerlendirilmektedir. Ancak dondurma, süblimasyon, soğutma ve vakum işlemleri ile yüksek enerji tüketimine sahip olması ve kuruma hızının düşük olması uzun dehidrasyon sürelerine neden

olmaktadır. Sıcak havada kurutmaya kıyasla bu yöntemde işletme maliyetleri ve yatırım maliyetleri oldukça fazladır. Pek çok avantajı olmasına rağmen, dondurarak-kurutma yönteminin kullanımı endüstriyel ölçekte sınırlı olmakta ve yüksek değerli ürünlerde kullanılmaktadır [39].

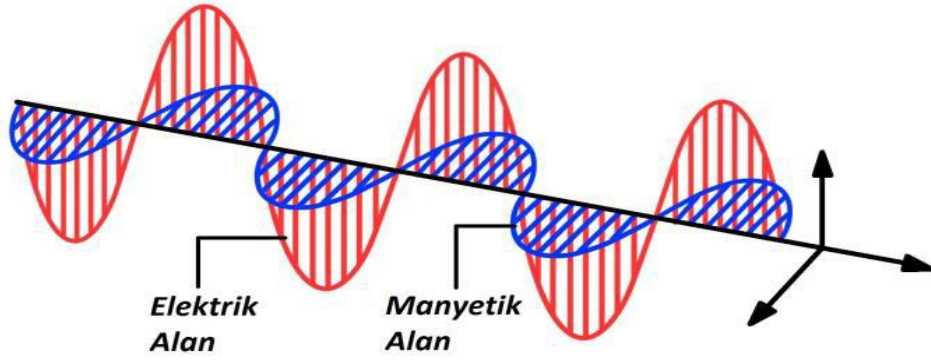
Gıdaların kurutulmasında kullanılan bu yöntemler değerlendirildiğinde, kurutma yöntemlerinin düşük kapasiteli olması, kalite ve besinsel kayıplar oluşması, düşük enerji verimliliği, yüksek iş gücü gereksinimi vb. problemlerin oluşumuna neden olduğu ve günümüz beslenme alışkanlıklarının gerekliliği olan, katma değerli ürünlerin üretilmesinde yetersiz kaldığını göstermektedir. Gıdaların kurutulması ile ilgili son yıllardaki çalışmalar ve araştırmalar sonucu yenilikçi endüstriyel uygulamalar, tek bir kurutma yönteminin sınırlamalarını en aza indirmek amacıyla çeşitli kurutma yöntemlerinin avantajlarının birleştirilmesi ile kombine kurutma tekniklerinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Sıcak hava, dondurarak-kurutma, vakum kurutma ve ozmotik dehidrasyon teknikleri mikrodalga, radyofrekans, kızılötesi ve ultraviyole gibi elektromanyetik ışınım ile kombine edilerek kullanıldığı gibi, kurutma döngüsünün farklı aşamalarında da avantaj sağlamak amacıyla birbiri ardınca kullanılabilir.

### **2.3. Mikrodalga Kurutmanın Temel İlkeleri**

XX. yüzyılın başından itibaren daha çok telekomünikasyon alanında kullanılan mikrodalgaların, XX. yüzyılın ikinci yarısından itibaren telekomünikasyon uygulamaları dışında endüstriyel proseslerde de kullanılabilmesi üzerine birçok frekans tahsis edilmiş ve bu alandaki çalışmalar giderek artmıştır [40].

Mikrodalgalar, dalga boyları 1 mm ile 1 m ve frekansları 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen, radyo, tv ve radar teknolojilerinde kullanılan nükleer veya iyonize olmayan bir ışın şeklinde olup, elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılan bir enerjidir. Çok geniş bir frekans spektrumuna sahip mikrodalgaların, frekans ve güç yoğunluğu gibi iki önemli fiziksel büyüklüğü değişik teknolojilerde kullanımını karakterize etmektedir [40, 41, 42, 43, 44, 45].

Elektromanyetik dalgaların bir versiyonu olan mikrodalgaların, oluşturulma temelleri elektromanyetik dalgalar ile aynıdır. Elektromanyetik dalgalar salınım halinde birbirine ve yayılma yönüne dik elektrik ve manyetik alandan oluşmaktadır. Şekil 2.1’de bir elektromanyetik dalganın şematik gösterimi bulunmaktadır [44, 46].

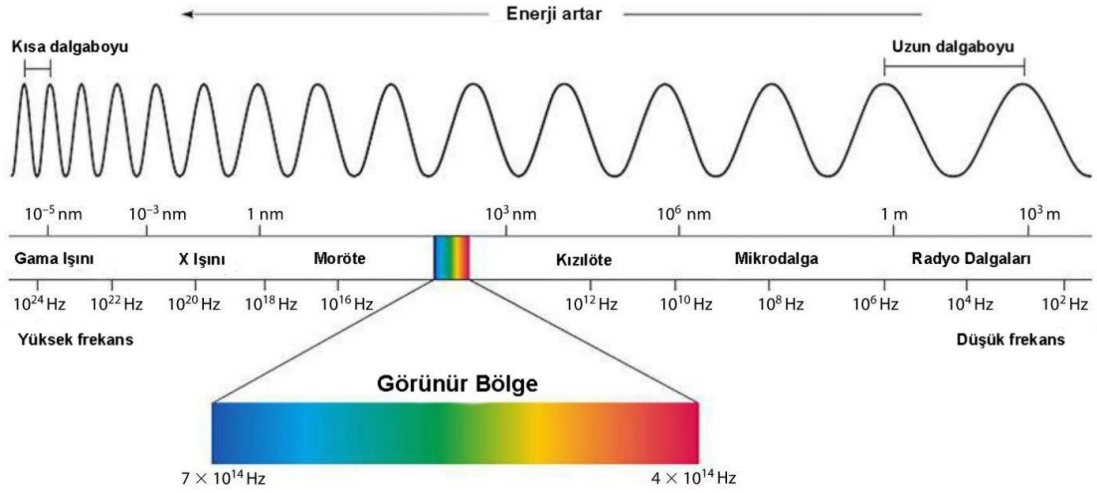


Şekil 2.1. Bir elektromanyetik dalganın şematik gösterimi [47]

Dalganın tepe noktaları arasındaki mesafeye dalga boyu denir. Elektromanyetik dalganın belli bir süredeki titreşim sayısına ise frekans denir. Frekans saniyede bir olan periyot yada Hertz cinsinden ölçülür. Frekans belirlenirken bir saniyedeki periyodu bir Hertz (Hz) olarak belirlenir. Dalgalar bir materyal üzerinde belirli bir hız ile ilerlediğinden, dalga boyu kısaldıkça frekans artmaktadır [48, 49].

Elektromanyetik dalgalar frekans aralıkları ve dalga boylarına göre tanımlanmakta ve enerjinin dalga frekansı ile doğru, dalga boyu ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Şekil 2.2’de elektromanyetik spektrumda mikrodalgaların, dalga boyları ve frekansları açısından kızıl ötesi ışınlar ile radyo dalgaları arasında yer aldığı görülmektedir [40, 46].

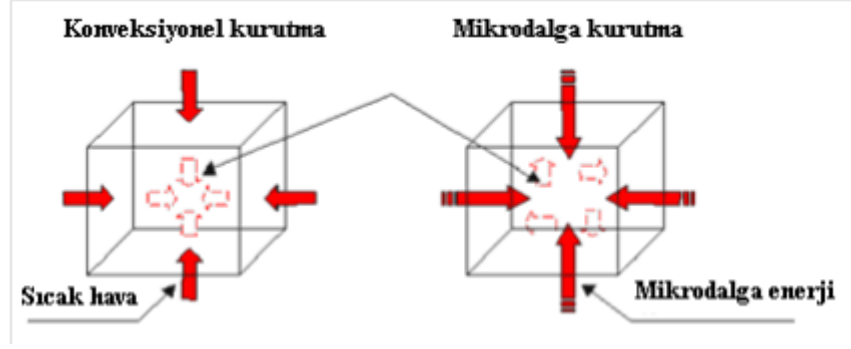




**Şekil 2.2.** Elektromanyetik spektrum [46]

Mikrodalgaların, radyo ve televizyon dalgalarına yakın olması ve kullanım sırasında oluşabilecek etkileşimlerin önlenmesi amacıyla genel mikrodalga uygulamalarında ulusal veya uluslararası telekomünikasyon birliği (ITU) tarafından belirlenen endüstriyel, bilimsel ve tıp uygulamaları (ISM)'nda kullanılan bantlar olarak bilinen bu ışınlar 896, 915, 2450, 5800 ve 24125 MHz frekanslı ışınlardır. Ancak gıda endüstrisinde; ev tipi fırınlarda 2450 MHz, endüstride 915 MHz frekanslı mikrodalga ışınlar kullanılmaktadır [40, 41, 43, 44, 45, 46, 50].

Mikrodalga ile ısıtma sistemlerinde madde içerisinde elektromanyetik enerjinin yalıtkan (dielektrik) bir malzeme tarafından yutulması ve bu madde tarafından emilmesi sonucu direkt ısıya dönüştüğü ve ısı taşınımının konvansiyonel sistemlerin tam tersine maddenin içinden dışarıya doğru olduğu bilinmektedir (Şekil 2.3). Bu tip ısıtma sistemlerinde su moleküllerinin uygulanan alternatif alanı takip edememesi nedeniyle su oranı yüksek olan dielektrik özellik gösteren maddelerde iletim kayıplarının oluşması ile ısı açığa çıkar. Konvansiyonel ısıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında su oranı fazla olan dielektrik özellik gösteren maddelerde ısıtma veya kuruma süresinin çok daha kısa olduğu görülmektedir [44, 49].



**Şekil 2.3.** Konveksiyonel ile mikrodalga ısıtma arasındaki sıcaklık dağılım yönleri [48]

Mikrodalga absorblama özelliği, aynı zamanda su molekülünün "serbest" veya "bağlı" olup olmaması gibi ürün içerisindeki su moleküllerinin kendi durumlarının bir fonksiyonudur. Sonuç olarak, bağlı su çok daha düşük mikrodalga emilimi sağlamaktadır [49].

Mikrodalga alanındaki ısı üretimini açıklayan iki önemli mekanizma vardır. Bunlar iyonik polarizasyon ve dipol dönmesidir.

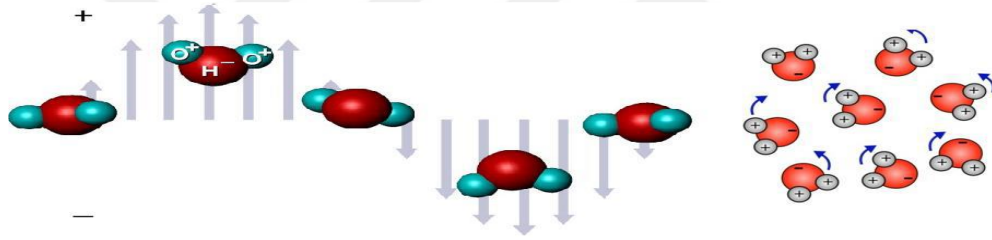
### 2.3.1. Dipol Dönmesi

Mikrodalga ısıtma ile ilişkili temel dayanak, gıda ürünlerinin elektromanyetik alanın elektriksel bileşeninden çok fazla etkilenen maddeleri içermesinden dolayı mikrodalga sistemlerinde kolayca kullanılabilmesidir. Gıdalarda, çoğu zaman ısı üretmek için mikrodalgalarla etkileşime giren kutup gıdalarda ana bileşen olarak en yaygın bulunan su molekülleridir [49].

Polar olan su molekülleri buldukları ortamda genel olarak gelişigüzel şekilde bulunurlar. Gıdanın içerisinde bulunan bu su molekülleri bir elektrik alanı uygulandığında elektrik alanının polarizasyonuna göre sıralanırlar. Elektrik alan uygulanmasıyla gıdalar içerisindeki elektriksel olarak asimetric ve polar moleküller frekansa bağlı olarak polaritesi hızla değişen elektrik alanının polaritesine uyum sağlamak için dönme eğilimi (dipol dönmesi) göstermektedir. Bu dönüşler ile

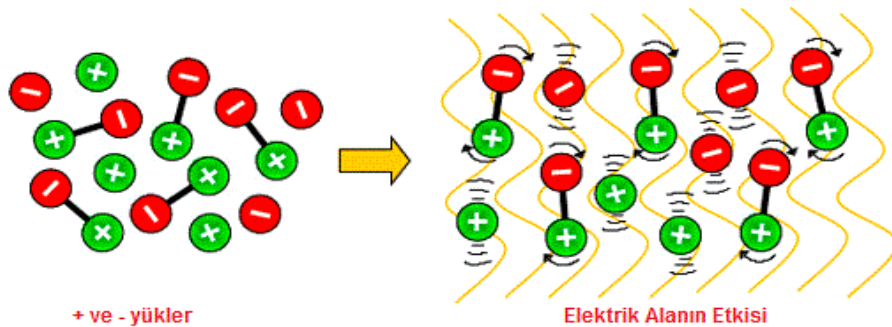
moleküllerin etrafındaki ortam ile sürtünmesiyle ısı açığa çıkar. Ev tipi mikrodalga fırınlar 2450 MHz de çalıştığından elektrik alanın yönü saniyede 2.45 milyar kez değişmektedir. Şekil 2.4'te mikrodalğanın su molekülüne etkisinin, Şekil 2.5'te ise dipol dönmesinin şematik gösterimi verilmektedir [40, 44, 46, 49].

Dipolar rotasyonda, güçlü bir dipol veya tekdüze olmayan bir dağılıma sahip olmasından dolayı, su molekülü, bir mikrodalga varlığında elektrik alanı ile bir mıknatıs alanı ile demir dolgularda olduğu şekilde hizaya girmeye çalışır. Mikrodalga alanı her saniyede milyonlarca kez kutupsallığını tersine çevirdiğinden, su molekülü, içerisinde bulunduğu gıdanın doğası gereği, kendisini tersine çevirmesi ve hareket etmesi gerektiğinde sadece bir yönde hareket etmeye başlar. Bunu yaparken, mikrodalga alanından kinetik enerji çıkarılır ve iç moleküler sürtünme ile ısıtma gerçekleşir [40, 46, 49, 51].



Şekil 2.4. Mikrodalğanın su molekülüne etkisi [40]

Şekil 2.4'te oklar, dalganın yönünü ve kuvvetini göstermekte ve dalganın yönü değiştiğinde, iki hidrojen ve bir oksijen atomundan oluşan su molekülü de yön değiştirmektedir.



Şekil 2.5. Dipol dönmesi [40]

### 2.3.2. İyonik Polarizasyon

Bir çözeltiye elektrik alanı uygulandığında çözeltideki iyonlar mikrodalga alanlarından etkilenir. İyonlar, çözelti akışında doğal yükleri nedeniyle oluşan kuvvetler sonucu bir ivme ile önce bir yöne doğru, sonra ters yönde hareket ederler. İyonize edilmiş bileşikler elektrik alanına maruz bırakıldığında iyonize olmayan gruplarla rasgele çarpışır ve hareket eden iyonlar arasındaki çarpışmalar sonucu iyonların kinetik enerjisi ısı olarak iletilir. Yüksek iyon konsantrasyonu olan bir çözeltide daha fazla sayıda iyon çarpışacağından sıcaklıkta daha hızlı bir yükselme gözlenir [40, 44, 46, 49, 51].

### 2.3.3. Dielektrik Özellikler

Gıda maddelerinin dielektrik özellikleri mikrodalga uygulanan proseslerde oldukça önemli bir etkidir. Dielektrik özellikler, elektromanyetik alana maruz kalan bir materyalin nasıl tepki vereceğini belirleyen bir özelliktir. Bu önemli özellikleri dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) belirlemektedir. Dielektrik sabiti, bir malzemenin elektrik enerjisini depolama kabiliyetinin bir ölçüsüdür, dielektrik kaybı ise elektrik enerjisini ısıya dönüştürme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Bir malzeme için dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve dielektrik kayıp faktörünün ( $\epsilon''$ ) belirlenmesiyle, Eşitlik 2.1 kullanılarak biyolojik malzemelerin kompleks geçirgenliği hesaplanabilir. Bunların yanında, kayıp tanjant ( $\tan \delta$ ) faktörü de, elektromanyetik alanda materyale sızan mikrodalga enerjisinin ısı olarak tüketilme miktarı olarak tanımlanmakta ve materyalin dielektrik kayıp faktörünün dielektrik sabitine oranı ( $\epsilon''/\epsilon'$ ) ile belirlenmektedir [42, 51, 52, 54].

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

Permitivite ( $\epsilon$ ), kompleks bir sayı olup, gerçek kısmına dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve sanal kısmına ise dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) denmektedir. Dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), gıdanın kapasitörlük özelliğini yani materyalin elektrik enerjisinin ne kadarını depolayabileceğini gösterir. Dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) ise gıdanın rezistanslık özelliğini yani enerjinin ne kadarını absorbe edip ısıya dönüştürebileceğini gösterir.

Dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ) dipol dönmesi ve iyonik hareket nedeniyle oluşan kayıpların toplamına eşittir [42, 51, 52, 54].

Dielektrik özellikler, maddelerin su içeriğine, uygulanan elektrik alanının frekansına, materyalin sıcaklığına, yoğunluğuna, kimyasal bileşimine ve fiziksel yapısına bağlı olarak değişmektedir [42, 46, 52, 54].

#### **2.4. Mikrodalga Vakum Kurutma Teknolojisi**

Vakumlu kurutucular, kurutma işlemi sırasında sıcaklığın yüksek olması sonucu yapısı bozulan ürünlerin, daha düşük sıcaklıklarda hızla kurumasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir. Katı ürünlerin kurutulmasında da kullanılmakla birlikte, daha çok sıvı veya püre formundaki ürünlerin, meyvelerin kurutulmasında kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta hızlı kurutma nedeniyle yüzeyi çabuk kuruyarak kabuk oluşturan ve iç katmanlardan yüzeye nem difüzyonunun engellenmesi nedeniyle merkezin kuruması tam olarak sağlanamayan ürünlerin kurutulmasına da uygundur. Bu sistemlerde, ortamdaki hava bir vakum pompası veya buhar enjektörü yardımıyla emilerek belirli basınca sahip bir vakum ortamı yaratılır. Ürün konveksiyon, iletim veya radyasyon yollarından biri veya birkaçı yardımıyla ısıtılarak yapısındaki nemin buharlaşması ve buharlaşan nemin vakum pompası ile uzaklaştırılarak yoğunlaştırıcı yardımıyla sıvı hale dönüştürülmesi sağlanır [46, 55].

Vakum sistemleri, üründe bulunan suyun düşük sıcaklıklarda atmosferik koşullardan daha kolay buharlaşmasını ve ortamdaki havanın da uzaklaşmasını sağlaması ile oksidasyon reaksiyonlarının azaltmaktadır [2].

Kurutma işleminin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi daha kaliteli kurutulmuş ürün elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak vakum sistemlerinin yatırım maliyetlerinin, işletme giderlerinin yüksek olması ve bu yöntemin kesikli olması, bu sistemlerin diğer kurutma yöntemleri ile kombine olarak kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Buna alternatif olarak konvansiyonel sıcak hava ile kurutmaya kıyasla kaliteyi yükseltmek ve işlem süresini kısaltmak için

mikrodalga destekli vakum kurutma yöntemi geliştirilmekte ve meyve-sebzelerin kurutulmasında kullanılmaktadır [56, 57].

#### **2.4.1. Mikrodalga Vakum Kurutma İşlem Parametrelerinin Kuruma Hızına Etkisi**

Gıdalara uygulanacak kurutma işlemlerinde kurutmanın başlaması ve belli bir hızda devam etmesi için ısı girdisi gerekmektedir. Ancak, bu işlemler uygun bir düzende ve hızda gerçekleşmeli, gerçekleşmesi için uygun zaman verilmelidir. Gıdanın homojen kurumaması, lokal ısıtmanın sağlanamaması, keskin köşeli parçaların ve değişik şekildeki ürünlerin belirli bölgelerinde artan ısının daha soğuk bölümlere aktarılamamasından kaynaklı kurutma sırasında sıcaklık dağılımının eşit olmaması ve ürünün hızlı kurummasının bir sonucudur [48].

Endüstride kullanılan birçok mikrodalga sistemi 5-100 kW güç aralığında çalışmaktadır [54]. Güç çıkışının değiştirilmesi genellikle mikrodalga kurutmanın hızını kontrol eder ve güç çıkışı ne kadar yüksek olursa, belirli bir kütle için kurutma o kadar hızlı olur [48, 58].

Maskan (2000), muz dilimlerini  $4,3 \pm 0,177$ ,  $7,4 \pm 0,251$  ve  $14 \pm 0,492$  mm kalınlıklarında keserek, konveksiyonel ( $60^\circ\text{C}$ , 1,45 m/s), mikrodalga (350, 490 ve 700 W) ve mikrodalga destekli konveksiyon (350 W; 4,3 mm kalınlıktaki örnek dilim) yöntemlerini kullanarak kurutmuştur. Konveksiyonel kurutma sisteminde 4,3, 7,4 ve 14 mm kalınlığında örneklerin  $60^\circ\text{C}$  hava sıcaklığında, sırasıyla yaklaşık 482, 610 ve 777 dakikada, mikrodalga kurutma sistemiyle 700, 490 ve 350 W mikrodalga güçlerinde, 13, 18 ve 27 dakikada istenilen nem değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, 4,3 mm kalınlığındaki numunenin kuruma süresinin, mikrodalga enerjisi ile kurutulduğunda 482 dakikadan 13-27 dakikalara düştüğünü göstermektedir. Kurutma sistemleri kıyaslandığında en uzun kuruma süresi konvektif kurutmada görüldüğü gibi güç seviyesi arttıkça kuruma hızının da arttığı görülmüştür. Ayrıca konvektif kurutma ile mikrodalga sistemi kombine edilerek yapılan kurutma da kuruma süresinin %64,3 oranında azaldığı belirlenmiştir. Kalite olarak da mikrodalga kurutma ile kurutulmuş ürünün, en yüksek rehidrasyon seviyelerine sahip olduğu görülmüştür [59].

Motevalli ve ark. (2016) yaptığı bir çalışmada, mikrodalga ve konveksiyonlu kurutucuda papatya yapraklarını 8 mikrodalga güç seviyesinde (200-900 W), 50°C hava sıcaklığında ve 0.5 m/s hava hızında kurutma sonrası kurutma hızlarını ve enerji verimliliklerinin değerlendirerek kuruma kinetiği matematiksel modellenmiştir. Nihai nem içeriğine ulaşmak için gereken toplam kurutma süreleri sırasıyla 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 ve 900 W'de 40, 24, 19, 16, 14, 12, 11 ve 10 dakika olmuştur. Burada, diğer tüm şartlar aynı olduğunda mikrodalga gücünün artmasıyla buharlaşma hızlarının attığı ve böylece kuruma süresinin azaldığı görülmüştür [60].

Yoğurtçu (2014), 8 mm kalınlıktaki limon dilimlerinin mikrodalga fırında kuruma kinetiğini incelemiştir. Mikrodalga çalışma güçleri 90, 180, 360 ve 600 W olarak belirlenmiş ve limon kütlelerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Kuruma hızının mikrodalga gücüne bağlı olarak arttığı bulunmuştur. Sırasıyla 90, 180, 360 ve 600 W mikrodalga çıkış güçlerinde, 52, 16, 8 ve 5.5 dk sonunda nihai nem içeriklerine ulaşılmıştır. Sonuçlar literatürde önerilen ince tabaka kurutma modelleri kullanılarak tanımlanmış ve mikrodalga kurutma davranışını en iyi ifade eden modelin Page modeli olduğu bulunmuştur [45].

Drouzas ve ark. (1999), meyve jelinin farklı mikrodalga güçlerinde (640-710 W) ve farklı vakum seviyelerinde (30-50 mbar) mikrodalga-vakum yöntemiyle ve 60°C sıcaklıkta % 15 bağıl nem ve 4.5 m/s hava hızında bir laboratuvar tüneli hava kurutucusunda kurutulması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Mikrodalga vakum kurutucuda pektin jelinin başlangıçta % 38.4 olan nem miktarı, mikrodalga vakum kurutucu ile 4 dakikada % 3'e inerken, hava akımında kurutmada 8 saatte % 10'a ulaştığı belirlenmiştir. Mikrodalga vakum kurutucu ile meyve jellerinin kuruma hızının arttığı görülmektedir [61].

Kiranoudis ve ark. (1997), kivi, elma ve armut gibi meyvelerin kurutulmasında mikrodalga vakumlu kurutma sistemlerini kullanmış ve bu meyvelere ait kurutma kinetiklerini, proses değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak belirlemiştir. Çalışmada, farklı mikrodalga güçleri (425 kW, 595 kW ve 850 kW) ve vakum basıncı seviyeleri (20 mbar, 40 mbar ve 67 mbar) kullanılarak kivi, elma ve armut meyveleri, 7 farklı zaman aralığında kurutulmuştur. Kullanılan mikrodalga gücünün ürünlerin son nem içeriğindeki değişimlerine etkisi, tüm meyveler için

incelenmiş, 20 mbar vakum basıncında gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde 240 s kurutma sonunda nem içeriklerinin; elma için 425 kW'da 3.04 kg/kg kb iken 850 W'da 0.50 kg/kg kb olduğu; kivi için 425 kW'da 1.98 kg/kg kb iken 850 kW'da 0.72 kg/kg kb olduğu; armut için 425 kW'da 3.07 kg/kg kb iken; 850 kW'da 0.72 kg/kg kb olduğu bulunmuştur. Buradan sabit vakum şiddeti seviyeleri için, mikrodalga gücünün artmasıyla aynı sürede kuruyan ürünlerin son nem içeriğinin daha düşük olduğu ve kuruma hızının mikrodalga gücünün artmasıyla arttığı bildirilmiştir. Kullanılan vakum seviyelerinin, ürünlerin son nem içeriğine (595 kW için), elma için 20 mbar'da 185 s'de, 40 mbar'da 210 s'de, 67mbar'da 240 s'de ulaştığı; kivi için 20 mbar'da 180s'de, 40 mbar'da 205 s'de, 67 mbar'da 245 s'de ulaştığı; armut için 20 mbar'da 150 s'de, 40 mbar'da 215 s'de, 67 mbar'da 245 s'de ulaştığı belirlenmiştir. Kullanılan vakum seviyelerinin, ürünlerin son nem içeriğine ulaşma sürelerine etkisi, tüm meyveler için incelendiğinde, sabit mikrodalga gücü için yüksek vakum seviyelerinde daha düşük nem içeriklerine ulaşıldığı bulunmuştur. Bununla birlikte, bu etkinin mikrodalga gücü için olduğu kadar büyük olmadığı, yüksek seviyede mikrodalga gücü için hızlı kurutma sağlanabilirken, vakum şiddetinin kuruma hızının belirlenmesinde daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır [62].

Sham ve ark. (2001), yaptığı çalışmada elma cipsi üretiminde elma dilimlerinin % 1'lik bir  $\text{CaCl}_2$  çözeltisine batırılma işleminin, vakum seviyesinin ve cips dokusu için elma çeşitliliğinin, sıcak hava kurutma ve vakum mikrodalga kurutma sistemleri ile kurutulmasındaki etkilerini araştırmışlardır. Vakum seviyesinin etkisini incelemek için, elma dilimleri yaklaşık 30 dakika boyunca son nem içeriği yaklaşık % 50 (kb)'ye kadar hava ile kurutulmuş daha sonra kısmen kurutulmuş elma dilimlerini, % 5 (kb) son nem içeriğine kadar kurutmak için 1.5 kW'lık sabit bir mikrodalga gücüyle 7, 14, 21, 24 ve 28 inHg vakum seviyelerinde tekrar bir kurutma işlemine tabi tutmuşlardır. Kurutma süreleri 7 inHg vakumda 10 dakika, 28 inHg vakumda 4 dakika olarak belirlenmiştir. Kurutma tekniklerinin etkisinin araştırılması için, elma dilimleri aynı zamanda sıcak hava ile 70° C'de 1.1m<sup>3</sup>/dak hava akış hızında 3.5 saatte, dondurularak kurutma ile vakum altında, 20° C'lik bir oda sıcaklığı ve -55 ° C'lik bir yoğunlaşma sıcaklığında 10.5 saatte kurutulmuştur. Mikrodalga vakum kurutucuda, en yüksek vakum seviyesi uygulandığında kuruma süresinin kısaldığı ve daha büyük şişirme etkisinden kaynaklı daha kaliteli ürün elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca mikrodalga



vakum sistemleri ile elde edilecek ürünlerin yapısal parametreleri modifiye edilebileceği ve yüksek kaliteli ürün üretilebileceği belirlenmiştir [57].

#### **2.4.2. Mikrodalga Vakum Kurutma İşlem Parametrelerinin Kalite Karakteristikleri Üzerine Etkisi**

Meyvelerin özellikle meyve sularının kurutulmasında, yüksek sıcaklık ve uzun kurutma süreleri, ürünün tat, renk ve besin değerlerinde ciddi kayıplara sebep olabilmektedir. Şeker oranı yüksek gıda maddelerinin yüksek sıcaklığa maruz kalmadan kurutulmaları ve kalite kayıplarının önlenmesi için vakum işlemi uygulanmaktadır. Gıdanın kurutulmasında kullanılan vakum gücü artıkça uygulanan sıcaklık azalacağından ürün daha düşük sıcaklıkta kurumuş olacaktır. Ayrıca kurutma esnasında kurutma kabini içinde havanın yokluğu oksidasyonu azaltacaktır. Bu avantajlardan dolayı kurutulmuş ürünün renk, yapısı ve tadında gelişmeler olacaktır [46].

Chauhan ve Srivastava (2009), yeşil bezelyeleri vakum destekli bir mikrodalga kurutma sisteminde kurutmuşlardır. Mikrodalga güç seviyelerini 100-300 W ve sistem vakumunu 50-400 mm-Hg olarak belirleyerek bazı kalite özelliklerine etkileri (büzülme, görünür yoğunluk, yeşil renk, rehidrasyon, ve duyu özellikleri) belirlenmiş ve istatistiksel olarak yanıt yüzey metodolojisi ile analiz edilmiştir. Sistemin mikrodalga gücü seviyesi, kurutma parametrelerini ve kalite özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Mikrodalga gücü (300 W) sabit tutulduğunda RHO, vakum basıncı 50 mm-Hg'da 2.90, 225 mm-Hg'da 3.06, 400 mm-Hg'da 3.14 bulunmuştur. Vakum basıncı (50 mm-Hg) sabit tutulduğunda ise RHO, 100W'da 2.18, 200W'da 2.64, 300W'da 2.90 olarak bulunmuştur. Buradan, daha yüksek bir güç ve vakum uygulaması ile RHO'nun arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, güç olarak 237.31 W ve vakum olarak 360.22 mm-Hg koşulları, yeşil bezelyenin vakumlu kuru mikrodalga kurutma için optimum kurutma koşulları olarak belirlenmiştir [9].

Drouzas ve Schubert (1996), muz dilimlerini, 25 mbar'dan daha az bir vakum altında bir cam kaba yerleştirerek mikrodalga gücü 150 W olan bir vakum mikrodalga fırınında son nem içeriği % 5 - 8 (kb) oluncaya kadar kurutmuşlardır.

Kurutulmuş ürünler, tat, aroma, koku ve rehidrasyon gibi kalite parametreleri açısından incelenmiş ve konvektif kurutma yöntemi ile kurutulmuş muz örneklerine göre daha kaliteli ürünler elde edilmiştir. Kurutulmuş ürünlerin kalitesi ile ilgili olarak önemli bir parametre olan RHO'nun 350 dk sonunda, mikrodalga vakum kurutma sistemiyle kurutulmuş muz örneklerinde 4.2 ve 6.1 kg/ kg kb olduğu belirlenmiş, geleneksel olarak kurutulan muz örneklerinde 2.5 ve 3 kg/ kg kb olduğu belirlenmiş ve mikrodalga vakum kurutma sistemiyle kurutulan muzların RHO değerlerinin geleneksel kurutmada elde edilen değerlerin iki katı olduğu görülmüştür [63].

Lin ve ark. (1998), 4 mm kalınlığındaki havuç dilimlerini %10 nihai nem içeriğine ulaşmaya kadar 70°C'de sıcak hava ile kurutma, 20 ° C'lik oda sıcaklığında -55 ° C'lik yoğunlaştırıcı sıcaklığı ile 1.6 mm Hg basınçta dondurarak kurutma ve 4 kW değişken mikrodalga gücünde 100 mm-Hg sabit vakumda bir 2450 MHz vakumlu mikrodalga kurutucu ile kurutmuşlardır. Kurutulan havuçlar 25°C'de 180 dk rehidrasyon edilmiştir ve sıcak hava ile kurutulanların RHO'ları 4.8 kg/ kg kb, mikrodalga vakum sistemiyle kurutulanların RHO'ları 6.2 kg/ kg kb olarak bulunmuştur. 100°C'de 10 dk rehidre edilen havuçların RHO'ları ise, sıcak havada kurutulanların 2.5 kg/kg kb, mikrodalga vakum sistemiyle kurutulanların 4.4 kg/ kg kb olarak bulunmuştur. Mikrodalga vakum kurutucu ile kurutulan havuçların, sıcak havaya kıyasla daha yüksek rehidrasyon potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir.

Farklı kurutma sistemleri ile kurutulmuş havuç örneklerinin renk sonuçlarına bakıldığında, sıcak hava ile kurutulmuş havucun L değerinin 43.7, a değerinin 22.8, b değerinin 19.3; dondurarak kurutulmuş havucun L değerinin 63.9, a değerinin 28.2, b değerinin 23.6; vakum mikrodalga kurutucu ile kurutulmuş havucun L değerinin 49.7, a değerinin 27.8 ve b değerinin 25.7 olduğu bulunmuştur. Sıcak hava ile kurutulan havuç dilimlerinin renk tonu daha koyu olarak bulunmuş ve kırmızılık-sarılık değerlerinin dondurarak kurutmaya ve vakum mikrodalga kurutmaya oranla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sıcak hava ile kurutulan havuç dilimlerinin koyu görünümü ve kırmızılık-sarılık değerlerindeki farklılık kurutma sırasında ısıya maruz kalmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Aynı zamanda, sıcak hava ile kurutulan havuçların yoğunluğunun daha yüksek olması, doku hacmi

başına daha yüksek bir pigment konsantrasyonu sağladığından daha koyu görünmesi beklenebilmektedir [64].

Cui ve ark. (2003), 2–3 mm kalınlığında dilimledikleri sarımsakların kurutulmasında mikrodalga-vakum kurutma ile sıcak hava kurutma yöntemlerinin kombine olarak kullanımını, sıcak hava kurutma ve dondurarak kurutma yöntemi ile karşılaştırmışlardır. İşlem koşulları mikrodalga vakumlu kurutucuda 750 W ve 25 mbar; sıcak hava kurutucuda, 0.3 m/s'lik hava hızı ve 60-65°C'de; dondurarak kurutucu ile 5 mbar'da 45°C'lik ısıtma plakası sıcaklığı olarak uygulanmıştır. Son nem içeriği % 5 oluncaya kadar dondurarak kurutma ile kuruma süresi yaklaşık 24 saat, geleneksel sıcak hava ile yaklaşık 6 saat sürmüştür. Mikrodalga-vakumlu kurutma ile (120 g numune; 7 dakika boyunca % 100 güç seviyesi, 8 dakika boyunca % 50 güç seviyesi ve ardından 20 dakika boyunca % 18 güç seviyesi, daha sonra sıcak hava kurutma 45°C'de son nem içeriği % 5 oluncaya kadar uygulanmıştır.) yaklaşık 1 saat olarak belirlenmiştir. Kurutulmuş sarımsak dilimlerinin sertliği, rengi, yapısı ve yeniden su alma oranı değerlendirilmiştir. Renk açısından incelendiğinde sıcak hava kurutucu ile kurutulmuş sarımsak dilimlerinin L\* değeri 68.69, a\* değeri -0.39, b\* değeri 12.02, ΔE değeri 33.96, H değeri -88.14; dondurarak kurutma ile kurutulmuş sarımsak dilimlerinin L\* değeri, 71.62, a\* değeri -1.69, b\* değeri 6.28, ΔE değeri 28.80, H değeri -74.94; ve mikrodalga-vakum kurutma+sıcak hava kombinasyonu kurutucuda kurutulmuş sarımsak dilimlerinin L\* değeri 70.40, a\* değeri -1.35, b \*değeri 7.79, ΔE değeri 30.27, H değeri -80.17 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden görüldüğü gibi, b değeri, sıcak hava ile kurutmada, dondurarak kurutma veya mikrodalga vakum kombinasyonlu kurutmada çok değişmiştir. Bunun nedeni, b değerinin oksijen ve nem varlığında hızlanan maillard reaksiyonu ile güçlü bir şekilde ilişkili olmasıdır. Ayrıca dondurularak kurutulmuş sarımsak diliminin diğerleri arasında en yumuşak olduğu, mikrodalga-vakum ile kurutulan numunenin ise sıcak hava ile kurutulandan daha yumuşak olduğu belirlenmiştir. Hem dondurarak kurutma hem de vakum mikrodalga sisteminde kurutma, numunelerin çok gözenekli bir yapıda olmasını sağlamıştır. Sıcak hava ile kurutmada, suyun düşük taşıma hızı ve uzun süreli kuruma süresi nedeniyle büzülme ve çökme gerçekleşmiş, bu da sert dokuya neden olmuştur. Mevcut çalışmada, rehidrasyon oranları sıcak havada kurutulmuş ürün için 2.56, dondurarak kurutulmuş ürün için 2.60, mikrodalga vakum

kombinasyonlu sıcak havada kurutulmuş ürün için 2.69 olarak bulunmuştur. Bunun nedeni numunelerin, yüzey alanlarının geniş ve kalınlıklarının ince olması ile nüfuz eden su miktarının aynı olmasıdır. Mikrodalga vakum+sıcak hava kurutma yöntemi ve dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulan sarımsak dilimlerinden birbirine yakın sonuçlar alınmıştır. Sıcak hava kurutma yöntemiyle karşılaştırıldığında ise mikrodalga–vakum kurutma yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [65].

Arslan ve Özcan (2011), yaptığı çalışmada kırmızı çan-biber dilimlerinin güneş altında (20-30°C), konveksiyonel fırında (50 ve 70 °C) ve mikrodalga fırında (210 ve 700 W) kurutma davranışlarını incelemiştir. Bu kurutma yöntemlerinin biber dilimlerinin renk indeksleri ve antioksidan aktiviteleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Biber dilimlerinin L\* değerlerinin konveksiyonel fırında kurutma ile diğer yöntemlere kıyasla azaldığını belirleyerek, L\* değerlerindeki azalmanın, kurutma sırasında kahverengi pigment oluşumuna bağlı olabileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca kurutulmuş kırmızı biberlerdeki kahverengi pigmentin, kırmızı biber içindeki yüksek oranda azalan şekerler ve amino asitlere bağlı olmasıyla oluşabileceği sonucuna varmışlardır. Mikrodalgada kurutulmuş biberlerin L \* değerleri taze örnekle karşılaştırıldığında neredeyse hiç değişmemiştir. Taze ve güneşte kurutulmuş numunelerin a\* değerleri konveksiyonel fırında ve mikrodalga fırında kurutulmuş örneklerden daha yüksek bulunmuştur. Düşük güç çıkışlarının mikrodalga kurutma sırasında daha uzun kuruma süresine neden olmasının ve konveksiyonel fırında kurutmanın yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesinin kuruyan ürünlerin kızarıklıklarında azalmaya neden olabileceği öngörülmüştür. Güneşte kurutulan örneklerin en yüksek b\* değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Konveksiyonel fırında ve mikrodalga fırında kurutulmuş örneklerin b\* değerleri, taze biberlerin b\* değerlerine yakın düzeyde bulunmuştur [66].

Soysal (2004), maydanoz yapraklarını farklı mikrodalga güçlerinde kurutarak kuruma süresi, kuruma hızı ve kurutulmuş ürün kalitesi üzerindeki değişimleri değerlendirmiştir. Kurutma deneylerinde 360 ila 900 W arasında değişen yedi farklı mikrodalga çıkış gücü kullanılmıştır. Kurutmada sabit kuruma ve düşen kuruma periyotlarında başlıca incelemeler yapmıştır. Taze ve kurutulmuş maydanoz

yapraklarının renk ölçüm sonuçları incelendiğinde, kurutulmuş yaprakların L\* değerlerinin taze maydanoz yaprakların L\* değerine göre önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, mikrodalgada kurutulmuş yaprakların a\*, b\* ve C değerlerinin taze yaprakların değerlerine göre önemli ölçüde farklı olmadığı, kurutulmuş maydanoz yapraklarında bazı kararmalar meydana gelse de taze maydanoz yapraklarınınkine yakın iyi bir yeşil renk elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, mikrodalga ile farklı güçlerde kurutulmuş yaprakların renk değerlerinin (L, a\*, b\* ve C) de birbirinden önemli ölçüde farklı olmadığı belirtilmiştir. Buradan, renk değerlerindeki değişimin mikrodalga çıkış gücüne bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca mikrodalga gücü olarak 360 W yerine 900 W'da çalışarak, kuruma süresinin % 64 azaltılabileceği belirlenmiştir [67].

Mejia-Meza ve ark. (2008)'nin, yaptığı bir çalışmada yaban mersini, besin değerini korumak için son nem içeriği % 5 oluncaya kadar 65.5 °C, 3000 W ve 2.6 KPa basınçta mikrodalga-vakum ile; 76.6 °C'de sıcak hava kurutma ile; 2.6 Pa basınçta, 20°C ısıtma plakası sıcaklığı ve -60°C kondensör sıcaklığında dondurarak kurutma ile; % 40-50 nem içeriğine kadar 98.8 °C'de sıcak hava ile kurutulduktan sonra 1 saat boyunca -23°C dondurulmuş numuneler, 3000 W'de 71.1°C'de 2.6 KPa basınçta sıcak hava kombinasyonlu mikrodalga vakum ile kurutulmuştur. Kurutulmuş yaban mersinlerinin polifenol retansiyonu, toplam polifenol için antosiyaninler ve antioksidan aktivitesini değerlendirilmiştir. Mikrodalga vakum kurutma ile kurutulan yaban mersinlerinin toplam polifenol içeriklerinin dondurarak kurutmadan sonra sıcak hava kurutmaya kıyasla daha yüksek olduğu, taze üründe glikozitler ve aglikonlar sırasıyla  $66.8 \pm 2.2$ ;  $294.2 \pm 12.9$  g ga/100 g ürün iken, sıcak hava ile kurutulan yaban mersinlerinde  $7.99 \pm 0.16$ ;  $505.4 \pm 7.29$  g ga/100 g ürün ve mikrodalga vakum kurutucu ile kurutulan yaban mersinlerinde  $18.8 \pm 2.4$   $462.6 \pm 22.4$  g ga/100 g ürün olarak bulunmuştur [68].

Kwok ve ark. (2004), Saskatoon çilekleri üzerinde yaptığı bir çalışmada, Saskatoon çileklerini dondurularak kurutma, vakumlu mikrodalga kurutma, hava ile kurutma ve hava ile vakum mikrodalga kurutma kombinasyonunun kullanılmasıyla kurutmuşlardır. Taze Saskaton çileklerinde TFM miktarı Thiessen çeşidinde 18.58 mg ga/g taze ürün ve Smoky çeşidinde 12.13 mg ga/g taze ürün olarak; sıcak hava ile kurutulanlarda TFM miktarı Thiessen çeşidinde 20.5 mg ga/g taze ürün ve Smoky

çeşidinde 14.5 mg ga/g olarak; mikrodalga vakum işlemiyle kurutulanlarda TFM miktarı Thiessen çeşidinde 22.0 mg ga/g taze ürün ve Smoky çeşidinde 17.4 mg ga/g olarak bulunmuştur. Mikrodalga vakum kurutucu ile kurutulan meyvelerin, sıcak hava ile kurutulmuş meyvelere kıyasla daha yüksek miktarda antosiyanin ve TFM içeriğine sahip olduğu, bunun sonucunda da antioksidan aktivitesinin daha fazla olduğu bulgulanmıştır [69].

Wojdylo ve ark. (2014), yaptığı çalışmada vişneleri mikrodalga vakum kurutma, dondurarak kurutma ve sıcak havada kurutma yöntemleriyle kurutarak, kurutulmuş vişnelerin sıcaklık profili ve bazı kalite faktörleri (fenolik bileşikler, antioksidan kapasite ve renk) de dahil olmak üzere, kuruma kinetiği açısından vişne üzerinde vakum-mikrodalga kurutma (VMD) sırasında mikrodalga gücünün etkisini belirlemişlerdir. Mikrodalga vakum kurutma sisteminde vakum basıncı 4-6 kPa arasında, mikrodalga gücü ise vişneler 1 kg/kg kb nem içeriğine ulaşana kadar 120 W ve 240 W, ulaştıktan sonra 240W, 360W, 480W olarak uygulanmıştır. Dondurarak kurutma sisteminde vakum basıncı 0.960 kPa, kurutma bölmesindeki sıcaklık  $-60^{\circ}\text{C}$  ve plakaların sıcaklığı  $26^{\circ}\text{C}$  olarak uygulanırken sıcak hava kurutma sisteminde ise  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  ve  $70^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 1 m/s hava hızı olarak uygulanmıştır. TFM miktarı taze vişnelerde 7905.78 mg/kg km; dondurarak kurutma sonunda 6538.35 mg/kg km, sıcak hava ile kurutma sonrasında  $50^{\circ}\text{C}$ 'de 5182.32 mg/kg km,  $60^{\circ}\text{C}$ 'de 4885.95 mg/kg km ve  $70^{\circ}\text{C}$ 'de 4791.70 mg/kg km olarak belirlenmiştir. Mikrodalga vakum kurutma sisteminde TFM miktarı, nem içeriği 1 kg/kg kb oluncaya kadar 240 W uygulandıktan sonra son nem içeriğine kadar 240 W uygulanan vişnelerde 6410.55 mg/kg km; 360W'da 6195.35 mg/kg km; 480 W'da 6525.67 mg/kg km olarak belirlenmiştir. Nem içeriği 1 kg/kg kb oluncaya kadar 120 W uygulandıktan sonra son nem içeriğine kadar 240W uygulanan vişnelerde TFM miktarı 7510.27 mg/kg km; 360W'da 7320.32 mg/kg km; 480 W'da 7587.33 mg/kg km olarak belirlenmiştir [70].

Wojdylo ve ark. (2009), yaptığı bir çalışma ile çilekleri, son nem içeriği % 5 (kb) oluncaya kadar  $70^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve 1 m/ s hava hızında sıcak hava kurutma ile; 240, 360 ve 480 W mikrodalga güçlerinde ve 4-6 kPa arasında vakum basıncında mikrodalga vakum sistemiyle; vakum basıncı 65 Pa'da  $-60^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $30^{\circ}\text{C}$  ısıtma plakası kullanılarak dondurarak kurutma ile ve  $50^{\circ}\text{C}$  ve 100 Pa'da vakum kurutma

sistemi ile kurutmuşlardır. Kent türü çileklerde TFM içeriği, taze çileklerde 1901.9 mg/ 100 g km; dondurarak kurutulmuş çileklerde 1802.7 mg / 100 g km; vakum kurutma ile kurutulmuş çileklerde 1331.7 mg/ 100 g km; mikrodalga vakum sistemiyle 240 W mikrodalga gücünde 1702.0; 360 W mikrodalga gücünde 1649.5; 480 W mikrodalga gücünde 1657.4 mg/ 100 g km; sıcak hava ile kurutulmuş çileklerde 1220.5 mg / 100 g km olarak belirlenmiştir. Elsanta türü çileklerde ise TFM içeriği, taze çileklerde 2406.9 mg/ 100 g km; dondurarak kurutulmuş çileklerde 2411.5 mg / 100 g km; vakum kurutma ile kurutulmuş çileklerde 1667.6 mg/ 100 g km; mikrodalga vakum sistemiyle 240 W mikrodalga gücünde 2302.4; 360 W mikrodalga gücünde 2277.8; 480 W mikrodalga gücünde 2253.2 mg/ 100 g km; sıcak hava ile kurutulmuş çileklerde 1541.5 mg / 100 g km olarak belirlenmiştir. Burada, mikrodalga vakum kurutma sistemiyle kurutulan çileklerin TFM miktarı, mikrodalga gücünün artmasıyla bir miktar azalmasının yanı sıra dondurarak kurutmadan sonra taze ürüne en yakın değerlerde görülmüştür. TFM içeriklerinin çilek kurutma sırasında sadece uygulanan kurutma tekniğine değil, aynı zamanda çilek çeşidine de bağlı olduğu belirlenmiştir [71].

İçier ve ark. (2008), taze üzüm suyunu, farklı voltaj derecelerinde (20, 30 ve 40 V/cm) ve farklı sıcaklıklarda (20 °C'den 60, 70, 80 veya 90 °C'ye kadar) ohmik olarak ısıtmışlar ve polifenoloksidaz enzim aktivitesindeki değişimi (PFO) ölçmüşlerdir. Voltaj derecesi 30 V/cm'de üzüm suyunun zamana göre polifenoloksidaz enzim aktivitesi değerlendirildiğinde, 60 °C'de ısıtılan olan üzüm suyunun polifenoloksidaz enzim aktivitesi 2.2 U iken önce arttıktan sonra azalarak 2.05 U'ya düştüğü; 70 °C'de ısıtılan olan üzüm suyunun polifenoloksidaz enzim aktivitesi 2.5 U iken azalarak 0.4 U'ya düştüğü; 80 °C'de ısıtılan olan üzüm suyunun polifenoloksidaz enzim aktivitesi 1.6 U iken azalarak 0 U'ya düştüğü; 90 °C'de ısıtılan olan üzüm suyunun polifenoloksidaz enzim aktivitesi 0.5 U iken 0 U'ya düştüğü belirlenmiştir. Diğer voltaj derecelerindeki ısıtma işlemleri de incelendiğinde artan sıcaklık ile polifenoloksidaz enziminin daha hızlı inaktive olduğu görülmüştür. Buradan, kritik deaktivasyon sıcaklıkları 40 V/cm için 60 °C veya daha düşük, 20 ve 30 V/cm için 70 °C olarak bulunmuştur [72].

Bai ve ark. (2013), ağartma işlemi sırasında elma kalitesini değerlendirmek için polifenoloksidaz enzimi (PFO) ve C vitamininin değişimini incelemiştir.

Ağartma işlemi dört farklı sıcaklıkta (90, 100, 110 ve 120 °C) gerçekleştirilmiş ve ağartma süreleri, numuneler ağartma bölgesinin içine yerleştirildiği anda başlatılarak ölçümler her 1 dakikada bir yapılmıştır. PFO aktivitesi  $P/P_0$  (P:taze ürünün PFO enzim aktivitesi,  $P_0$ : işlem görmüş ürünün PFO enzim aktivitesi) olarak verilmiş, PFO enzim 110 ve 120 °C'de 5 dakika ağartma süresi sonunda; 100 °C'de 6 dakika ağartma süresi sonunda; 90 °C'de 7 dakika ağartma süresi sonunda tamamen inaktive edilmiştir. Ağartma çözeltilisinin sıcaklığı artırıldıkça polifenoloksidaz enziminin inaktive olma süresinin azaldığı belirtilmiştir [73].

Jaiswal ve ark. (2010), yaptığı bir çalışma ile nar tanelerini son nem içeriği % 2.7 oluncaya kadar, kabin kurutucusunda 90 °C'de 90 dakika, ardından 70 °C'de 2 saat ve 50 °C'de 9 saat kurutmuşlardır. Ayrıca buna ek olarak, son nem içeriği % 2.7 oluncaya kadar yaz aylarında ortalama sıcaklık 32-43 °C'da güneş altına sererek kurutmuşlardır. Başlangıçta 647.7 U/ml olan polifenoloksidaz enzim aktivitesi, kabin kurutucuda kurutulduktan sonra 205.7 U/ml değerine ve güneş altında kurutulduktan sonra 356 U/ml değerine düşürülmüştür. Kurutulan ürünlerin kurutma sıcaklığına bağlı olarak gerçekleşen artışa ters olarak polifenoloksidaz enzim aktivitesinin azaldığı görülmüştür [74].

Giri ve Prasad (2006), farklı koşullar ve farklı yöntemlerle (mikrodalga-vakum ve konvektif hava)düğme mantarlarının son nem içeriği % 5 oluncaya kadar kurutulması sırasında büzülmeyi değerlendirmişlerdir. Mikrodalga vakum kurutma deneyleri için mikrodalga gücü 150 ve 250 W; sistem basıncı 10 ve 20 kPa olarak seçilmiş ve sıcak hava ile kurutma, hava akış hızı 1.5 m/s olan çapraz akışlı bir hava kurutucuda 60 °C hava sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga vakum kurutucu ile son nem içeriği %5 olana kadar kurutulan mantarların büzülme katsayıları (BK) 10 kPa (mutlak vakum basıncı) vakum basıncında 150 W mikrodalga gücünde 0.223; 250 W mikrodalga gücünde 0.252; 20 kPa (mutlak vakum basıncı) vakum basıncında 150 W mikrodalga gücünde 0.218; 250 W mikrodalga gücünde 0.221 olarak bulunmuştur. Sıcak hava ile son nem içeriği %5 olana kadar kurutulan mantarların BK' ise 0,096 olarak bulunmuştur. Mikrodalga vakum kurutucuda vakum şiddetinin artırılması iç basıncı artırdığından BK daha yüksek seviyelerde; mikrodalga gücünün artması ile de BK'nın arttığı görülmüştür. Mikrodalga vakumlu kurutma sisteminde, sistem basıncının büzülme üzerine



etkisinin mikrodalga güç seviyesine oranla daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu durumun temelini, düşük vakum basıncında mikrodalga vakumla kurutma sırasında basınç farkının daha fazla olmasının üründe daha fazla şişirici etki sağlamasından ve daha az büzülmeye neden olmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir [75].

Nagvanshi ve ark. (2017), yaptığı bir çalışmada farklı çalışma koşullarında mikrodalga vakumlu kurutma (MVK) ile farklı mikrodalga güçleri (100, 110, 120 ve 130W) ve sistem basıncında (200, 400 ve 600 mm Hg) üzüm kurutarak nem oranının bir fonksiyonu olarak büzülme ve yoğunluktaki değişiklikleri incelemişlerdir. Üzümler altı farklı nem içeriğine (% 70, 60, 50, 40, 30 ve 20 kb) kadar kurutulmuş ve büzülme katsayısı, nem içeriğiyle doğrusal olarak azalmıştır. Nem içeriğinin fazla olduğu aşamalarda mikrodalga gücündeki artış kuruma hızını da artırmış ve buharlaşma etkisiyle iç basıncın artmasıyla büzülme oranı daha az olmuştur. Çünkü iç basıncın artması ürünün büzülme oranına ters etki göstermektedir. Deneysel veriler, nem içeriğine bağlı olarak kuruma hızından kaynaklı iç basıncın sürekli farklılık gösterdiğini ve sistem basıncının, mikrodalga vakum kurutma sırasında güç değişimine oranla büzülme ve yoğunluk değişimleri üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [76].

#### **2.4.3. Mikrodalga Vakum Kurutma İşlem Parametrelerinin Enerji Verimliliği Üzerine Etkisi**

Zarein ve ark. (2013), 2450 MHz'de laboratuvar ölçekli bir mikrodalga kurutucuda elma kurutarak enerji verimliliklerini ve kurutma hızlarını belirledikten sonra 9 tane kurutma modeli kullanarak elma örneklerinin mikrodalga ile kurutulması için kuruma süresi ile enerji verimliliğinin değişimini değerlendirmişlerdir. Kurutma deneyleri 200, 400 ve 600 W'de gerçekleştirilmiştir. Kurutmanın ilk fazı sırasında enerji verimliliği çok yüksek olmuş ve bu da mikrodalga gücünün daha yüksek emilimine yol açmıştır. Nem azalmasından sonra, ürün tarafından emilen enerji azalmış ve yansıyan güç artmıştır. 600 W'da kurutulan elmanın kurutma zamanı 5 dk olarak belirlenerek enerji verimliliği %55 olarak bulunmuş, 400 W'da kurutulan elmaların kurutma zamanı 10 dk olarak belirlenerek enerji verimliliği % 25 olarak bulunmuş ve 200 W'da kurutulan elmaların kurutma zamanı 25 dk olarak belirlenirken enerji

verimliliği % 17 olarak bulunmuştur. Elma örneklerinin ortalama enerji verimliliği, çıkış mikrodalga gücünün artmasıyla % 17.42 ile % 54.34 arasında değişerek arttığı görülmüş ve enerji verimliliği ile ilgili en iyi sonucun alındığı mikrodalga güç seviyesi 600 W olarak belirlenmiştir [77].

Durance ve Wang'ın (2002) yaptığı bir çalışmada, domates dilimleri hava kurutma sistemi (HK) ile 70°C sıcaklıkta ve 1.5 m<sup>3</sup>/s hava hızında, mikrodalga vakum kurutma (VMK) ile 6.65 kPa vakumda ve 16 kW mikrodalga gücünde kurutulmuş ve kurutma sırasında buharlaştırılan su miktarları karşılaştırılmıştır. Nem içeriği % 93 olan domatesler, her bir kurutucuda HK/VMK ve % 70/15 HK/VMK) kullanılarak kurutulmuştur. Buharlaşan kilogram su başına tüketilen enerji, % 100 HK ile 29900 kJ, % 95/5 HK/VMK ile 24200 kJ, % 85/15 HK/VMK ile 19100 kJ, % 70/15 HK/VMK ile 14800 kJ ve %100 HK ile 8600 kJ olarak bulunmuştur. Burada mikrodalga vakum sisteminde tüketilen enerjinin havayla kurutma sistemine göre daha az olduğu belirlenmiştir [78].

Clary ve ark. (2005), mikrodalga gücünün üzümün kurutma özellikleri ve nem içeriği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla mikrodalga vakum kurutucu kullanmışlardır. Üzümleri 1, 30, 60 ve 90 dakika boyunca 500, 750, 1000, 1250 ve 1500 W'lık güçlerde ve 2.7 kPa'lık düşük bir basınçta işleme tabi tutarak kurutma işlemi için gereken optimum özgül enerjiyi, sabit seviyede mikrodalgada 0.97 ile 1.01 W-h /g taze üzüm olarak bulmuşlardır [79].

Alibaş (2007), ısırgan otu yapraklarını 500, 650, 750 ve 850 W güçleri kullanarak mikrodalga kurutucuda, 50, 75, 100 ve 125 °C sıcaklıklarda sıcak hava kurutucuda ve iki farklı vakum basıncında (20 ve 50 mm-Hg) ve iki farklı sıcaklıkta (50-75°C) mikrodalga vakumlu kurutucuda kurularak enerji tüketim ve renk parametrelerini karşılaştırmıştır. Üç kurutma yöntemi enerji tüketim değerlerine göre kıyaslandığında, en düşük enerji tüketiminin mikrodalga kurutma yönteminde olduğu ve mikrodalga gücü artıkça enerji tüketiminin azaldığı görülmüştür. Vakum seviyelerine göre değerlendirildiğinde ise 50°C-50 mm-Hg'da yaklaşık 0.81 kWh iken 50°C-20 mm-Hg'da yaklaşık 0.79 kWh olarak bulunmuştur. Vakum şiddetinin artması enerji tüketimini artırmaktadır [80].

Chauhan ve Srivastava (2009), yeşil bezelyeleri vakum destekli bir mikrodalga kurutma sisteminde mikrodalga güç seviyelerini (100–300 W) ve sistem vakumunu (50-400mm-Hg) değiştirerek kurutuğu çalışmasında kuruma süresi ve kalite özelliklerinin yanı sıra kurutma verimliliğini ( $E_s$ ) de belirlemiştir. Mikrodalga gücü 300 W'da  $E_s$ ; vakum basıncı 50 mm-Hg'da 15.1 MJ/kg, 225 mm-Hg'da 17.6 MJ/kg, 400 mm-Hg'da 15.4 MJ/kg olarak bulunmuştur. Mikrodalga gücü 200 W'da  $E_s$ ; vakum basıncı 50 mm-Hg'da 16.8 MJ/kg, 225 mm-Hg'da 16.4 MJ/kg, 400 mm-Hg'da 13.6 MJ/kg olarak bulunmuştur. Mikrodalga gücü 100 W'da ise  $E_s$ ; vakum basıncı 50 mm-Hg'da 26.6 MJ/kg, 225 mm-Hg'da 23.5 MJ/kg, 400 mm-Hg'da 22.5 MJ/kg olarak bulunmuştur. Buradan, uygulanan mikrodalga gücü ve vakum şiddetinin artırılması ile üründen kg su uzaklaştırmak için tüketilen enerjinin azaldığı sonucuna varılmıştır [9].

## **2.5. Matematiksel Modellemenin Mikrodalga Vakum Kurutma Teknolojileri Açısından Önemi**

Kurutma teknolojilerindeki artan enerji maliyetleri, tüketicilerin son üründeki kalite kriterlerindeki beklentilerinin artması kurutma teknolojilerindeki araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin yakın gelecekte de etkin bir şekilde devam edeceğini göstermektedir. Enerji kullanımının oldukça yoğun kullanıldığı kurutma teknolojilerinde iyi tasarlanmış kurutucular ile işlem maliyetinde tasarruf mümkün olabilmektedir [46].

Kurutma teknolojileri incelendiğinde enerji ekonomisini sağlamak amacıyla alternatif kurutma yöntemlerinden biri olan vakum kurutma ile mikrodalga teknolojisinin kombine kullanımı ile kurutma sistemlerinin geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapıldığı görülmektedir [56].

Mikrodalga vakumla kurutmada etkin bir kurutma sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak için kurutma esnasında ısı ve nem transferini açıklayan modeller, proses optimizasyonu ve ekipman tasarımı için oldukça önemlidir. Modelleme yapılması ile kuruma süresinin minimum olarak belirlenerek ve düzgün sıcaklık dağılımları sağlanarak mikrodalga işlemlerinin optimize edilmesine imkan veren simülasyon modelleri ile bir geri besleme kontrol döngüsü

oluşturulabilmektedir. Bu nedenle, mikrodalga vakum kurutma sistemleri ile kurutma işlemleri gerçek bir sistemde uygulanmadan önce bir modelde geliştirilebilir ve test edilebilir [81].

Gıdaların mikrodalga vakumla kurutulmasını simüle etmek için elektromanyetik dalgaların yayılımını açıklamada sayısal yöntemler olarak genellikle fiziksel model denklemi olarak Lambert yasası ve Maxwell alan denklemleri kullanılır. Maxwell denklemleri malzemedeki mikrodalgaların yayılımı için kesin bir çözüm oluştururken, Lambert yasası mikrodalga üssel bozunum temelinde üründe absorpsiyonun yaklaşık bir çözümünü verir. Kurutma ilerledikçe gıda maddesinin sıcaklık ve nem dağılımını doğru bir şekilde tahmin etmek ve işlemi etkili bir şekilde modellemek, elektromanyetik denklemlerin ısı ve kütle aktarım denklemleri ile eş zamanlı olarak çözümlenmesi ile mümkündür. Ayrıca, gıda maddesinin sıcaklığı ve nem içeriğinde meydana gelen değişikliklerin dielektrik özellikleri değiştirdiği de dikkate alınmalıdır [82].

Fick'in II. kanunu uzun süren sıcak hava ile kurutma işlemlerde özellikle azalan akı bölgesinde difüzyon temelli gerçekleşen nem taşınımını tanımlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, sıcaklık değişimlerinin ihmal edilmesi, başlangıçta tekdüze nem dağılımı, difüzyon harici mekanizmaların (kapiler etki vb.) ihmal edildiği varsayımlar ile doğru sonuçlar vermektedir.

Fiziksel modellerin yanı sıra kuruma kinetiğini belirlemek için basitleştirilmiş empirik denklemler (Newton, Henderson ve Pabis, Page ve Logaritmik vb.) kullanılarak kurutma sırasındaki nem difüzyonu tanımlanmakta ve azalan akı bölgesinde ürün içerisindeki nemin kararsız hal dağılımları başarılı bir şekilde açıklanmaktadır. Böylece, model parametreleri kurutma koşulları ile doğrudan ilgili olmamakla birlikte nem difüzyonu süreci için basit ve kullanışlı modeller geliştirilebilmektedir.

## **2.6. Mikrodalga Destekli Vakum Kurutma İşleminin Enginarın Kalitesi Üzerine Etkileri**

### **2.6.1. Toplam Fenolik Madde**

Fenolik bileşikler, en az bir aromatik halkaya bağlı fonksiyonel türevleri de dahil olmak üzere bu halkada sayıca çok fazla hidroksil grubu içeren maddelerdir. Fenolik bileşikler, en aktif doğal antioksidanlardan olup, antikanserojen, antioksidatif, antimutajenik, serbest radikalleri bağlama ve lipid peroksidasyonunu önleme özelliklerine sahip gıda bileşenleridir.

Yapılan çalışmalar ile yaklaşık 5000 tane fenolik madde tanımlanmış olup, bunların 2000'den fazlası doğal flavonoidlerdir. Genelde glikozitler şeklinde, bitkilerin yaprak, çiçek, meyve gibi canlı dokularında; aglikonlar şeklinde, odunsu dokularında ve hem glikozit hem de aglikonlar şeklinde bitkilerin çekirdeklerinde bulunabilmektedirler. Bitkisel ürünlerin içeriğinde fenolik maddeler oldukça yaygın olarak görülmektedir ve meyvelerin sebzelerden daha fazla fenolik içeriğe sahip olduğu bilinmektedir.

### **2.6.2. Renk**

Gıda ürünlerinin çoğu, işleme ve depolama sırasında oluşan enzimatik veya enzimatik olmayan reaksiyonlara bağlı olarak renk değişimine maruz kalır. Kurutulmuş ürünlerin kalitesini etkileyen en önemli olumsuzluk kurutma esnasında gıda ürünlerinde uygulanan sıcaklığa bağlı olarak “Maillard Tepkimesi” veya enzimatik renk değişimleridir [83].

Maillard reaksiyonları, aminler, amino asitler, peptidler ve proteinlerin yapısında bulunan serbest amino grubu ile indirgeyici şeker arasındaki reaksiyon sonucu esmer renkli azotlu polimerlerin (melanoidinler) oluşmasıdır. Gıdaların işlenmesi ve depolanması süresince maruz kaldığı koşullarda proteinlerin bozulmasına neden olan Maillard reaksiyonları, protein sindirilebilirliğinde ve amino asit biyo-yararlanımında azalmaya neden olarak besinsel kayıplara neden olmaktadır. Daha çok enzimatik olmayan bu esmerleşme tepkimeleri, sıcaklık dereceleri arttıkça

ve tepkimeye giren ögelerin ortamdaki konsantrasyonları yükseldikçe hızlanmaktadır. Nem oranı % 15–20 arasında olduğunda, Maillard tepkimeleri en hızlı şekilde gerçekleşirken; % 2'nin altına düştüğünde esmerleşme tepkimeleri gerçekleşmemektedir [83, 84].

Meyve ve bazı sebzelerde her zaman bir sorun olan enzimatik esmerleşme reaksiyonları, PFO'lar, peroksidazlar ve lakkazlar ile başlatılır. Meyve ve sebzelerin estetik kalitesini bozmanın yanı sıra, enzimatik esmerleşme, askorbik asitin oksidasyonu gibi besin maddelerinin yok edilmesi yoluyla beslenme kalitesini de azaltır. Enzimatik kahverengileşmenin inhibe edilmesi için; haşlama, soğutma, dondurma gibi enzimi inaktive edici sıcaklık uygulamaları; sıvı kaybı ya da tuzlama gibi gıda maddesinin  $a_w$  (su aktivitesi) düşürücü işlemler ve enzimatik reaksiyonları kontrol etmek için basınç uygulaması, iyonlaştırıcı radyasyon vb. gibi teknikler uygulanmaktadır [85].

### **2.6.3. Rehidrasyon Oranı**

RHO, kurutulmuş ürünün rehidre edilmesi sonucu kazandığı su miktarının, kurutma sırasında kaybetmiş olduğu su miktarına oranı olarak bilinmektedir. Kurutulmuş bir ürünün rehidrasyon kapasitesi ona uygulanan kurutma koşullarını doğrudan yansıtmakta ve kurutmanın verimliliğine göre değişmektedir. Kurutulmuş ürün rehidrasyon işlemi sırasında kururken kaybettiği kadar su kazanırsa RHO o kadar fazla olmaktadır. RHO ne kadar yüksek olursa kurutma koşulları veya ürün kalitesi o kadar iyi olarak değerlendirilmektedir [86].

Rehidrasyon yeteneği parça halinde kurutulmuş ürünlerin yanında, sıvı haldeyken kurutulmuş toz haline getirilen süt tozu, meyve-sebze tozu gibi ürünler için de önemlidir. Kurutulmuş ürünün RHO üzerine, özellikle rehidre edilirken kullanılan suyun sıcaklığı ve süresi son derece etkilidir. Kurutulması sırasında ürünlerin büzülme ve parçalanması sonucu, hücre ve dokuların yapısının bozulması, rehidrasyonu olumsuz yönde etkileyen fiziksel faktörler olmanın yanı sıra rehidrasyon yeteneği daha çok kimyasal ve fizikokimyasal nedenlerden etkilenmektedir. Kurutmada uygulanan ısı etkisiyle ve kurutma sonucu hücredeki bazı bileşenlerin (tuz gibi) konsantrasyonunun artması proteinlerin denatüre olmasına

neden olmaktadır. Denatüre olan proteinler suyun tekrar absorbe edilmesini büyük ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca hücre duvarının esnekliğini kaybetmesi ve rehidrasyon suyuna hücre içinden tuz ve şeker geçmesi de hücrenin turgor özelliğini kaybetmesine, böylece rehidrasyon yeteneğinin düşmesine neden olmaktadır. Yapısal ve hücrel bozulmaların önlediği durumlarda rehidrasyon yeteneği maksimum düzeye çıkarılabilmektedir [87].

#### **2.6.4. Polifenoloksidaz Enziminin Aktivitesi**

Oksidoredüktaz sınıfının bir üyesi olan PFO enzimi, bakır içeren yaygın enzimdir ve oksijen varlığında iki farklı reaksiyonu katalizleyebilir. Bunlar monofenollerin o-difenollere hidroksilasyonu (hidroksilaz veya kresolaz) ve o-difenollerin o-kinonlara dehidrojenasyonu (kateşolaz veya oksidaz) olur. Bu reaksiyonların ikisinde de oksijen yardımcı substrat olarak kullanılır. Kresolaz ve kateşolaz aktiviteleri sonucu oluşan kinoid maddeleri enzimatik olmayan reaksiyonlar sonucu kahverengi, kırmızı veya siyah renkli melanin pigmentleri oluştururlar [88; 89].

Bitki ve hayvan dokularında yaygın olarak görülen PFO enzimi, bitkilerin tüm kısımlarda bulunabilmektedir. PFO enziminin, bitkisel ürünlerden en çok üzüm, elma ve patatesten bulunmakla birlikte yapılan çalışmalar sonucu buğday unu, makarna, enginar, biber, Japon hurması, baklagil, kakao taneleri, soya, hıyar, yabani pirinç, çilek, mantar, karidesler, ıstakoz ve yengeçte de bulunduğu belirlenmiştir [89].

Meyve ve sebze dokularında, normal şartlarda PFO enziminin substratı olan fenolik bileşiklerle teması bitkisel hücrenin farklı kısımlarında olması sebebiyle yok denecek kadar azdır. Ancak bitkisel ürünlerin hasat, taşıma ve işleme sırasında hasara uğraması ile doku bütünlüğü bozulabilmekte ve PFO enzimlerinin substratları olan fenolik bileşiklerle ve havadaki oksijen ile temas edebilme durumları söz konusu olabilmektedir [89].

PFO'ları inaktive etmek için yaygın olarak meyve ve sebzelerde ısı işlem uygulaması yapılmaktadır. Ayrıca parçalanmış meyve ve sebzelerde

kahverengileşmeyi önlemek için askorbik asit, tiyol bileşikler ve sülfidler gibi bazı koruyucu bileşikler ile kullanılabilir. Gıda işleme ve paketlemede ise oksijen kontrollü atmosfer uygulamaları ile uzaklaştırılarak esmerleşme reaksiyonları önlenebilir. PFO enzimi sadece renkte bozulmaya neden olmamakta, aynı zamanda diğer duyuşsal özellikleri de etkilemektedir. Çeşitli meyve ve sebzelerdeki PFO enziminin nitelikleri birbirine kıyasla oldukça farklılık göstermekte, hatta aynı tür meyve ve sebzenin PFO enziminin nitelikleri, ürünün yetişme koşulları ve hasat zamanına göre de farklı olabilmektedir [90].

### **2.6.5. Büzülme**

Kurutulmuş gıda maddeleri kurutma sırasında fiziksel ve kimyasal birçok değişikliğe uğramaktadır. Yüksek nem içeriğine sahip olan meyve ve sebzelerin, dehidrasyonu sırasında şekil, yoğunluk ve gözeneklilikte değişiklikler olmaktadır. Gözenekli yapıda bulunan gıdalar, dehidrasyon veya rehidrasyon sırasında hacim değişiklikleri geçirir. Dehidre olduklarında, hacim değişimi büzülme olarak ifade edilmektedir. Gıda materyallerinin büzülmesi dehidrate ürünlerin kalitesi üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Şekil değişikliği, hacim azalması ve sertliğin artması tüketici üzerinde negatif etkiye neden olur [75, 91].

Gıda ürünlerinin dehidrasyonu sırasında büzülmesi, nem difüzyonu ile eşzamanlı olarak gerçekleşir ve böylece nem kaybetme oranını etkiler. BK (büzülme katsayısı), aynı zamanda, kurutma yöntemlerine ve kurutmada kullanılan hava, vakum veya herhangi bir inert gaz oranına da bağlıdır. BK'nın belirlenmesi, kurutma işleminin verimliliğinin anlaşılması ve son ürünün kalite özelliklerinin kontrol edilmesi açısından önemlidir. Mikrodalga destekli kurutma sırasında nem içeriğinin değişmesine bağlı olarak, meyve ve sebze gibi gıda maddelerinin büzülme ve yoğunluk değişimleri hakkında az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır [75, 92, 93].



### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

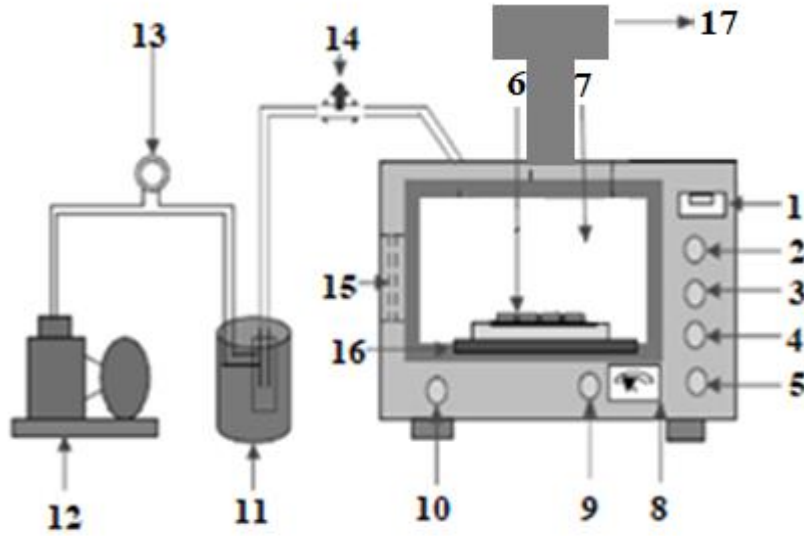
#### 3.1. Materyal

Aynı ticari olgunluk seviyesindeki taze enginarlar (*Cynara scolymus* L. cv. Sakız) Urla/İzmir bölgesinde bulunan bir üreticiden satın alınmıştır. Enginarların, aynı gün içinde keskin çelik bıçaklar kullanılarak dış yaprakları ve iç tüyleri çıkarılmış ve tekdüze bir şekil ve boyut ( $10 \text{ cm} \pm 1$  çap ve  $1 \pm 0.2 \text{ cm}$  kalınlık) elde edilmesi için elle kesilmiştir. Daha sonra, elde edilen enginar kalpleri % 1 sitrik asit çözeltisine daldırılmış ve kurutma deneylerine kadar  $4^\circ \text{C}$ 'de depolanmıştır.

#### 3.2. Yöntemler

##### 3.2.1. Mikrodalga Destekli Vakum Kurutma Sistemi

Laboratuvar ölçekli olarak tasarlanan mikrodalga vakum kurutucunun tam bir şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Mikrodalga vakum kurutucunun ana bileşenlerini, mikrodalga vakum bölmesi (7), mikrodalga aplikatör seti (17), kontrol paneli (1-5), kondenser (11), vakum pompası (12), basınç göstergesi (13) ve selenoidal vana (14) oluşturmaktadır. Kurutma bölümünün üst kısmına maksimum 1000 W'lık bir mikrodalga gücü ile 2.45 GHz frekansında çalışan bir magnetron yerleştirilmiştir. Mikrodalga enerjisi, bir dalga kılavuzu (WR340) aracılığıyla monomode boşluğuna iletilir. Monomode boşlukları, kurutma odasının ortasında maksimum alan yoğunluğuna sahip bir TE10 modu paterni dağılımına sahip olmasıyla karakterize edilir. Kurulum, vakum pompası ve pompanın hasar görmesine veya tamamen tahrip olmasına neden olabilecek su birikimini önlemek için bir yoğuşma ünitesi (su soğutma sistemi) ile tamamlanmıştır. Basınç kontrolü,  $\pm 10 \text{ mm-Hg}$  histerisis değeri ile aç-kapa kontrol yapan bir basınç sensörü (Autonics, Kore, model PSA-V01-Rc1/8) ve ona bağlı çalışan selenoid valf (Parker, ABD) tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1.**Laboratuvar tipi mikrodalga-vakum kurutma sistemi düzeneği

1.Gösterge paneli 2.Aç-kapat düğmesi, 3.Süre ayarı, 4.Manuel güç ayarlama, 5.Kapak aç-kapat, 6.*Cynara scolymus L.*, 7.Vakum kabini, 8.Vakum seviyesi göstergesi, 9.Sıcaklık ayarı., 10.Sıcaklık Göstergesi, 11.Nem yoğuşturucu, 12.Vakum pompası, 13.Basınç ölçer, 14.Basınç kontrol valfi, 15.İsı plakaları, 16.Döner tabla, 17.Magnetron.

### 3.2.2. Enginarın Mikrodalga Vakum Kurutucuda Kurutulması İşlemi

Soyulmuş ve boyutlandırılmış enginar içleri 4 ° C'deki % 1 sitrik asit çözeltisinden çıkarılıp, süzildükten sonra yüzeylerinde kalan çözelti filtre kağıdı ile emdirilmiş ve kurutmadan önce tartılmıştır. Enginarların mikrodalga vakumla kurutulması iki mikrodalga güç (450 W ve 800 W) ve vakum odası basınç seviyelerinde (-526 mm-Hg ve -667 mm-Hg gösterge) gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga gücünün seviyeleri, ön denemeler ile kurutma işlemi sırasında mikrodalga sistemin kalorimetrik etkisine odaklanarak belirlenmiştir. Eşit olmayan mikrodalga radyasyonları ile ürün içinde eşit olmayan ısınmayı önlemek için numune plakası 5 rpm hızda 360° döndürülmüştür. Kurutma sırasında örneklerin yüzey sıcaklık dağılımları belirli aralıklarla, termal kamera (Testo 880-3, Almanya) kullanılarak ölçülmüş, ve cihaza ait görüntü işleme paket programı kullanılarak minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Numunenin

ağırlığı, 1 mg hassasiyete (Sartorius, Almanya) sahip bir dijital terazi kullanılarak önceden belirlenmiş (1 dk) zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Tüm denemeler iki tekerrür ve analizler ise iki paralel olarak yapılmış ve hesaplamalar için ortalama değer kullanılmıştır.

### 3.2.3. Enginarın Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi

#### 3.2.3.1. Kuruma Eğrilerinin Oluşturulması ve Kuruma hızının Belirlenmesi

Enginarın mikrodalga vakum yöntemi ile kurutulması sırasında ortaya çıkan kütle transfer davranışlarının karakterize edilmesi ve kuruma kinetiğinin belirlenmesi için öncelikli olarak ürünün kütle kaybı işlem boyunda 1 dk aralıklarla tartılarak belirlenmiştir. Boyutsuz nem oranının (MR) zamanla değişimi, kuruma hızının hem zamanla hem de serbest nem içeriği (Mf) ile değişimi birlikte ele alınarak kurutma davranışının tanımlanmasında kullanılmıştır.

Boyutsuz nem oranı (MR), ürünün herhangi bir t anındaki nem içeriğinden (M) denge nem içeriğinin (Me) çıkarılması ve ürünün başlangıçtaki nem içeriğinden (M0) yine denge nem içeriğinin çıkarılması ile elde edilen değere bölünerek aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Eşitlik 3.1):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.1)$$

Kurutma hızı, birim zamanda (h) birim alandan (m<sup>2</sup>) uzaklaşan su miktarı (kg) olarak ifade edilmiş ve aşağıda verilen Eşitlik 3.2 ile hesaplanmıştır:

$$R = -\frac{L_s}{A} * \frac{dX}{dt} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte L<sub>s</sub>, kuru katı ağırlığı (kg); bir enginarın çapı ve yüksekliğinden hesaplanan yüzey alanı A (m<sup>2</sup>); dX, nem içeriğindeki değişim (kg su/kg kuru katı) ve dt ise ölçümler arası geçen süreyi (h) ifade etmektedir. Kuruma hızının

hesaplanmasında enginarlarda kurutma sırasında meydana gelen büzülme ihmal edilmiştir.

### 3.2.3.2. Enginarın Kuruma Kinetiğinin Matematiksel Modellenmesi

Enginarların mikrodalga vakum yöntemi ile kurutulması sırasında nem transferinin karakterize edilmesinde Eşitlik 3.3’de verilen difüzyon temelli II. Fick Yasasından yararlanılmıştır.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{\text{eff}} \cdot \nabla M) \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte, M, nem içeriğini (kg su/ kg km); t zaman (s); x, karakteristik uzunluğu (m),  $D_{\text{eff}}$ , etkin difüzyon katsayısını ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) tanımlamaktadır.

Enginarların her iki yüzeyden kuruyan levha geometrisine sahip olduğu, başlangıçta ürün içerisinde tekdüze bir nem dağılımının varlığı, dış direncin uygulanan vakum etkisiyle ihmal edildiği varsayılarak aşağıda belirtilen başlangıç ve sınır şartları için,

$$\begin{array}{lll} M=M_0 & t=0 & \text{Tüm } L \text{ değerleri için,} \\ M=M_s=M_e & t>0, & X= \pm L \text{ yüzeyde} \end{array}$$

$M_s$ : yüzeydeki nem içeriğini (kg su/ kg km) ifade etmektedir. Eşitlik 3.3’te verilen denklemin çözümü Eşitlik 3.4’de verilen sonsuz seri şeklinde elde edilir:

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.4)$$

Burada L enginarın yarı kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Uzun işlem sürelerinde veya Fourier sayısının ( $Fo$ ) 0.2’ den büyük olduğu durumlarda, Eşitlik 3.4’de verilen sonsuz serinin sadece ilk teriminin alınıp

diğerlerinin ihmal edilmesi nem transferini tanımlamada yeterli olmaktadır. Bu durumda denklem sonsuz levha geometrisi için Eşitlik 3.5'te verildiği forma dönüşür;

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D\pi^2 t}{4l^2}\right) \quad (3.5)$$

Mikrodalga vakum kurutma işlemi sırasında nem transferi sıvı difüzyonu, su buharı difüzyonu, mikrodalgaların etkisi ile içsel buharlaşma ve yüzey buharlaşması şeklinde birkaç farklı mekanizma ile ortaya çıkmaktadır. Tam kurutma mekanizması bilinmediğinden Eşitlik 3.5'de gerçek su difüzivitesi yerine etkin difüzivitenin  $D_{eff}$  kullanılması uygun olmaktadır. Bu nedenle, yukarıdaki denklem deneysel verilere dayalı basit bir model olarak değerlendirilmektedir.

Teorik modellerin yanı sıra, bazı araştırmacılar gıdaların kurutma eğrilerinin benzetiminde, modellerin parametreleri fiziksel anlamda eksik olsa da, deneysel verilerin yeterli temsilini sağlayabilen oldukça basit modeller önermişlerdir.

Yarı-ampirik kurutma modelleri arasında, Henderson ve Pabis modeli (Eşitlik 3.6), Newton veya üstel model (Eşitlik 3.7) ve Page modeli (Eşitlik 3.8) yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a \exp(-kt) \quad (3.6)$$

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt) \quad (3.7)$$

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt^n) \quad (3.8)$$

Deneysel verilerin analizi ve istatistiksel modelleme, doğrusal olmayan regresyon analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir ((SPSS, version 22.0, IBM Inc., 2013, USA). Henderson-Pabis modeli, Newton modeli (üssel model) ve Page modeli deneysel kurutma verilerine uydurulmuştur. Test edilen modellerin deneysel verilere uyumunu değerlendirmek için, belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ve hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) kriterler olarak kullanılmıştır. Kurutma davranışını açıklayan en

iyi model, en yüksek  $R^2$  ve en az RMSE olanı olarak seçilmiştir. RMSE değerleri Eşitlik 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_E - Y_P)^2}{N}} \quad (3.9)$$

Burada  $Y_e$ , deneysel boyutsuz nem içeriğini,  $Y_P$  model tarafından tahminlenen boyutsuz nem içeriğini, N gözlem sayısını ifade etmektedir [5].

### 3.3. Fiziksel ve Kimyasal Analizler

#### 3.3.1. Dielektrik Özelliklerin Belirlenmesi

Dielektrik özelliklerin (dielektrik sabiti ve kayıp faktörü) ölçümü için İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Nanolif Üretimi ve Karakterizasyonu Laboratuvarında bulunan paslanmaz çelik koaksiyal probu (N1501A Dielectric Probe Kit, Keysight Technologies, ABD) ve ağ analizörü (E5061B ENA Series Network Analyzer, Agilent Technologies, ABD) kullanılmıştır. Ağ analizörü, hava ve damıtılmış su ile kalibre edilmiştir. Farklı nem içeriklerine kurutulmuş enginarın dielektrik özellikleri 2450MHz'de ve 20°C'de ölçülmüştür.

#### 3.3.2. Nem Tayini

Nem tayini AOAC, 2005 [94]'e göre vakumlu etüv kullanılarak, örneklerin sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmesi prensibine göre gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla taze ve kurutulmuş enginar örnekleri, laboratuvar tipi blender (Waring 8011 S) ile parçalanarak homojen hale getirilmiş ve camdan yapılmış vezin kaplarına yaklaşık 3-5 g numune tartılıp vezin kapları vakumlu etüvde (Nüve EV 018) 70°C ve 600 mm-Hg vakumda sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmiş ve nem miktarı aşağıdaki Eşitlik 3.10'dan hesaplanmıştır [95].

$$\text{Nem miktarı: \% nem} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} * 100 \quad (3.10)$$

$M_0$ :Vezin kabının ve kapağının toplam kütlesi,

$M_1$ :Kurutmadan önce vezin kabı, kapağı ve örnek miktarının toplam kütlesi,

$M_2$ :Kurutmadan sonra vezin kabı, kapağı ve örnek miktarının toplam kütlesi

### 3.3.3. Su Aktivitesi Tayini

Taze ve kurutulmuş enginarların  $a_w$  tayini, veri kaydediciye (Testo 400, Almanya) bağlı,  $a_w$  ölçüm probu içeren ölçüm seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 3 g numune parçalanarak ölçüm haznesine yerleştirilmiş ve  $a_w$ 'si dengeye ulaşıncaya kadar beklendikten sonra değer okunmuştur.

### 3.3.4. Toplam Fenolik Madde Tayini

TFM tayini taze ve kurutulmuş enginar örneklerine uygulanmıştır. 5 g taze veya kurutulmuş enginar 50 ml % 80 metanol ile homojenize edilmiş ve homojenat filtre edilip 25 ml % 80 metanol ile tekrar ekstrakte edilmiştir. Ekstraktlar süzildükten sonra filtratlar birleştirilip 30 dakika 2500xg'de santrifüj edilmiştir. Metanol ekstraktının berrak kısmından 0.2 ml alınarak üzerine 1.8 ml saf su ve 10 ml %10'luk FolinCiocalteu çözeltisi ilave edilmiştir. 8dk beklenecek üzerine % 7.5'lük sodyum karbonat çözeltilisinden 8 ml ilave edilmiş ve 10 s karıştırıldıktan sonra karışım 45°C'deki su banyosunda 15 dk. inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda 765 nm'de spektrofotometrede (Shimadzu UV-1601) okuma yapılmıştır. 12.5-400 mg/L arasında hazırlanan galik asit çözeltileri standart çözelti olarak kullanılmıştır ve örneklerin toplam fenol miktarı elde edilen kalibrasyon grafiği yardımıyla hesaplanmıştır. TFM miktarları mg ga/g kuru madde olarak verilmiştir [94, 96].

### 3.3.5. Renk Tayini

Renk ölçümü için renk okuyucusu (Minolta CR-4, Japonya) kullanılmıştır. Kurutulmuş enginarların renk özellikleri L, a, b ile belirlenmiştir. Ölçüm yapılmadan önce cihaza ait standart kalibrasyon skalası ile cihaz kalibre edilmiştir [86]. Hunter L, a, b renk değerleri kullanılarak Eşitlik 3.11 ve 3.12'den renk değişimi ( $\Delta E$  değeri) ve renk tonu ölçüsü olan H (Hue açısı) değerleri hesaplanmıştır.

$$\Delta E = [(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2]^{1/2} \quad (3.11)$$

$$H = \arctan \frac{b}{a} \quad (3.12)$$

Eşitlikteki L, a, b değerleri örneğe, L<sub>0</sub>, a<sub>0</sub> ve b<sub>0</sub> değerleri ise referans olarak alınan baryum sülfata (beyaz renk) aittir. a değeri kırmızı veya yeşilliği, b değeri sarılık veya maviliği, L değeri ise 0 (siyah) ve 100 (beyaz) arasındaki aydınlık derecesini göstermektedir [55, 94].

### 3.3.6. Rehidrasyon Oranının Belirlenmesi

RHO belirlenmesi deneyleri 200 mL ve 30 °C sıcaklığındaki saf suya kurutulmuş enginar örneklerinin batırılması ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 20'şer dakika zaman aralıklarında yapılmıştır. Aşağıda verilen Eşitlik 3.13 ile RHO belirlenmiştir.

$$RHO = \frac{Mr}{Md} \quad (3.13)$$

Mr: Rehidre edilmiş ürün ağırlığı (g) Md: Kurutulmuş ürün ağırlığı (g) olarak tanımlanmıştır [97].

### 3.3.7. Polifenol Oksidaz Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi

Taze ve mikrodalga vakum kurutma işlemi uygulanmış örneklerden blender içerisine yaklaşık 5 g kadar tartılarak üzerine -30°C civarında 20 mL aseton eklenerek parçalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulamaç Buchner hunisinde Whatman No 1 filtre kağıdı yardımıyla filtre edilmiştir. Filtre kâğıdındaki kalıntı üzerinden 10 mL -30°C'ye kadar soğutulmuş aseton geçirilmiş ve işlem üç defa tekrar edilmiştir. Filtre üzerindeki kalıntı geniş bir porselen kaba yayılarak oda sıcaklığında kurutulmuş ve elde edilmiş olan açık sarı renkli, pudra görünümündeki bu materyale aseton tozu denilmektedir. Deneylerde kullanılan enzim ekstraktı bu aseton tozundan üretilmiştir. Bu amaçla bir behere yaklaşık 2 g aseton tozu alınıp



üzerine, önceden yaklaşık +4°C'ye kadar soğutulmuş, pH 6.8, 0.05 M Na-fosfat tampon çözeltisinden 150 mL eklenmiştir. Karışımın sıcaklığı +4°C'de tutularak manyetik karıştırıcı ile 30 dakika süreyle karıştırılmış ve enzimin ekstraksiyonu sağlanmıştır. Karışım daha sonra santrifüjden geçirilerek ekstraktın berraklaşması sağlanmıştır.

PFO enziminin aktivitesinin belirlenmesinde bu ekstrakt ve substrat olarak kateşol kullanılmıştır. 2 mL fosfat tampon çözeltisi (pH 6.2, 0.05 M) + 0.5 mL "enzim içeren çözelti" + 0.5 mL substrat (0.5 M) çözeltisi tüp içerisine alınarak reaksiyon karışımı 30°C'de 5 dak inkübe edildikten sonra 15 saniye aralıklarla 410 nm dalga boyunda absorbans ölçümleri alınmıştır [98]. 1 ünite (U) PFO aktivitesi, dakikada 0.001 birimlik absorbans artışına neden olan enzim miktarı olarak tanımlanmış ve sonuçlar U/mg taze ürün olarak verilmiştir [89]. PFO'nun kalıntı aktivitesi, Eşitlik 3.14 ile hesaplanmıştır [99].

$$\% \text{ Kalıntı Aktivite} = \frac{\text{Kurutma Sonrası Polifenoloksidaz Enzim Aktivitesi}}{\text{Taze Ürünün Polifenoloksidaz Enzim Aktivitesi}} * 100 \quad (3.14)$$

### 3.3.8. Kurutma Verimliliği

Kurutma verimliliği ( $\eta$ ), kurutma sırasında enginardan buharlaşan su için kullanılan ısı enerjisinin mikrodalga vakum kurutma sisteminin tükettiği enerjiye oranının yüzdesi olarak değerlendirilip Eşitlik 3.15 ile hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{m_w * \lambda_w}{P * t} * 100 \quad (3.15)$$

$m_w$  (kg), buharlaşan su kütlesi;  $\lambda_w$  (J/kg), suyun gizli ısı; P (W), mikrodalga vakum sisteminin giriş gücü (Eşitlik 3.16); t (s), sistemin çalışma süresidir [100].

$$P = P_{MG} + P_{VP} + P_F + P_{TT} + P_{CP} \quad (3.16)$$

Burada  $P_{MG}$ ; magnetron gücünü (W) ,  $P_{VP}$ ; vakum pompası gücünü (W),  $P_F$ ; magnetron soğutma fanı gücünü;  $P_{TT}$ ; döner tabla motor gücünü (W),  $P_{CP}$ ; kontrol paneli gücünü (W) ifade etmektedir. Tüm sistem tarafından harcanan güç, enerji ölçme cihazı (REV Ritter GmbH, Frankenstr. 1-4, D-63776, Mömbris) ile ölçülmüştür.

$E_s$  (MJ/kg), bir kilogram numuneyi kurutmak için tüketilen spesifik enerji olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.16 ile hesaplanmıştır.

$$E_s \left( \frac{MJ}{kg} \right) = \frac{t_{on} P (1-x_f) * 10^{-6}}{M_i (x_i - x_f)} \quad (3.16)$$

$M_i$  (kg), numunenin başlangıç kütlesi;  $x_i$ , başlangıç nem içeriği fraksiyonu;  $x_f$ , nihai nem içeriği fraksiyonu ve  $t_{on}$  (s), sistemin çalışma süresidir [9].

### 3.3.9. Büzülme

BK (büzülme katsayısı), belirli bir kurutma derecesindeki numunenin mevcut hacmi (V) ile taze numune hacmi ( $V_0$ ) arasındaki orandır. Eşitlik 3.17 ile bulunur [75].

$$BK = \frac{V}{V_0} \quad (3.17)$$

### 3.3.10. İstatistiksel Analiz

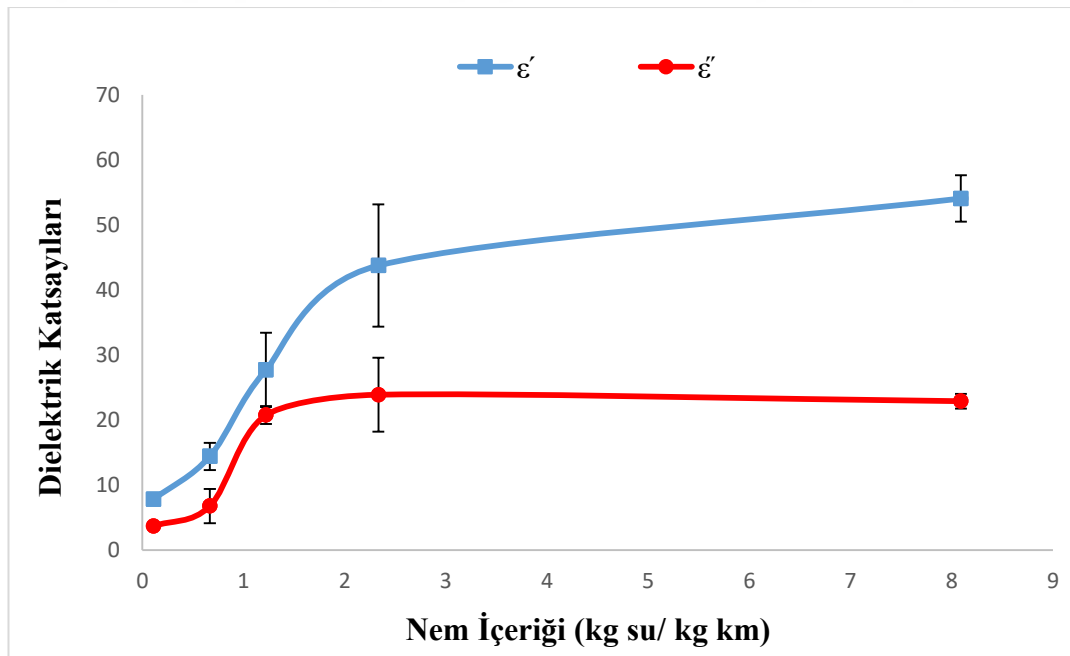
Mikrodalga gücü ve sistem basıncının RHO, TFM içeriği, PFO enzim aktivitesi, renk ve kurutma verimliliği üzerindeki etkileri %95 güven seviyesinde Varyans analizi ile istatistiksel olarak belirlenmiştir. İstatistiksel analizler SPSS (SPSS, version 22.0, IBM Inc., 2013, USA) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Dielektrik Özelliklerin Nem İçeriğiyle Değişimi

Mikrodalga ısıtma ve kurutma işlemlerinde gıda maddelerinin dielektrik özellikleri, elektromanyetik alana maruz kalan bir materyalin nasıl tepki vereceğini belirleyen temel özelliklerdir. Dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), bir malzemenin elektrik enerjisini depolama kabiliyetinin bir ölçüsüdür, dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) ise elektrik enerjisini ısıya dönüştürme yeteneğinin bir ölçüsüdür.

Dielektrik özelliklerin, enginarın nem içeriğine bağlı olarak değişimi Şekil 4.1'de verilmektedir.  $\epsilon'$  değeri, nem içeriği 8.09 kg su/ kg km olduğunda 54.07 olarak, nem içeriği 0.11 kg su/ kg km değerine düştüğünde 7.8 olarak bulunmuş ve nem içeriğindeki azalmayla giderek azalmıştır.  $\epsilon''$  değeri ise nem içeriğine bağlı olarak önce bir miktar artıp, daha sonra azalmıştır ve  $\epsilon''$  değeri, nem içeriği 8.08 kg su/ kg km olduğunda 22.89 olarak, nem içeriği 0.11 kg su/ kg km değerine düştüğünde 3.675 olarak bulunmuştur.

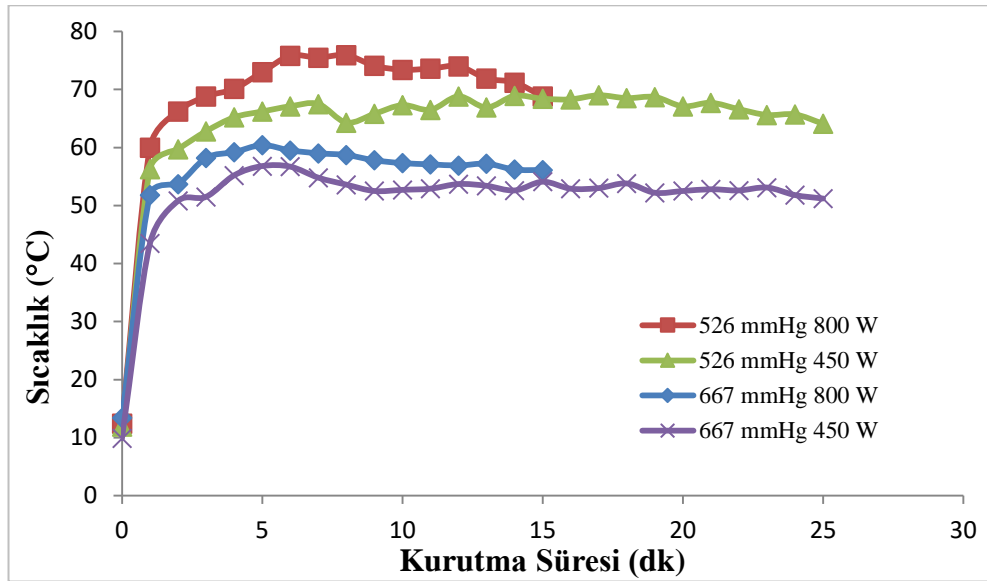


Şekil 4.1. Dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ )'nün nem içeriğine göre değişimi

Funebo ve Ohlson (1999), yaptığı çalışmada elma, çilek, mantar ve maydanozun dielektrik sabitlerini ( $\epsilon'$ ) ve dielektrik kayıp faktörlerini ( $\epsilon''$ ), 2800 MHz'de ölçerek nem içeriğine ve sıcaklığa (20- 40- 60°C) bağlı değişimlerini incelemiştir. Elma için 20°C'de  $\epsilon'$ , 6.1 kg su/kg km nem içeriğinde 64 olarak; 0.14 kg su/ kg km nem içeriğinde 2.2 olarak bulunmuştur. Elma için 20°C'de  $\epsilon''$ , 6.1 kg su/kg km nem içeriğinde 14 olarak; 0.14 kg su/ kg km nem içeriğinde 0.03 olarak bulunmuştur. Diğer sıcaklık değerleri için belirlenen  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri incelendiğinde ise, sıcaklıkla bu değerlerin değişimlerinin, nem içeriğine oranla çok daha düşük seviyede olduğu belirtilmiştir. Elma dışındaki ürünlerde de buna benzer olarak nem içeriğindeki azalmayla dielektrik sabitlerinin azaldığı, ancak sıcaklık ile önemli bir değişim olmadığı görülmektedir [101].

#### 4.2. İşlem Parametrelerinin Sıcaklık Profiline Etkisi

Mikrodalga vakum kurutma işlemi süresince uygulanan mikrodalga gücü (450-800 W) ve vakum şiddetine (-526 mm-Hg ve -667 mm-Hg) bağlı olarak yüzeydeki sıcaklık dağılımları termal kamera görüntüleri alınarak belirlenmiştir. Farklı işlem koşullarında elde edilen sıcaklık dağılımlarının zamana bağlı olarak ortalama sıcaklık değişimleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



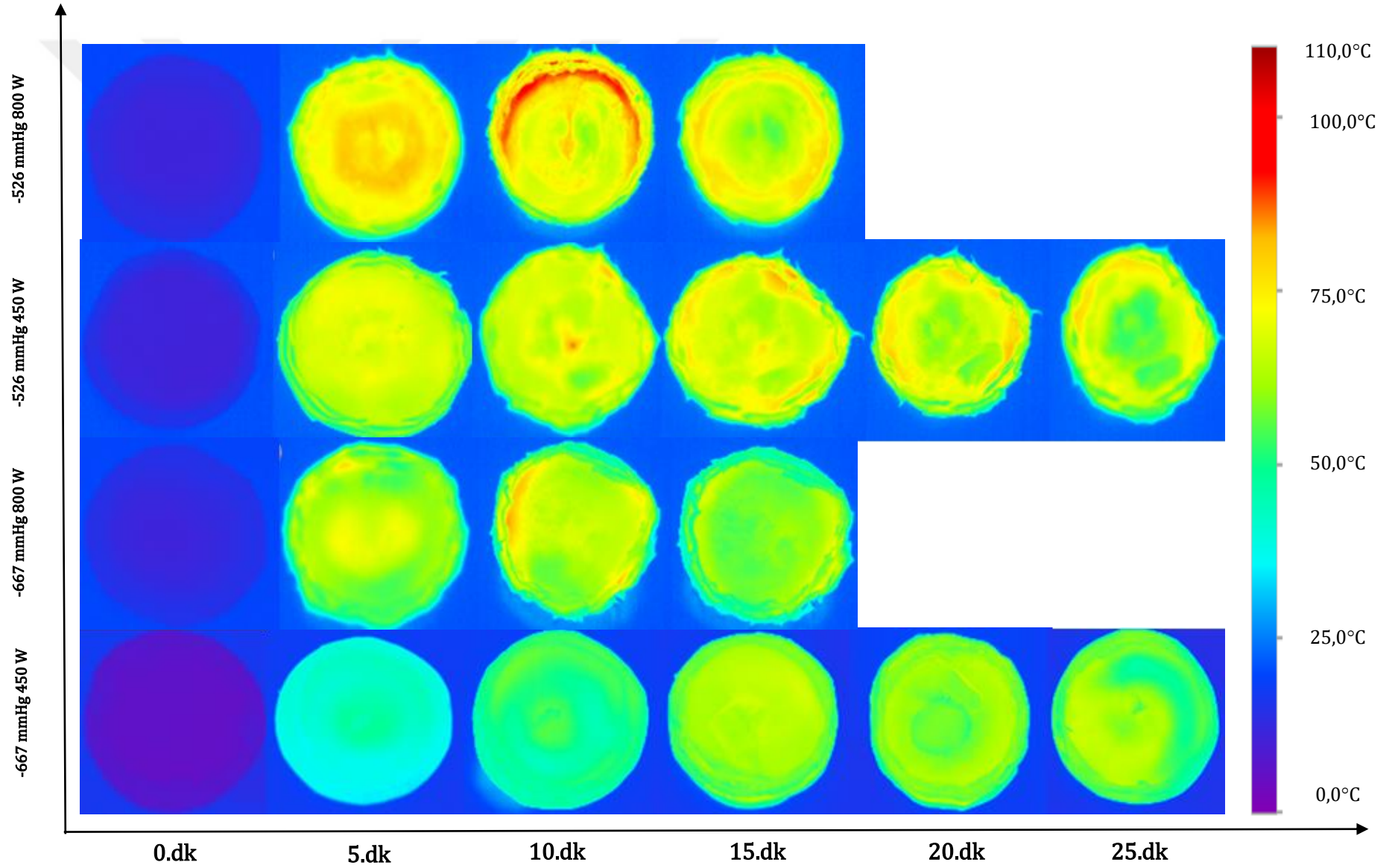
Şekil 4.2. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların ortalama yüzey sıcaklıklarının kuruma süresine göre değişimi

-526 mm-Hg vakum şiddetinde saf suyun kaynama noktası 70°C' de olmakla birlikte, enginar içerisindeki sıvı fazın kaynama noktası, çözünen bileşenlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. -526 mm-Hg vakum şiddetinde 800 W mikrodalga gücünde; ortalama sıcaklık minimum 60°C ve maksimum 75.8°C olarak belirlenirken; aynı vakumda 450 W mikrodalga gücünde ortalama sıcaklık minimum 56.3°C ve maksimum 69°C olarak ölçülmüştür.

-667 mm-Hg vakum şiddetinde saf suyun kaynama noktası 50°C'de olmakla birlikte, -667 mm-Hg vakum şiddetinde 800 W mikrodalga gücünde; ortalama sıcaklık minimum 51.8°C ve maksimum 60.4°C olarak belirlenirken; aynı vakumda 450 W mikrodalga gücünde ortalama sıcaklık minimum 46.5°C ve maksimum 56.8°C olarak ölçülmüştür.

Enginarların yapısında bulunan sıvı fazın elektromanyetik dalgaları absorblamasıyla aldıkları enerji, kaynama sıcaklığına ulaşana kadar duyarlı ısıya dönüşmekte, kaynama sıcaklığına ulaştığında ise sıvı fazın buharlaşarak uzaklaşması için kullanılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, kuruma aşamasında sıcaklıkta önemli bir değişim olmamaktadır (Şekil 4.2). Kurutma işleminin sonlarına doğru nem miktarının azalmasına bağlı olarak dielektrik kayıp faktörünün de azalması, sıcaklık değerlerinde bir düşüşe neden olmaktadır.

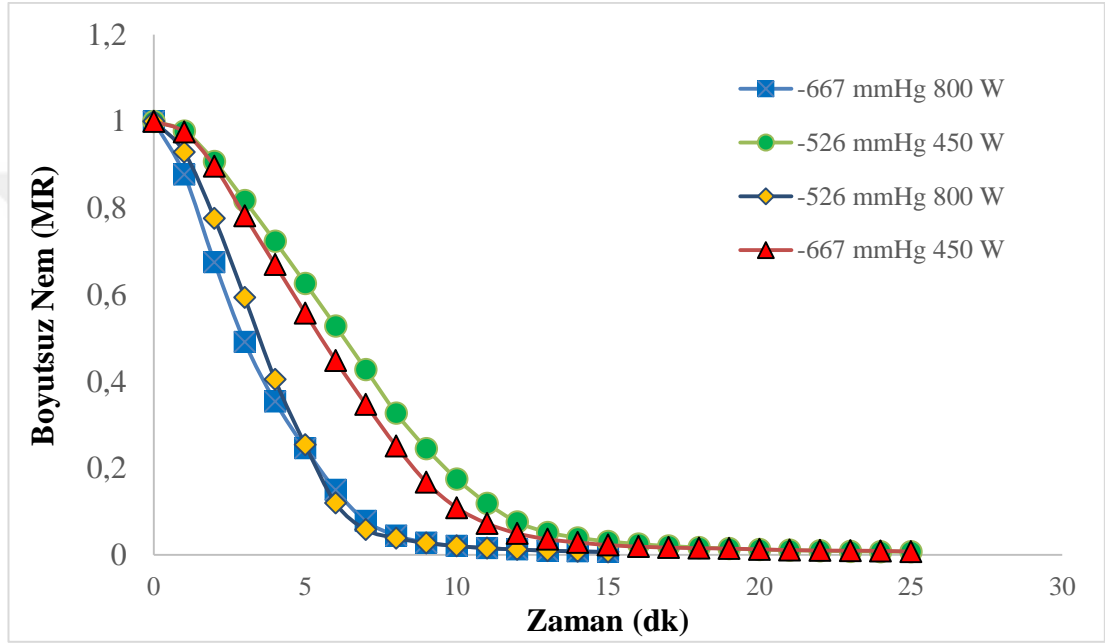
Kurutma işlemi, 800 W mikrodalga gücünde 15 dk, 450 W mikrodalga gücünde 25 dk sürmüş ve farklı işlem koşullarında 5 dk aralıklarla elde edilmiş sıcaklık dağılımları Şekil 4.3'te verilmiştir. İşlem koşullarına göre sıcaklık ölçümleri kıyaslandığında, buharlaşmanın daha yüksek sıcaklıklarda başladığı düşük vakum şiddetlerinde, enginarın daha yüksek sıcaklıklara çıktığı ve renk skalasında kırmızı bölgelere ulaştığı görülürken, daha yüksek vakum şiddetinde buharlaşmanın daha düşük sıcaklıklarda sağlanması ile renk skalasında daha düşük sıcaklıklara karşılık gelen renk değerleri görülmektedir.



Şekil 4.3. Farklı işlem koşullarında gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde termal kamera ile belirlenen sıcaklık dağılımları

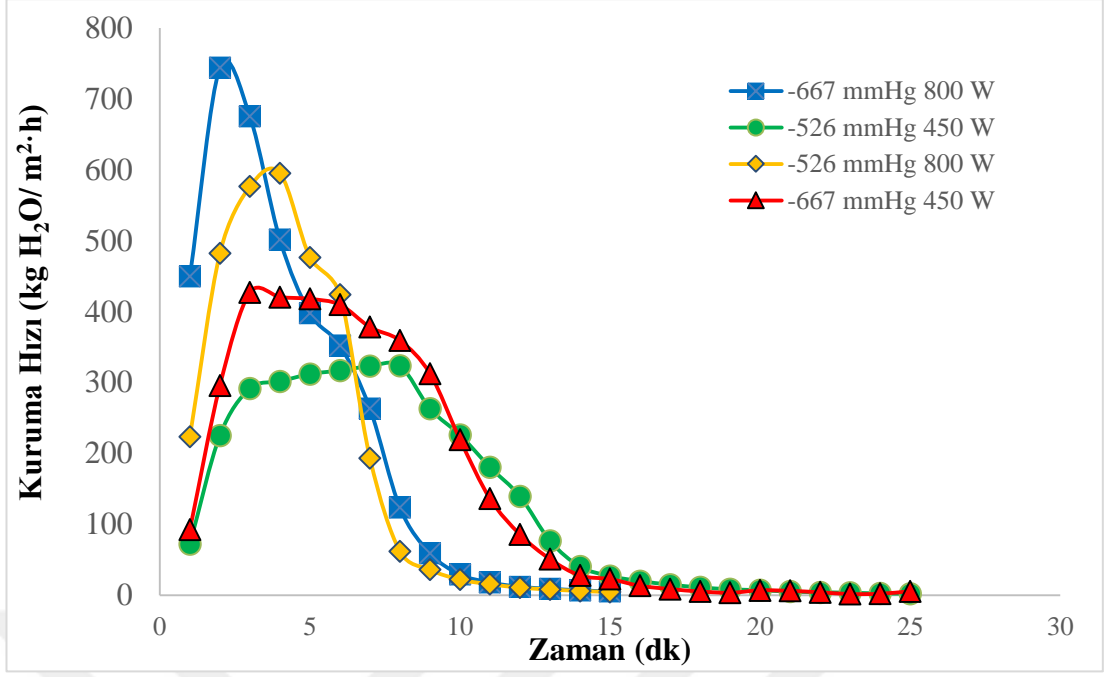
### 4.3. İşlem Parametrelerinin Enginarın Kuruma Kinetiğine Etkisi

Enginarın farklı mikrodalga güçleri (450 W, 800 W) ve farklı vakum basınçları (-526 mm-Hg ve -667 mm-Hg) kullanılarak kurutulması sırasında elde edilen boyutsuz nem içeriğinin zamana karşı grafiği Şekil 4.4’de verilmiştir. Burada, artan mikrodalga gücü uygulaması ile boyutsuz nem içeriğinin daha kısa kuruma süresinde son nem içeriğine geldiği ve kuruduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların boyutsuz nem içeriğinin zamanla değişimi

Uygulanan mikrodalga gücü ve vakum şiddetinin kuruma hızı üzerindeki etkisi tüm koşullar için Şekil 4.5'te sunulmuştur. Sabit vakum şiddetinde, daha yüksek mikrodalga gücü uygulanması enginarların kuruma hızını artırmıştır. Mikrodalga gücü seviyesi sabit kaldığında ise, yine vakum şiddetinin yüksek olduğu kurutma işleminde kuruma hızı daha yüksek bulunmuş, ancak mikrodalga gücünün kuruma hızı üzerindeki etkisinin vakum basıncına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Yukarıda belirtilen gözlemlerin bir sonucu olarak, yüksek seviyede mikrodalga gücü için hızlı kurutma sağlanabilirken, tek başına vakum şiddetinin kuruma hızına etkisinin daha sınırlı düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.



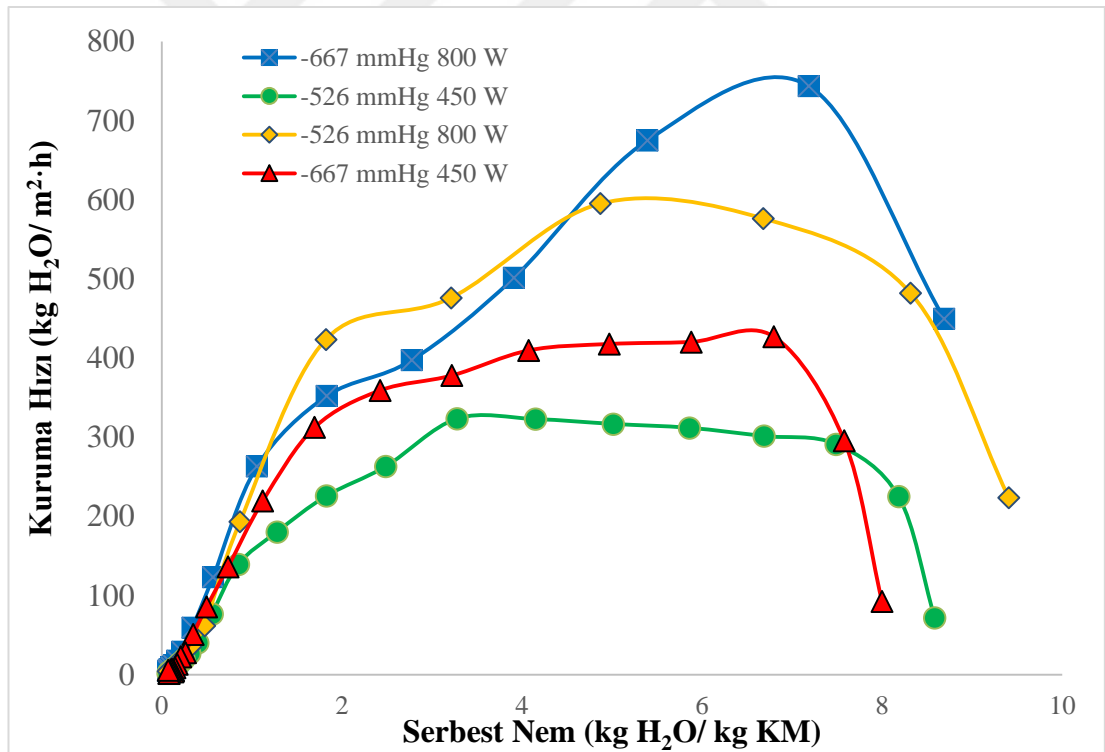
**Şekil 4.5.**Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma süresine karşı kurutma hızları

Şekil 4.6, farklı işlem koşullarında enginarın kurutulması sırasında kurutma hızlarının serbest nem içeriğine göre değişimini göstermektedir. Burada görülen kuruma hızı fazları şu şekilde gerçekleşmektedir; ilk aşamada elektromanyetik dalgaların enginar içerisindeki nem miktarına bağlı olarak absorblanmasının yüksek olması nedeniyle enginarın sıcaklığının buharlaşmanın gerçekleşeceği sıcaklığa kadar hızlı bir şekilde yükselmesi sağlanır. Bununla birlikte, düşük mikrodalga güçlerinde buharlaşma için gerekli olan enerji ile ürün tarafından absorblanan enerji arasındaki denge uygulanan vakum şiddetinden bağımsız olarak bir sabit kuruma hızı bölgesinin gözlemlenmesine neden olmaktadır. Yüksek mikrodalga güçlerinde ise kuruma hızında önce hızlı bir artış, sonrasında ise sabit kuruma hızı bölgesi gözlemlenmeden lineer varsayılabilecek bir azalan akı bölgesi gözlemlenmektedir. Mikrodalgaların hacimsel ısıtma ve vakumun içteki direnci azaltma etkisi göz önünde bulundurulduğunda, kuruma davranışlarındaki bu farklılığın büyük ölçüde uygulanan mikrodalga gücüne bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Düşük güçlerde vakum şiddetinin kuruma hızını artırıcı yöndeki etkisi daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu durum, hem büzülmenin daha az olması nedeniyle daha poröz bir



yapı içerisinde nemin dışarıya çıkışının kolaylaşmasından, hem de basınç farkının nemin dışarı çıkması için gerekli olan sürüklenme kuvvetini artırmasından kaynaklanmaktadır.

Kuruma sabit hızda devam ederken nem içeriğinin azalmasıyla dielektrik kayıp faktörünün ve dolayısıyla elektromanyetik dalgaların ısıya dönüşüm hızının azalması sonucunda, kuruma hızında bir düşme meydana gelir. Enginarın iç kısmındaki nem, dış yüzeye çıkmakta zorlanır. Böylece nem içeriğinin kurutmanın sabit hız evresinin sona erdiği kritik nem içeriğine ulaşılmasıyla, grafikten görüldüğü gibi 2 - 4 kg H<sub>2</sub>O/ kg KM 'den itibaren kuruma hızı düşmeye başlar. Kritik nemin son aşamalarında merkezden doğru oluşan kuru noktaların çoğalması ve ürünün içerisindeki nem miktarının iyice azalmasıyla kuruma giderek yavaşlar ve sona erer.



Şekil 4.6. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma hızlarının serbest nem içerikleri ile değişimi

Maskan (2000), muz dilimlerini konveksiyonel, mikrodalga ve mikrodalga destekli konveksiyon kullanarak kurutmuştur. Konveksiyonel kurutma sisteminde muzun yaklaşık 482, 610 ve 777 dakikada kuruduğu gözlemlenirken, mikrodalga kurutma sistemiyle 700, 490 ve 350 W mikrodalga güçlerinde, 13, 18 ve 27 dakikada kuruduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar kuruma süresinin mikrodalga enerjisi ile kurutma işleminde 482 dakikadan 13-27 dakikalara düştüğünü göstermektedir. Kuruma hızları kıyaslandığında güç seviyesi arttıkça kuruma hızının da arttığı görülmüştür [59].

Motevalli ve ark. (2016), yaptığı bir çalışmada, papatya yapraklarını 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 ve 900 W'da mikrodalga kurutucuda kurutmuş ve toplam kurutma sürelerini sırasıyla 40, 24, 19, 16, 14, 12, 11 ve 10 dakika olarak belirlemiştir. Burada, diğer tüm şartlar aynı olduğunda mikrodalga gücünün artmasıyla buharlaşma hızlarının attığı ve böylece kuruma süresinin azaldığı görülmüştür [60].

Yoğurtçu (2014), limon dilimlerinin mikrodalga fırında kuruma kinetiğini incelemiş, 90, 180, 360 ve 600 W mikrodalga çıkış güçleri kullanılarak yapılan kurutma işlemlerinde nihai nem içeriğine sırasıyla 52, 16, 8 ve 5.5 dk sonunda ulaşıldığını belirlemiştir [45].

Drouzas ve ark. (1999), meyve jelinin farklı mikrodalga güçlerinde ve farklı vakum seviyelerinde mikrodalga-vakum yöntemiyle ve tünel hava kurutucusunda kurutulması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Mikrodalga vakum kurutucuda pektin jelinin başlangıçta % 38.4 olan nem miktarı, mikrodalga vakum kurucu ile 4 dakikada % 3'e inerken, sıcak havalı kurutmada 8 saatte %10 nem miktarına ulaşıldığı belirtilmiştir. Mikrodalga vakum kurutucu ile meyve jellerinin kuruma hızının arttığı görülmektedir [61].

Kiranoudis ve ark. (1997), kivi, elma ve armut gibi meyvelerin kurutulmasında mikrodalga vakumlu kurutma sistemlerini kullanmış ve 240 s kurutma sonunda (20 mbar için) elma için 425 kW'da 3.04 kg/kg kb iken 850 W'da 0.50 kg/kg kb olduğu; kivi için 425 kW'da 1.98 kg/kg kb iken 850 kW'da 0.72 kg/kg kb olduğu; armut için 425 kW'da 3.07 kg/kg kb iken; 850 kW'da 0.72 kg/kg kb

olduğu bulunmuştur. Buradan sabit vakum basıncı seviyeleri için, mikrodalga gücünün artmasıyla aynı sürede kuruyan ürünlerin son nem içeriğinin daha düşük olduğu ve kuruma hızının mikrodalga gücünün artmasıyla arttığı bildirilmiştir. Kullanılan vakum seviyelerinin, ürünlerin son nem içeriğine ulaşma sürelerine etkisi 595 kW mikrodalga gücünde belirlenmiştir. Elma için 20 mbar'da 185 s'de, 40 mbar'da 210 s'de, 67mbar'da 240 s'de ulaştığı; kivi için 20 mbar'da 180s'de, 40 mbar'da 205 s'de, 67 mbar'da 245 s'de ulaştığı; armut için 20 mbar'da 150 s'de, 40 mbar'da 215 s'de, 67 mbar'da 245 s'de ulaştığı belirlenmiştir. Kullanılan vakum seviyelerinin, ürünlerin son nem içeriğine ulaşma sürelerine etkisi, tüm meyveler için incelendiğinde, mikrodalga gücü seviyesi sabit kaldığında, vakum şiddetinin yüksek olmasıyla (mutlak vakum seviyelerinin düşük olması) daha kısa zamanda düşük nem içeriklerine ulaşıldığı bulunmuştur. Bununla birlikte, bu etkinin mikrodalga gücü için olduğu kadar büyük olmadığı, yüksek seviyede mikrodalga gücü için hızlı kurutma sağlanabilirken, vakum şiddetinin kuruma hızının belirlenmesinde daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır [62].

Sham ve ark. (2001), tarafından yapılan çalışmada elma cipsi üretiminde elma dilimleri, vakum mikrodalga kurutma sistemleri ile kurutulmuş ve 1.5 kW'lik sabit mikrodalga gücünde kuruma süreleri, 7 inHg vakumda 10 dakika, 28 inHg vakumda 4 dakika olarak belirlenmiştir. Yüksek vakum seviyesi uygulandığında kuruma süresinin kısaldığı ve daha büyük şişirme etkisinden kaynaklı daha kaliteli ürün elde edildiği sonucuna varılmıştır [57].

#### **4.4. Kuruma Kinetiğine ait Matematiksel Modeller**

İşlem koşullarının kuruma kinetiğine etkilerinin belirlenmesi amacıyla enginarlar nem içerikleri %  $3,6 \pm 0,2$  -  $9,5 \pm 1,74$  aralığına ulaşıncaya kadar kurutulmuştur. Kurutma verileri literatürde yaygın olarak kullanılan empirik modeller (Newton, Page ve Henderson ve Pabis modelleri) ve II. Fick Kanunu ile tanımlanan difüzyon modeli kullanılarak modellere ait parametreler regresyon analizi ile belirlenmiştir (Tablo 4.1). Modellerin deneysel verilere uyumluluğu  $R^2$  ve RMSE değerleri kullanılarak test edilmiştir. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma süresine karşı boyutsuz nem içeriğindeki değişim deneysel olarak ve modellerle belirlenmiştir (Şekil 4.7).

Deneysel veriler incelendiğinde özellikle yüksek mikrodalga gücü ve vakum şiddeti uygulandığı durumlarda kurutmanın daha çok azalan akı bölgesindeki davranışa uygun gerçekleştiği; buna karşın düşük güç ve vakum şiddeti altında gerçekleşen kurutma denemelerinin ise belirgin bir şekilde sabit akı bölgesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

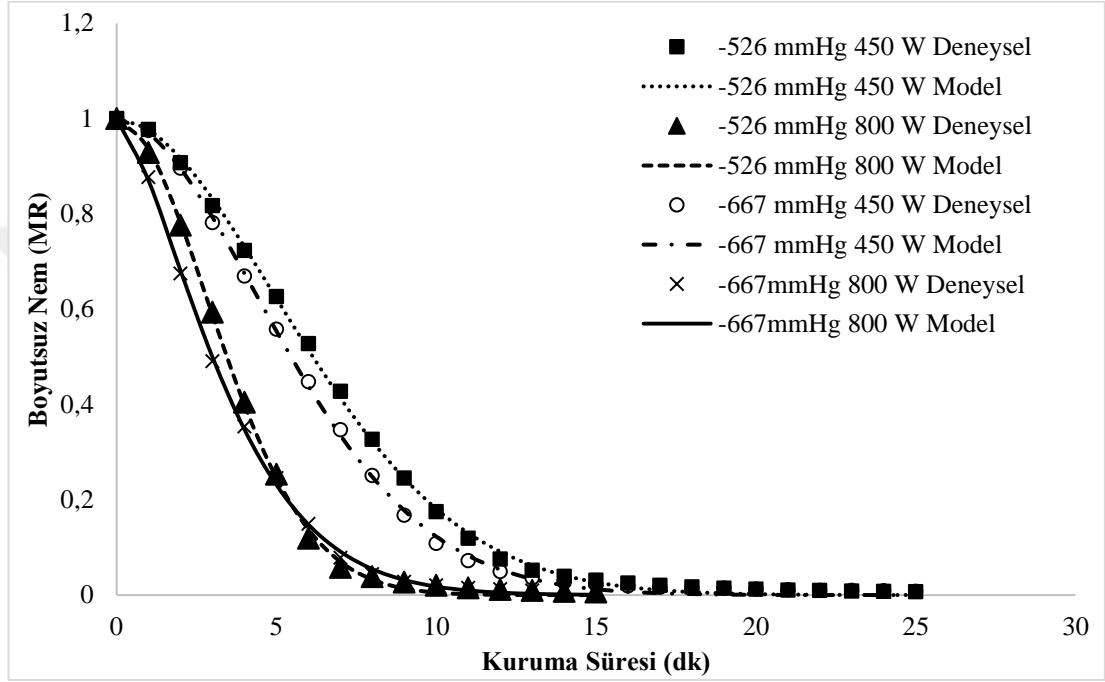
Page modeline ait  $R^2$  katsayılarının 0,999 ve RMSE katsayılarının 0,00773-0,01021 aralığında değerler aldığı bulgulanmış olup, diğer modeller ile kıyaslandığında deneysel verileri tahminlemede en iyi model olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, Page modelinin, mikrodalga gücünün etkisi ile oluşan eğrilerin formundaki değişimi net bir şekilde tanımladığı ve mikrodalga gücünün kuruma mekanizmasını önemli derecede etkilediği görülmektedir. Ayrıca vakum şiddeti de, kuruma mekanizmasını etkilemiş ve vakum arttıkça kuruma hızının da arttığı gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.1.** Enginarın kuruma kinetiğini tanımlayan modellere ait parametreler

Model	Model Parametreleri	-526 mmHg 450 W	-526 mmHg 800W	-667 mmHg 450 W	-667 mmHg 800 W
Newton	K	$2,376 \times 10^{-3}$	$4,247 \times 10^{-3}$	$2,662 \times 10^{-3}$	$4,578 \times 10^{-3}$
	$R^2$	0,936	0,939	0,942	0,973
	RMSE	0,08697	0,08537	0,08089	0,053561
Page	K	$1,232 \times 10^{-5}$	$2,763 \times 10^{-5}$	$1,751 \times 10^{-5}$	$3,53 \times 10^{-4}$
	N	1,851	1,900	1,828	1,460
	$R^2$	0,999	0,999	0,999	0,999
	RMSE	0,00913	0,01021	0,00945	0,00773
Henderson and Pabis	K	$2,716 \times 10^{-3}$	$4,716 \times 10^{-3}$	$3,029 \times 10^{-3}$	$4,922 \times 10^{-3}$
	A	1,170	1,135	1,165	1,088
	$R^2$	0,958	0,955	0,962	0,980
	RMSE	0,07153	0,07365	0,06540	0,04590
Difüzyon Modeli	$D_{eff}$	$2,031 \times 10^{-6}$	$3,646 \times 10^{-6}$	$2,280 \times 10^{-6}$	$3,903 \times 10^{-6}$
	$R^2$	0,853	0,862	0,864	0,907
	RMSE	0,1886	0,12869	0,1237	0,09881

Mikrodalga vakum kurutma sistemlerinde; nem transferi, farklı kuruma mekanizmalarının (sıvı difüzyonu, kapiler etki, su buharı difüzyonu, mikrodalgaların etkisi ile içsel buharlaşma ve yüzey buharlaşması) kombine olarak ortaya çıkması

nedeniyle difüzyon modelinin kuruma davranışını tanımlamada yeterli olmadığı görülmektedir ( $R^2=0,853-0,907$ ). Difüzyon modelindeki  $D_{eff}$  difüzyon katsayısını temsil etmekte ve bu model azalan akı bölgesinde ürün içerisindeki sıvının kararsız hal dağılımı olarak değerlendirilmektedir. Tüm mekanizmaları tanımlayan gözenekli yapı yaklaşımı ile geliştirilecek fiziksel modellerin mikrodalga vakum kurutmada daha etkili olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Deneyel ve Page model ile tahminlenen boyutsuz nem içeriklerinin kuruma süresi ile değişimi

#### 4.5. Kurutma İşleminin Enginarın Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri

Enginarın nem içeriği yaklaşık %10'un altına düşürülene kadar uygulanan kurutma işlemi sırasında farklı işlem koşulları (-526 mm-Hg 450 W, 526 mm-Hg 800 W, 667 mm-Hg 450 W, 667 mm-Hg 800 W) uygulanmasının enginarın kalite özellikleri üzerine etkileri %95 güven seviyesinde Varyans analizi ile istatistiksel olarak belirlenmiştir.

#### 4.5.1. Taze ve Kuru Enginarın Genel Özellikleri

Taze ve kuru enginarların kurutma zamanına bağlı değişen nem içerikleri ve standart sapmaları Tablo 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların nem içerikleri(%)

Kurutma Süresi (dk)	-526 mmHg 450 W	-526 mmHg 800 W	-667 mmHg 450 W	-667 mmHg 800 W
0	89,67±0,25	90,70±0,77	89,01±0,31	90,25±0,29
5	84,44±0,21	71,23±0,16	81,38±0,62	69,88±0,27
10	60,35±0,49	16,74±0,59	60,72±0,74	16,00±4,87
15	21,40±0,44	9,5±1,74	34,14±1,92	3,6±0,2
20	9,82±0,18		14,02±0,23	
25	6,46±0,30		4,65±0,04	

$a_w$ , gıda maddesinin içerdiği suyun buhar basıncının ( $P_i$ ), aynı sıcaklıkta saf suyun buhar basıncına ( $P_o$ ) oranı olarak tanımlanmakta ve gıda maddeleri tarafından tutulan suyun özelliğini gösteren bir terim olarak bilinmektedir. Gıdaların  $a_w$ 'leri saf suyun  $a_w$ 'si olan 1.0'e değerine çok yakındır. Meyvelerin  $a_w$ 'leri sebzelerinkinden biraz daha düşük olmakla birlikte genel olarak yaş meyve ve sebzelerin  $a_w$ 'leri 0.90-0.99 arasındadır. Gıdalar, nem içerikleri açısından yüksek ( $a_w$  0.90-1.00), orta ( $a_w$  0.60-0.90) ve düşük nemli ( $a_w < 0.60$ ) olarak gruplandırılabilir.  $a_w$  değeri 0.60'ın altına düştüğünde herhangi bir mikrobiyolojik faaliyet görülmemektedir [87].

Taze ve kuru enginarların kurutma zamanına bağlı değişen  $a_w$  içerikleri ( $a_w$ ) ve standart sapmaları Tablo 4.3’de verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların  $a_w$ 'leri

Kurutma Süresi (dk)	-526 mmHg 450 W	-526 mmHg 800 W	-667 mmHg 450 W	-667 mmHg 800 W
0	0,97±0,02	0,97±0,02	0,97±0,02	0,97±0,02
5	0,96±0,01	0,95±0,01	0,93±0,01	0,85±0,01
10	0,93±0,01	0,84±0,02	0,83±0,02	0,68±0,01
15	0,85±0,02	0,72±0,01	0,77±0,01	0,32±0,02
20	0,76±0,01		0,55±0,02	
25	0,73±0,02		0,28±0,01	

Gıda içerisinde bulunan suyun bir kısmı protein, şeker, yağ ve tuz gibi maddelere bağlı olarak bulunurken bir kısmı serbest haldedir. Kurutma işleminde nem miktarına bağlı olarak  $a_w$  değerlerinin de orantılı olarak değiştiği bilinmektedir. Fakat; her zaman aralarındaki ilişki doğru orantılı değildir. Bağlı su, kurumunun son safhalarında bile gıdanın yapısından uzaklaşmayan su miktarı olarak açıklanmaktadır. Vakum şiddetinin 526 mm-Hg olduğu kurutma işlemlerinde, enginarın son nem içeriği %6.46-9.5 aralığında iken  $a_w$ 'si yaklaşık 0.72'lere düşmektedir. Vakum şiddetinin 667 mm-Hg olduğu kurutma işlemlerinde ise enginarın son nem içeriği %3.6-4.65 aralığında iken  $a_w$ 'si hızlı bir düşüş göstererek yaklaşık 0.28-0.32 aralığına ulaşmaktadır. Nem miktarına kıyasla  $a_w$ 'sindeki bu hızlı düşüşün nedeninin, enginarın yapısında bulunan suyu bağlayacak çözünmüş madde miktarının az olmasından kaynaklı olarak serbest su miktarının fazla olması nedeniyle kurutma işleminde nem oranının azalması sonucu hızlıca uzaklaşmış olması ve enginarın yapısındaki bağlı suyun %5 nem içeriğinin altında olmasından kaynaklı olduğu belirlenmiştir.

Enginarların kurutulmasında farklı işlem koşullarının kullanılmasının kuru enginarın  $a_w$ 'si üzerine etkisi Tablo 4.4'de incelenmiş olup,  $a_w$ 'sinin daha düşük değerlere ulaşmasında kuruma sırasında uygulanan basınç ve işlem süresinin istatistiksel olarak önemli bir etkisinin olduğu, uygulanan mikrodalga gücünün istatistiksel olarak önemsiz olduğu belirlenmiştir ( $p < 0.05$ ).

**Tablo 4.4.** Farklı işlem koşullarının  $a_w$  üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Etki	df	Kareler Ortalaması	p-Değeri
Model	7	,089	,002
Kesişim	1	8,820	,000
Basınc	1	,117	,012
Guc	1	,050	,077
Sure	5	,101	,002
Hata	12	,013	
Toplam	20		
Düzeltilmiş Toplam	19		

$$R^2 = 0,796 \text{ (Düzeltilmiş } R^2 = 0,677)$$

## 4.5.2. Taze ve Kuru Enginarın Kalite Özellikleri

### 4.5.2.1. Taze ve Kuru Enginarın Polifenol Oksidaz Enzim Aktiviteleri

Taze ve farklı işlem koşulları ile kurutulan enginarların PFO enzim aktivite değerleri Tablo 4.5'de verilmiştir. Tablo 4.5'de verilen değerler incelendiğinde taze enginarların PFO enzim aktivitelerinin 64.50 – 93.60 U / mg taze ürün aralığında bulunduğu görülmüştür. Buna benzer olarak Guida ve ark. (2013), enginar üzerine yaptığı bir çalışmada taze enginar örneklerinde polifenoloksidaz enzim aktivitesini 67.8 U/mg taze ürün olarak belirlemişlerdir [102].

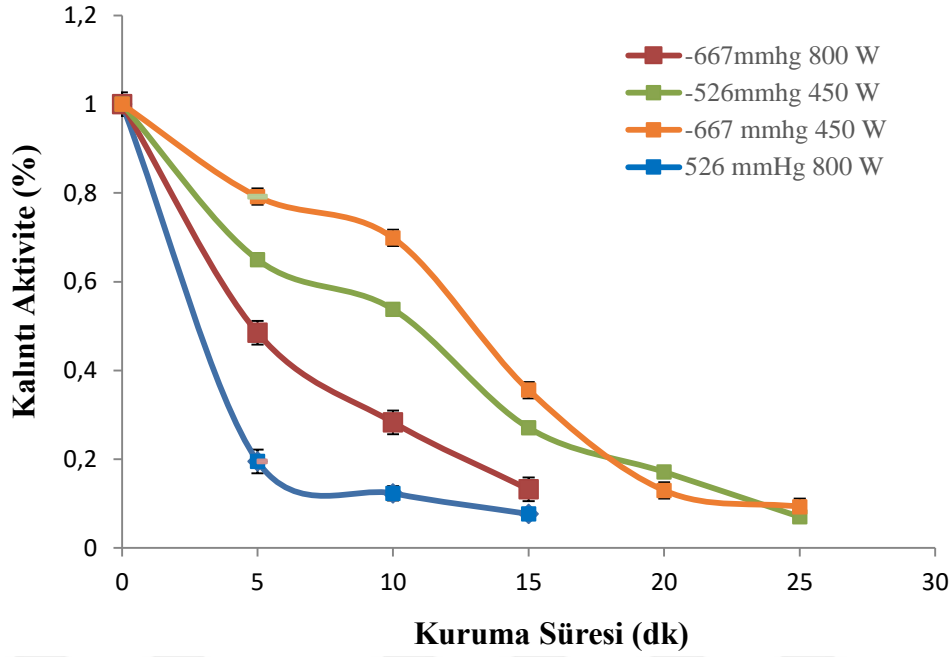
**Tablo 4.5.** Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların polifenol oksidaz enzim aktiviteleri (U/mg taze ürün)

Kuruma Süresi (dk)	-526 mmHg 450 W	-526 mmHg 800 W	-667 mmHg 450 W	-667 mmHg 800 W
0	83,10±0,60	64,50±8,40	93,60±0,30	64,65±1,95
5	54,00±1,50	12,60±0,30	74,10±0,30	31,35±6,45
10	44,70±0,30	7,95±0,15	65,40±1,50	18,30±0,00
15	22,50±5,70	4,95±0,45	33,30±0,90	8,55±0,45
20	14,25±1,05		12,15 ±2,55	
25	5,85±0,45		5,70±0,60	

Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların polifenoloksidaz enzim aktivite değerleri, 526 mm-Hg vakum basıncı uygulanan enginarların 450 W'da kurutulanlarda 5.85 U/mg taze ürün, 800W'da kurutulanlarda 4.95 U/mg taze ürün; 667 mm-Hg vakum basıncı uygulanan enginarların 450 W'da kurutulanlarda 5.70 U/mg taze ürün, 800 W'da kurutulanlarda 8.55 U/mg taze ürün olarak belirlenmiştir.

Taze enginarların polifenoloksidaz enzim aktivitelerinin değişken olması nedeniyle, farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların polifenoloksidaz enzim aktivite değerleri, taze enginardaki aktiviteye oranlanması ile normalize edilerek % kalıntı aktivite olarak Şekil 4.8'de verilmiştir.





**Şekil 4.8.** Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma süresine göre kalıntı enzim aktiviteleri

Uygulanan kurutma koşullarının kuru enginarın polifenoloksidaz enzim aktivitesi üzerine etkisinin istatistiksel açıdan değerlendirilmesine ait sonuçlar Tablo 4.6'da verilmiştir. Farklı işlem koşulları uygulanarak kurutulan enginarların polifenoloksidaz enzim aktivitesi üzerine istatistiksel olarak kuruma süresi en yüksek derecede ( $p < 0.01$ ) önemli olmakla birlikte mikrodalga gücü de önemli olarak bulunmuş, ancak vakum basıncı istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ( $p < 0.05$ ).

**Tablo 4.6.** Farklı işlem koşullarının polifenoloksidaz enzim aktivitesi üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Etki	df	Kareler Ortalaması	p-Değeri
Model	7	,316	,000
Kesişim	1	2,019	,000
Basınc	1	,038	,111
Güc	1	,252	,001
Süre	5	,431	,000
Hata	12	,013	
Toplam	20		
Düzeltilmiş Toplam	19		

$$R^2 = 0,935 \text{ (Düzeltilmiş } R^2 = 0,897)$$

Mikrodalga vakum kurutma sisteminde, sıcaklığın kısa sürede buharlaşma sıcaklığına (-526 mm-Hg için 50°C ve -667 mm-Hg için 70°C) çıkması ile polifenol oksidaz enziminin inaktif olmaya başladığı sıcaklık değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak, kuruma süresince polifenol oksidaz enzim aktivitesinde azalma görülmektedir. Uygulanan mikrodalga gücünün artırılması ile enginarların polifenoloksidad enzimlerinin inaktive olma hızlarının arttığı ve uygulanan vakum şiddetinin artırılması ile polifenoloksidad enzimlerinin inaktive olma hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu bulguların, polifenoliklerin ısıya dayanıksız olduğunu ileri süren diğer araştırmacıların çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmektedir [68,103]. Ancak, enginar kurutulduktan sonra tüm koşullar için PFO enzimi inaktif olduğundan ve nem içeriklerinin benzer olması ile son ürün bazında bakıldığında vakum şiddetinin etkisinin olmadığı görülmektedir. Ayrıca farklı koşullarda kurutulan enginarların polifenoloksidad enzim aktivite değerlerinin kuruma süresince inaktive olma hızlarının farklılık göstermesinden, sadece nem içeriğine bağlı olarak değil proses koşuluna bağlı olarak da polifenoloksidad enzim aktivitesinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Mikrodalga vakum sistemiyle kurutulan enginarların, nem içeriğindeki azalma ile polifenoloksidad enzim aktivitelerinin de azalacağı kurutma sistemlerinin temelinden bilinen bir oluşumdur. Ancak bu enzimin kuruma süresine ve kuruma şartlarına göre inaktive olma durumu, tekrar rehidre edilmesi sırasında kalitenin belirlenmesi için kontrol edilmelidir. Çünkü nem içeriğinin azalması sonucu substrat ile tepkimeye giremeyen enzimler, dehidre ürünün tekrar su alarak rehidre edilmesiyle işlevlerine devam edebilmektedir.

Nicolas ve ark. (2012), tarafından yapılan çalışmada sıcaklığın, polifenol oksidaz enzim aktivitesi üzerine etkisinin birçok araştırmacı tarafından incelendiği ve polifenol oksidazın 40°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, belirgin bir termal inaktivasyonun meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca gıda kalitesinde bozunmadan sorumlu diğer enzimlere kıyasla, polifenol oksidazın ısıya dayanıklı bir enzim olmayışı nedeniyle bu aktivitenin ağartma işlemlerinde nadir olarak kullanıldığı sonucuna varılmıştır [104].

İçier ve ark. (2008), taze üzüm suyunu, farklı voltaj derecelerinde (20, 30 ve 40 V/cm) ve farklı sıcaklıklarda (20 °C'den 60, 70, 80 veya 90 °C) ohmik olarak ısıtarak yaptıkları çalışmada, 80 °C ve 90 °C'de ısıtılan üzüm suyunun polifenoloksidaz enzim aktivitesinin 0'U'ya düştüğünü belirlemişlerdir. Diğer voltaj derecelerindeki ısıtma işlemleri de incelendiğinde artan sıcaklık ile polifenoloksidaz enziminin daha hızlı inaktive olduğu görülmüştür [72].

Bai ve ark. (2013), elmanın dört farklı sıcaklıkta (90, 100, 110 ve 120 °C) ağartma işlemi sırasında polifenoloksidaz enzim aktivitelerini incelemiş ve PFO enziminin 110 ve 120 °C'de 5 dakikada, 100 °C'de 6 dakikada ve 90 °C'de 7 dakikada tamamen inaktive edildiği belirlenmiştir. Buradan, ağartma çözeltisinin sıcaklığı artırıldıkça polifenoloksidaz enziminin inaktive olma süresinin azaldığı belirtilmiştir [73].

Jaiswal ve ark. (2010), nar tanelerini kabin kurutucusunda 90 °C'de 90 dakika, ardından 70 °C'de 2 saat ve 50 °C'de 9 saat ve ortalama sıcaklık 32-43 °C'da güneş altına sererek kurutmuşlardır. Başlangıçta 647.7 U/ml olan polifenoloksidaz enzim aktivitesi, kabin kurutucuda kurutulduktan sonra 205.7 U/ml değerine ve güneş altında kurutulduktan sonra 356 U/ml değerine düştüğü bulunmuştur. Polifenoloksidaz enziminin kuruma sıcaklığının artışına ters olarak azaldığı görülmüştür [74].

#### **4.5.2.2. Taze ve Kuru Enginarın Toplam Fenolik Madde Miktarları**

Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların TFM miktarları Tablo 4.7'de verilmiştir. Taze enginar örneklerinin TFM içeriği 46.86 ve 49.74 mg ga/g km aralığında değişmektedir. Diğer araştırmacılar ise buna benzer olarak enginar kalbindeki fenolik miktarını; 202.4–438.1 mg ga/100 g taze ürün aralığında ve 425 mg ga/100 g taze ürün olarak belirlemişlerdir [18, 20].

**Tablo 4.7.** Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların TFM miktarları (mg ga/g km)

Kuruma Süresi (dk)	-667 mmHg 450 W	-667 mmHg 800 W	-526 mmHg 450 W	-526 mmHg 800W
0	48.31±1.44	48.31±1.44	48.31±1.44	48.31±1.44
5	36.96±3.21	32.93±0.52	26.75±2.68	29.18±0.52
10	32.70±2.26	21.13±1.07	34.30±1.71	10.75±0.01
15	18.64±1.15	12.46±0.78	7.48±0.29	9.58±0.07
20	13.35±0.65		8.27±0.39	
25	11.48±0.26		8.82±0.05	

-526 mm-Hg vakum şiddetinde; 800 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarın TFM miktarı 9.58 mg ga/g km; 450 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarın TFM miktarı 8.82 mg ga/g km olarak bulunmuştur. -667 mm-Hg vakum şiddetinde ise; 800 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarın TFM miktarı 12.46 mg ga/g km, 450 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarın TFM miktarı 11.48 mg ga/g km olarak bulunmuştur.

Enginarların kurutulmasında farklı işlem koşullarının kullanılmasının kuru enginarın TFM miktarı üzerine istatistiksel etkisi Tablo 4.8'de incelenmiş olup, kurutulmuş enginarın TFM miktarındaki azalma üzerine kurutma işleminde uygulanan basınç ve işlem süresinin istatistiksel olarak önemli, mikrodalga gücünün ise önemsiz olduğu belirlenmiştir ( $p < 0.05$ ).

**Tablo 4.8.** Farklı işlem koşullarının TFM miktarı üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Etki	df	Kareler Ortalaması	p-Değeri
Model	7	,251	,000
Kesişim	1	3,262	,000
Basınc	1	,069	,006
Guc	1	,022	,081
Sure	5	,334	,000
Hata	12	,006	
Toplam	20		
Düzeltilmiş Toplam	19		

$$R^2 = ,960 \text{ (Düzeltilmiş } R^2 = ,937)$$

Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların TFM miktarları incelendiğinde, TFM miktarlarının genel olarak kuruma süresince azaldığı gözlemlenmiştir. Kuruma süresince polifenoloksidaz enzim aktivitesinin azalmasına rağmen bu enzim tarafından substrat olarak kullanılan fenolik maddelerin miktarındaki azalma, vakum etkisiyle oluşturulan düşük oksijen konsantrasyonuna sahip bir ortamda esasen sıcaklığa bağlı olarak polifenollerin diğer bileşikler (proteinler) ile bağlanması veya mevcut yöntemlerle ekstrakte edilemeyen veya tanımlanamayan bir yapıya dönüşmesi ile ilişkilendirilmiştir.

Düşük vakum basıncı ile kuruyan enginarlarda, buharlaşmanın daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesiyle, fenolik maddelerin yapısı bozulmakta ve yüksek vakum basıncında kuruyan enginara göre daha düşük TFM miktarı içermektedir. Bunun yanı sıra, 800 W mikrodalga gücünün uygulandığı kurutma işleminde enginarların 15 dk'da ve 450 W mikrodalga gücü uygulandığı kurutma işleminde enginarların 25 dk'da kurutulduğu belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak, daha uzun sürede kuruyan enginarların TFM miktarları, daha kısa sürede kuruyan enginarların TFM miktarlarına göre daha çok bozulduğu görülmüştür. Bunun olası bir nedeni ise, yapılan diğer çalışmalarda da olduğu gibi kuruma süresi olarak öngörülmektedir [103].

Kurutulan enginarların TFM miktarındaki değişim üzerine önemli derecede etkisi olan kuruma süresinin, kurutma sırasında uygulanan mikrodalga gücüne bağlı olarak kısaldığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, kuruma süresini belirleyen mikrodalga gücü, doğrudan olmasa da dolaylı olarak TFM miktarı üzerinde etkilidir. Ancak uygulanan mikrodalga gücü, TFM miktarındaki azalma üzerinde, kuruma süresine ve vakum şiddetine oranla daha az etkili olduğundan önemsiz ( $p>0,05$ ) olarak değerlendirilmektedir.

Michalczyk ve ark. (2009), çilek, ahududu ve yaban mersinini sıcak hava akımında ve dondurarak kurutarak polifenol içeriklerini inceledikleri bir çalışmada, polifenol içeriklerinin kuruma süresinin uzunluğuna ve sıcaklık derecelerine bağlı olarak önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır [105].

de Ancos ve ark. (2000), yaptığı çalışmada ise polifenolik bileşiklerin sadece ısı ile işleme değil, ısı ile işlemekten başka birçok faktöre bağlı olarak bozulabileceğini öne sürmüşlerdir. Bunlar polifenol oksidaz aktivitesi, organik asit içeriği, şeker konsantrasyonu ve pH aktivitesi olarak belirtilmiştir [106].

Başlangıçtaki taze enginarlara göre 4 farklı işlem koşulunda kurutulan enginarların TFM içeriği kıyaslandığında, TFM miktarının taze ürüne göre %74.2 – 81.7 aralığında kayba uğradığı belirlenmiştir. Buna benzer olarak yapılan bir çalışmada, Kwok ve ark. (2004) Saskatoon çileklerinin vakum mikrodalga kurutucu ile kurutma sonrası TFM içeriğindeki kayıpları Thiessen türü çileklerinde % 51.88; Smoky türü çileklerinde % 36.28 olarak bulmuştur [69].

Wojdylo ve ark. (2009)'nın çilekler üzerine yaptığı bir çalışmada ise, Kent türü çileklerin mikrodalga vakum sistemiyle farklı güçlerde (240 W, 360 W, 480 W) kurutulması sonucu TFM kayıplarının % 10.5 – 13.2 aralığında olduğu, Elsanta türü çileklerin mikrodalga vakum sistemiyle farklı güçlerde kurutulması sonucu TFM kayıplarının % 4.3 – 6.3 aralığında olduğu bulunmuştur [71]. Buradan, fenolik madde kayıplarının üründen ürüne farklılık gösterdiği ve ayrıca aynı ürün de olsa çileklerin cinsine bağlı olarak bile değişebileceği görülmüş ve bunun sonucu olarak enginarın türüne ve uygunluk seviyesine bağlı olarak bu değerlerin farklı olabileceği düşünülmektedir.

Wojdylo ve ark. (2009)'nın yaptığı çalışmada, çileklerin farklı mikrodalga gücünde kurutulması sonucu son üründeki TFM miktarları kıyaslanmış, mikrodalga gücünün artırılmasının kurutulan çilekteki TFM miktarının azalmasına neden olduğu belirtilmiştir [71].

#### **4.5.2.3. Taze ve Kuru Enginarın Renk Özellikleri**

Taze ve farklı işlem koşulları ile kurutulan enginarların renk değerleri Tablo 4.9'da verilmiştir. Taze enginarların renk değerlerinin birbirine göre farklılık göstermesi nedeniyle, kurutulan enginarların renk değişiminin tek bir enginarın başlangıç renk değerine göre kıyaslanması işlemin doğruluğunu azaltacaktır. Renk değişiminin daha doğru olarak belirlenmesi için, farklı kurutma koşullarında farklı

kuruma süreleri için her bir taze enginarın renk değerleri belirlenip kurutma sonrası renk değişimi o değerlere göre yorumlanmıştır.

**Tablo 4.9.** Taze ve farklı işlem koşullarında kurutulmuş enginarların renk değerleri

	Kuruma Süresi (dk)	L	a	b	H	$\Delta E$
-526 mmHg 450 W	0	80,01±0,02	-4,58±0,02	25,86±0,02	100,04±0,01	-
	5	82,07±0,04	-5,63±0,00	33,45±0,03	99,55±0,01	7,94±0,04
	0	65,58±0,01	-5,12±0,02	27,25±0,03	100,64±0,02	-
	10	68,22±0,27	-6,02±0,15	35,25±0,11	99,69±0,26	8,47±0,00
	0	71,15±0,01	-5,67±0,03	30,75±0,02	100,44±0,1	-
	15	74,89±0,15	-4,98±0,11	38,84±0,10	97,30±0,13	8,94±0,02
	0	67,56±0,05	-4,38±0,07	31,25±0,08	97,97±0,11	-
	20	70,77±0,27	-3,56±0,08	38,54±0,05	95,27±0,12	8,00±0,06
	0	74,53±0,07	-4,35±0,05	30,35±0,04	98,15±0,04	-
-526 mmHg 800 W	25	76,83±0,15	-3,45±0,01	38,33±0,04	95,14±0,02	8,35±0,08
	0	68,35±0,12	-3,75±0,12	25,36±0,15	98,41±0,05	-
	5	71,51±0,07	-2,69±0,02	32,78±0,50	94,69±0,11	8,14±0,49
	0	65,15±0,01	-2,86±0,04	27,31±0,03	95,97±0,02	-
	10	68,65±0,41	-1,86±0,13	34,48±0,22	93,08±0,23	8,04±1,05
	0	60,21±0,11	-2,35±0,07	27,15±0,1	94,94±0,01	-
-667 mmHg 450 W	15	62,65±0,10	-1,24±0,03	36,73±0,17	91,93±0,03	9,94±2,82
	0	79,19±0,02	-4,16±0,12	24,66±0,17	99,75±0,05	-
	5	84,33±0,29	-5,52±0,04	29,98±0,06	100,43±0,05	7,52±0,15
	0	83,12±0,01	-5,05±0,07	31,03±0,03	99,24±0,13	-
	10	87,01±0,77	-7,12±0,14	35,47±0,53	101,35±0,38	6,25±0,22
	0	83,55±0,02	-6,47±0,04	27,63±0,11	103,17±0,25	-
	15	81,04±0,0	-5,59±0,0	37,17±0,03	98,56±0,01	9,90±0,03
	0	81,23±0,01	-5,67±0,07	27,49±0,03	101,65±0,02	-
	20	78,76±0,8	-3,99±0,06	36,60±0,22	96,22±0,05	9,59±0,03
-667 mmHg 800 W	0	73,88±0,02	-3,35±0,04	24,02±0,11	97,93±0,01	-
	25	74,04±0,30	-2,35±0,03	34,96±0,25	93,84±0,07	10,98±0,26
	0	77,12±0,07	-5,45±0,18	25,52±0,05	102,05±0,12	-
	5	80,58±4,24	-6,54±0,01	36,28±0,12	100,21±0,04	11,35±2,02
	0	71,02±0,04	-2,48±0,07	23,67±0,14	95,98±0,02	-
	10	73,96±0,08	-2,54±0,04	33,23±0,1	94,37±0,09	10,00±0,07
	0	71,51±0,03	-3,33±0,02	27,65±0,07	96,86±0,15	-
15	73,37±0,24	-2,66±0,01	39,61±0,16	93,84±0,03	12,13±0,20	

L değeri, üründeki parlaklığı yani renk açıklığını ifade etmekte ve kurutma işlemi sırasında sıcaklığın artmasıyla koyu renkli pigment oluşumuna bağlı olarak azalabilmektedir. Taze ve kurutulmuş enginarların renk ölçüm sonuçları incelendiğinde, kurutulmuş enginarların L değerlerinin taze enginarların L değerine göre ortalama 2,845 birimlik bir artış gözlemlenmiştir.

a değeri yeşillik-kırmızılık değeridir. Yeşillik negatif yönde, kırmızılık pozitif yöndedir [100]. Taze enginara kıyasla kurutulmuş enginarların a değerlerinin, genel olarak kurumanın son safhalarına doğru arttığı görülmektedir.

b değeri sarılık-mavilik değeridir. Mavilik negatif yönde, sarılık pozitif yöndedir ve b değeri, oksijen ve nem varlığında hızlanan maillard reaksiyonu ile azalmaktadır [107]. Kurutulan enginarların b değerlerinin, taze enginarın b değerlerine göre artması, mikrodalga vakum kurutma işleminde enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarının düşük seviyelerde gerçekleştiğini göstermektedir.

$\Delta E$  değeri toplam renk değişimidir. Genel olarak düşük  $\Delta E$  değeri, uygulanan işlem sırasında daha az renk değişikliği olduğunu ifade etmektedir ve bu durum ürünün tüketici tarafından daha çok kabul edilmesini sağlar [107]. Kurutulan enginarların  $\Delta E$  değeri, 6.25-12.13 aralığında bulunmuştur. Farklı işlem koşullarının  $\Delta E$  üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi Tablo 4.10'da verilmiştir. Buradan toplam renk değişimi üzerine uygulanan mikrodalga gücünün istatistiksel olarak önemli derecede etkili olduğu, uygulanan vakum basıncı ve kuruma süresinin etkisiz olduğu belirlenmiştir ( $p < 0.05$ ). Ancak,  $R^2$  ve Düzeltilmiş  $R^2$  arasındaki farkın % 10'dan büyük olması ve model p değerinin (0.049) sınıra çok yakın çıkması (0.05) yapılan istatistik analizin güvenilirliğini azaltmaktadır. Dolayısıyla işlem koşullarının renk değişimi üzerine önemli bir etkisinin olmadığı söylenmesi doğru olacaktır.

Hue açısı, bir rengi diğerinden ayıran özellik olarak bilinir. Hue açısı diğer renk parametreleriyle kıyaslandığında en görsel renk parametresidir ve değer arttıkça renk de o kadar iyi olmaktadır. Hue açısı genellikle 111.00- açık yeşilden 64.00- sarıya değişirken, renk açısının değişimi kurutma işlemi sırasında meydana gelen esmerleşme reaksiyonundan kaynaklanır [107]. Kuruyan enginarların renk tonu değişiminin az olduğu ve sarıya yakın olduğu belirlenmiş, esmerleşme reaksiyonunun oksijensiz ortamda gerçekleşen kuruma nedeniyle gerçekleşmesinin önlenmesi düşünülmektedir.

Genel olarak mikrodalgada kurutulmuş enginarların renk değerleri incelendiğinde, a, b ve L değerlerinin taze enginarlara kıyasla iyi bir şekilde



muhafaza edildiği görülmektedir. Ayrıca, mikrodalga ile farklı güçlerde ve vakumda kurutulmuş enginarların renk değerlerinin (a, b, L) de birbirinden önemli ölçüde farklı olmadığı belirlenmiştir. Buradan, renk değerlerindeki değişimin mikrodalga çıkış gücüne ve vakum basıncına bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Enginarların mikrodalga vakum sistemiyle çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadan kurutulmasında önemli ölçüde rengin korunduğu düşünülmektedir.

**Tablo 4.10.** Farklı işlem koşullarının  $\Delta E$  üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Etki	df	Kareler Ortalaması	p-Değeri
Model	6	4,203	,049
Kesişim	1	1078,360	,000
Basınc	1	6,134	,053
Güç	1	9,341	,023
Süre	4	3,087	,117
Hata	9	1,238	
Toplam	16		
Düzeltilmiş Toplam	15		

$$R^2 = 0,694 \text{ (Düzeltilmiş } R^2 = 0,489)$$

Arslan ve Özcan (2011)'de buna benzer olarak mikrodalga fırında kurutulmuş kırmızı çan-biber L değerlerinin taze örnekle karşılaştırıldığında neredeyse hiç değişmediği, düşük güç çıkışı mikrodalga kurutma sırasında daha uzun kuruma süresine neden olduğundan kuruyan ürünlerin kızarıklıklarında azalmaya neden olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, mikrodalga fırında kurutulmuş biberlerin b değerleri, taze biberlerin b değerlerine yakın düzeyde bulunmuştur [66].

Soysal (2004), maydanoz yapraklarını farklı mikrodalga güçlerinde kurutulmuşlardır. Taze ve kurutulmuş maydanoz yapraklarının renk ölçüm sonuçları incelendiğinde, kurutulmuş yaprakların L\* değerlerinin taze maydanoz yaprakların L\* değerine göre önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, mikrodalgada kurutulmuş yaprakların a\*, b\* ve C değerlerinin taze yaprakların değerlerine göre önemli ölçüde farklı olmadığı, kurutulmuş maydanoz yapraklarında bazı kararmalar meydana gelse de taze maydanoz yapraklarınıninkine yakın iyi bir yeşil rengin elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, mikrodalga ile farklı güçlerde kurutulmuş yaprakların renk değerlerinin (L\*, a\*, b\*, C) de birbirinden önemli

ölçüde farklı olmadığı belirtilmiştir. Buradan, renk değerlerindeki değişimin mikrodalga çıkış gücüne bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır [67].

Parin ve ark. (2004), yaptığı çalışmada enginar kalbini 30 dakika damıtık suda, %1'lik askorbik asit veya sodyum bisülfid çözeltisinde bekleterek sıcak hava kurutma ile 50, 60 ve 70°C sıcaklıkta ve 8.1 m/s hava hızında kurutmuştur. Tüm sonuçlar içinde, % 1 sodyum bisülfid ile ön işlem uygulanan ve 50 ° C'de kurutulan enginarlar için en iyi renk elde edilmiş, genel olarak incelendiğinde ise renk değerlerinin taze enginarın renk değerlerine göre çok fazla bir değişim olmadığı görülmüştür [85].

#### 4.5.2.4. Kuru Enginarın Rehidrasyon Oranı

Rehidrasyon, kuru ürün kalitesini ölçmek için kullanılan önemli özelliklerden biridir. Kurutulmuş ürün rehidrasyon sonucunda, kururken kaybettiği kadar suyu ne kadar fazla kazanırsa RHO daha yüksek olur ve kurutma koşulları veya ürün kalitesi o kadar iyi olarak değerlendirilir [86].

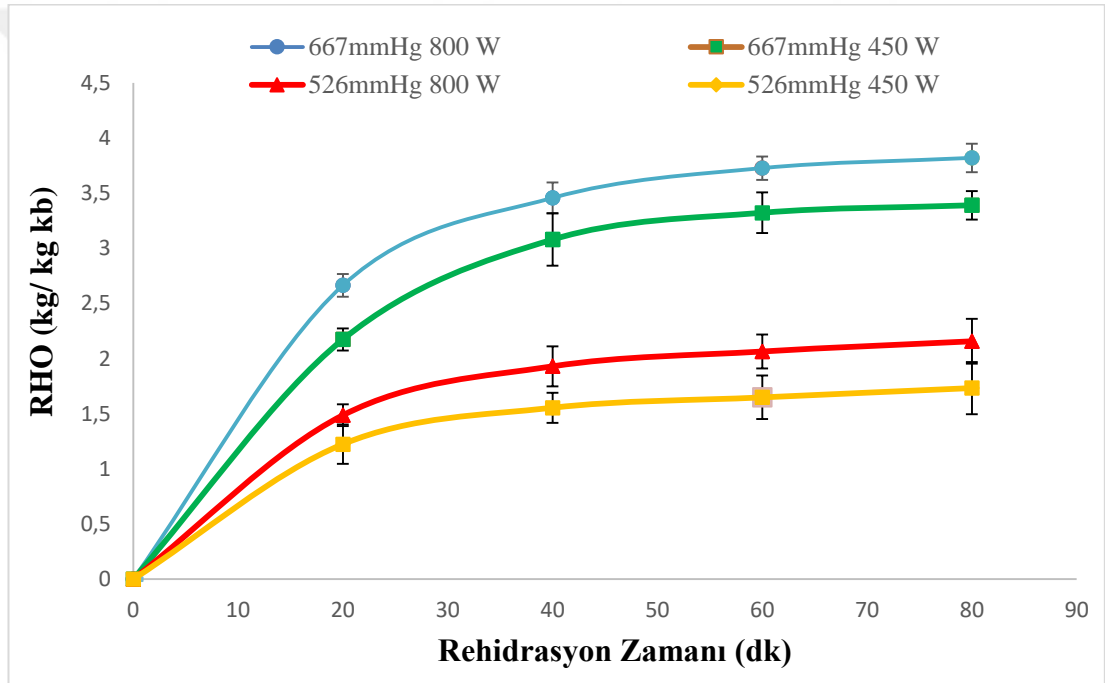
Farklı işlem koşullarında enginarların, kuruyuncaya kadar belirli aralıklarla alınıp 80 dk rehidre edilmesi sonucu RHO'ları Tablo 4.11'de verilmiş olup, 526 mm-Hg vakum basıncında kurutulan enginarların RHO'larının 667 mm-Hg vakum basıncında kurutulan enginarların RHO'larına göre daha düşük olduğu; 450 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarların RHO'larının ise 800 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarların RHO'larına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4.11.** Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların RHO'ları

Kuruma Süresi (dk)	-526 mmHg 450 W	-526 mmHg 800W	-667 mmHg 450 W	-667 mmHg 800 W
0	-	-	-	-
5	1,2104±0,0056	1,3242±0,0003	1,367±0,1313	2,1605±0,4914
10	1,4088±0,0177	1,8662±0,0072	1,9141±0,0151	2,9263±0,1992
15	1,5319±0,0856	2,1570±0,1440	2,3518±0,0592	3,82±0,091
20	1,6161±0,0997		2,9593±0,0282	
25	1,7326±0,1673		3,3903±0,0932	

Mikrodalga vakum sistemi ile kurutulan enginarlarda vakum basıncının oluşturduğu iç basınç, enginarların kururken nem kaybetmesine rağmen daha poröz bir yapıya sahip olmasına ve oluşan gözenekli yapıdan rehidre edilirken daha kolay su girişi olmasına olanak sağlar. Buradan, mikrodalga gücü ve vakum şiddeti artırılarak kurutulan enginarların RHO'larının daha fazla olduğu görülmüştür.

Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların RHO'larının, rehidre edilme süresine göre değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Rehidrasyon süresi arttıkça kurutulmuş enginarların RHO'ları artmış ve taze enginara daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların RHO'larının rehidre edilme süresine göre değişimi

Uygulanan kurutma yöntemlerinin kuru enginarın RHO üzerine etkisinin istatistiksel açıdan değerlendirilmesinin sonuçları Tablo 4.12'de verilmiştir. Farklı işlem koşulları uygulanarak kurutulan enginarların rehidrasyonu üzerine istatistiksel olarak vakum şiddeti en yüksek derecede önemli olmakla birlikte mikrodalga gücü ve kuruma süresinin de önemli derecede etkili olduğu görülmektedir ( $p < 0.05$ ).

**Tablo 4.12.** Farklı işlem koşullarının RHO üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Etki	df	Kareler Ortalaması	p-Değeri
Model	6	1,354	,001
Kesişim		64,630	,000
Basinc	1	4,042	,000
Guc	1	1,665	,006
Sure	4	,849	,010
Hata	9	,131	
Toplam	16		
Düzeltilmiş Toplam	15		

$$R^2 = 0,873 \text{ (Düzeltilmiş } R^2 = 0,789)$$

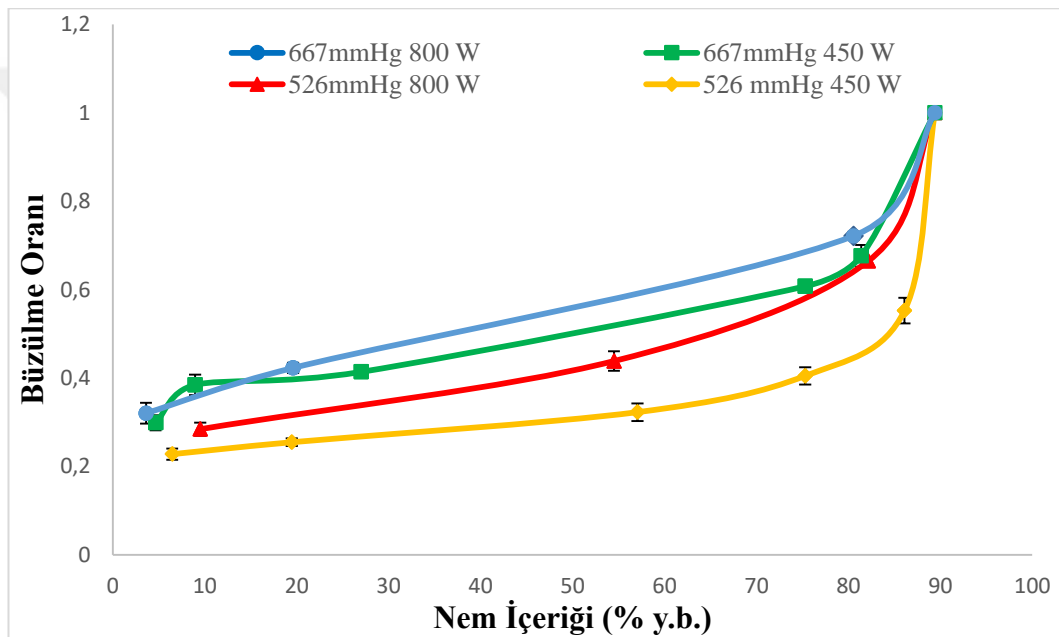
Chauhan ve Srivastava (2009), vakum destekli bir mikrodalga kurutma sisteminde kuruttukları yeşil bezelyeleri rehidre ederek, mikrodalga gücü (300 W) sabit tutulduğunda RHO, vakım şiddeti 50 mm-Hg'da 2.90, 225 mm-Hg'da 3.06, 400 mm-Hg'da 3.14 bulmuşlar ve vakum şiddeti (50 mm-Hg) sabit tutulduğunda ise RHO, 100 W'da 2.18, 200W'da 2.64, 300W'da 2.90 olarak bulunmuştur. Buradan, daha yüksek mikrodalga gücü ve vakum uygulaması ile RHO'nun arttığı sonucuna varılmıştır [9].

Drouzas ve Schubert (1996), muz dilimlerini, bir vakum mikrodalga fırınında kurutmuşlar ve RHO'su 350 dk sonunda, 4.2 ve 6.1 kg/ kg kb olarak bulurken, geleneksel olarak kurutulan muz örneklerinde 2.5 ve 3 kg/ kg kb olarak bulmuşlardır [63].

Lin ve ark. (1998), havuç dilimlerini sıcak hava ile, dondurarak ve vakumlu mikrodalga kurutucu ile kurutmuşlardır. Kurutulan havuçların 25°C'de 180 dk rehidrasyonu sonucu sıcak hava ile kurutulanların RHO değerleri 4.8 kg/ kg kb, mikrodalga vakum sistemiyle kurutulanların 6.2 kg/ kg kb olarak bulunurken; 100°C'de 10 dk rehidre edilen havuçların RHO değerleri ise, sıcak havada kurutulanların 2.5 kg/kg kb, mikrodalga vakum sistemiyle kurutulanların 4.4 kg/ kg kb olarak bulunmuştur. Mikrodalga vakum kurutucu ile kurutulan havuçların, sıcak havaya kıyasla daha yüksek rehidrasyon potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir [64].

#### 4.5.2.5. Kuru Enginarın Büzülme Katsayısı

Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların büzülme katsayılarının nem içeriğine göre değişimi ise Şekil 4.10'da verilmiştir. Kuruma süresi artırıldıkça BK'nın azaldığı belirlenmiş, örnekler arasında en yüksek büzülme değerine 667 mm-Hg vakum basıncı ve 800 W mikrodalga gücü uygulanarak kurutulan enginar örneğinde ulaşılmıştır. Vakum şiddetinin artırılması (-526 mm-Hg'dan 667mm-Hg'ya) ile BK'nın, 450 W'da 0.2280'den 0.299'a; 800 W'da ise 0.2845'den 0.3205'e yükseldiği görülmüştür.



Şekil 4.10. Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların büzülme değerlerinin nem içeriğine göre değişimi

Uygulanan kurutma yöntemlerinin kuru enginarın BK üzerine etkisinin istatistiksel açıdan değerlendirilmesinin sonuçları Tablo 4.13'te verilmiştir. Farklı işlem koşulları uygulanarak kurutulan enginarların BK üzerine istatistiksel olarak kuruma süresi en yüksek derecede önemli olmakla birlikte vakum basıncı da önemli derecede etkili olarak bulunmuş, mikrodalga gücü önemsiz olarak bulunmuştur ( $p < 0.05$ ).

**Tablo 4.13.**Farklı işlem koşullarının büzüme üzerine etkilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Etki	df	Kareler Ortalaması	p-Değeri
Model	7	,194	,000
Kesişim	1	4,068	,000
Basınc	1	,024	,016
Guc	1	,001	,579
Sure	5	,258	,000
Hata	12	,003	
Toplam	20		
Düzeltilmiş Toplam	19		

$$R^2 = 0,974 \text{ (Düzeltilmiş } R^2 = 0,958)$$

Bitkisel yapılarda hücre içi sıvıların oluşturduğu turgor basıncı suyun uzaklaştırılması ile azalarak dokunun iç ve dış kısmı arasında bir basınç dengesizliği meydana getirir ve yapıda büzülme gerçekleşir. Kurutma işleminin vakum altında gerçekleşmesi ile bu basınç dengesizliği azalacağından üründe daha az büzülmenin gerçekleşmesine neden olur.

Giri ve Prasad (2006), düğme mantarlarının, mikrodalga vakum kurutucu ile kurutma sonrası büzülme katsayılarını 10 kPa (mutlak vakum) sabit vakum şiddetinde 150 W mikrodalga gücünde 0.223; 250 W mikrodalga gücünde 0.252; 20 kPa vakum şiddetinde ise 150 W mikrodalga gücünde 0.218; 250 W mikrodalga gücünde 0.221 olarak bulmuştur. Mikrodalga vakum kurutucuda vakum şiddetinin ve mikrodalga gücünün artmasının BK'yı artırdığı görülmüştür. Mikrodalga vakumlu kurutma sisteminde, sistem basıncının büzülme üzerine etkisinin mikrodalga güç seviyesine oranla daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu durumun, düşük basınçta mikrodalga vakumla kurutma sırasında basınç farkının daha fazla olmasının üründe daha fazla şişirici etki sağlamasından ve daha az büzülme olduğundan kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir [75].

Bu çalışmada benzer şekilde, suyun üründen uzaklaştırılması ile oluşan basınç dengesizliğinin en aza indirgenmesi ve vakum ile üründe oluşan şişmenin etkisiyle, vakum şiddetindeki artışa bağlı olarak mikrodalga vakumla kurutma işlemi sırasında BK'nın daha yüksek değerler aldığı sonucuna varılmıştır.

Mikrodalga gücünün artırılması ile ürünün nem içeriğine bağlı olarak, nem oranının fazla olduğu kurumanın ilk aşamalarında, absorbladığı elektromanyetik dalgalar daha fazla olduğundan kuruma hızı daha yüksek değerlere ulaşarak iç basıncın daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak kuruma süresinin artmasıyla nem içeriğindeki azalma sonucu elektromanyetik dalgaların absorblanması daha az olduğundan kuruma hızı azalmakta ve iç basınçta buna bağlı olarak azalmaktadır. İç basıncın yüksek olduğu durumlarda basınç dengesizliği daha az olacağından büzülme daha az olurken, kurumanın son safhalarında iç basıncın düşmesi ile büzülme artacaktır. Güce bağlı olarak değişen iç basıncın kuruma süresince farklılık göstermesi, vakum şiddetinin büzülme üzerindeki etkisinin mikrodalga güç seviyelerindeki değişime göre daha belirgin olduğu görülmektedir.

Nagvanshi ve ark. (2017), yaptığı bir çalışmada çeşitli çalışma koşullarında mikrodalga vakumlu kurutma (MVD) ile üzüm kurutarak nem oranının bir fonksiyonu olarak büzülme ve yoğunluktaki değişiklikleri incelemişlerdir. Üzümler altı farklı nem içeriğine kadar kurutulmuş ve büzülme oranı, nem içeriğiyle doğrusal olarak azalmıştır. Nem içeriğinin fazla olduğu aşamalarda mikrodalga gücündeki artış kuruma hızını da artırmış ve buharlaşma etkisiyle iç basıncın artmasıyla büzülme oranı daha az olmuştur. Çünkü iç basıncın artması ürünün büzülme oranına ters etki göstermektedir. Deneysel veriler, nem içeriğine bağlı olarak kuruma hızından kaynaklı iç basıncın sürekli farklılık gösterdiğini ve sistem basıncının mikrodalga vakum kurutma sırasında güç değişimine oranla büzülme ve yoğunluk değişimleri üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [76].

#### **4.6. Kurutma Verimliliği**

Mikrodalga vakum kurutma sisteminde enginarların kurutma verimliliği ( $\eta$ ), enginardan buharlaşan su için kullanılan ısı enerjisinin mikrodalga fırın tarafından sağlanan ısıya oranı olarak yüzdesel hesaplanarak ve birim kütle suyu uzaklaştırmak için tüketilen enerji (MJ/kg su) hesaplanarak Tablo 4.14'de verilmiştir.

**Tablo 4.14.** Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların kuruma verimliliği (%) ve  $E_s$  (MJ/kg su) Miktarı

<b>Kurutma Koşulları</b>	<b>% Kuruma Verimliliği</b>	<b><math>E_s</math> (MJ/kg su)</b>
-526 mmHg 450 W	17,02±0,04	13,26±0,03
-526 mmHg 800 W	33,36±2,63	6,81±0,54
-667 mmHg 450 W	17,65±0,13	12,79±0,09
-667 mmHg 800 W	35,89±2,40	6,32±0,42

Enginarların kurutulması için gereken enerji, 6.32 ile 13.26 MJ/kg su arasında; kurutma verimleri ise % 17.02- 35.89 arasında bulunmuştur. -667 mm-Hg vakum şiddeti ve 800 W mikrodalga gücünde minimum özgül enerji tüketimi (6.32 MJ/kg) ve maksimum kurutma verimliliği (% 35.89) elde edilmiştir. Buradan, aynı vakum şiddetinde mikrodalga gücünün artmasıyla enginarların kuruması için kg su başına enerji tüketiminin azaldığı ve kuruma verimliliğinin arttığı görülmüştür. Vakum şiddetinin artmasıyla da aynı güçte kurutulan enginarların kuruması için kg su başına enerji tüketiminin azaldığı ve kuruma verimliliğinin arttığı görülmesine rağmen, mikrodalga gücünün, kurutma verimliliği üzerine etkisinin vakum şiddetine kıyasla daha etkili olduğu görülmektedir.

Zarein ve ark. (2013) da buna benzer olarak, mikrodalga kurutucuda (200, 400 ve 600 W) elma kurutarak enerji verimliliklerini ve kuruma hızlarını belirlemiş, 600 W'da kurutulan elmanın enerji verimliliği % 55 olarak, 400 W'da kurutulan enerji verimliliği % 25 olarak, 200 W'da kurutulan elmaların enerji verimliliği %17 olarak bulmuş ve uygulanan mikrodalga gücünün artmasıyla enerji verimliliğinin arttığını bildirmişlerdir [77].

Alibaş (2007), ısırgan otunu mikrodalga kurutucuda, sıcak hava kurutucuda ve vakumlu kurutucuda kurutarak enerji tüketim miktarlarını karşılaştırmıştır. Üç kurutma yöntemi enerji tüketim değerlerine göre kıyaslandığında, en düşük enerji tüketiminin mikrodalga kurutma yönteminde olduğu ve mikrodalga gücü arttıkça enerji tüketiminin azaldığı görülmüştür. Vakum seviyelerine göre değerlendirildiğinde ise; vakum şiddetinin artmasıyla enerji tüketimini arttığı belirlenmiştir [80].



Chauhan ve Srivastava (2009), yeşil bezelyeleri vakum destekli bir mikrodalga kurutma sisteminde (100–300 W ve 50-400 mm-Hg) kurutarak enerji tüketimini, mikrodalga gücü 300 W’da vakum şiddeti 50 mm-Hg’da 15.1 MJ/kg iken 400 mm-Hg’da 15.4 MJ/kg olduğunu; mikrodalga gücü 100 W’da vakım şiddeti 50 mm-Hg’da 26.6 MJ/kg iken ise 400 mm-Hg’da 22.5 MJ/kg olduğunu bulmuştur. Buradan, uygulanan mikrodalga gücü ve vakum şiddetinin artırılmasıyla üründen kg su uzaklaştırmak için tüketilen enerjinin azaldığı sonucuna varılmıştır [9].



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Değerli bir besin kaynağı olan enginarın, taze, konserve veya dondurulmuş şekilde tüketimine alternatif olarak arz çeşitliliğinin artırılmasında ve ürün kalitesinin korunmasında mikrodalga vakum teknolojisi ile kurutmanın etkili bir yöntem olduğu bu çalışmada ortaya konulmuştur.

Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların, kuruma hızları incelendiğinde, kurumanın -667 mm-Hg vakum şiddeti ve 800 W mikrodalga gücünde en kısa sürede gerçekleştiği görülmektedir. Mikrodalga gücünün artmasıyla ürün içerisindeki suyun buharlaşmasının daha kısa sürede gerçekleştiği ve mikrodalga gücünün uygulanan vakum şiddetine oranla kuruma hızı üzerinde daha etkili olduğu bulgulanmıştır. Kurutma işleminde ürün sıcaklığının uygulanan vakuum şiddetine bağlı olarak düşürülebildiği gözlemlenmiştir. Özellikle kurutma işleminin sonlarına doğru nem miktarının azalmasına bağlı olarak dielektrik kayıp faktörünün de azalması, ortalama sıcaklık değerlerinde bir düşüşe neden olmuştur.

Mikrodalga vakum kurutma işleminde, sıcaklığın kısa sürede artarak polifenol oksidaz enziminin inaktif olmaya başladığı sıcaklık değerlerine ulaşması ile kuruma süresince polifenol oksidaz enzim aktivitelerinde azalma görülmektedir. Enginaradaki polifenoloksidaz enzimlerinin inaktivasyon hızı üzerine, uygulanan mikrodalga gücünün, uygulanan vakum şiddetine göre daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

Farklı işlem koşullarında kurutulan enginarların TFM miktarlarının genel olarak kuruma süresince azaldığı gözlemlenmiştir. Vakum basıncının artmasına bağlı olarak, buharlaşma sıcaklığının düşmesiyle, TFM miktarı daha iyi korunmuştur. Buna bağlı olarak, taze enginarların TFM içeriğine en yakın değer, 667 mm-Hg vakum basıncı ve 800 W mikrodalga gücünde kurutulan enginarlarda görülmüştür.

Renk değerlerinin her kurutma koşulunda hemen hemen korunduğu ve mikrodalga gücünün  $\Delta E$  değerlerinde hafif bir artışa neden olduğu görülürken vakum şiddetinin etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Vakum şiddeti ve mikrodalga gücü, enginarların kururken su kaybetmesi sırasında oluşan büzölmeye ters olarak etki göstermiştir. Mikrodalga gücünün artırılması ile enginar içerisindeki suyun buharlaşmasının daha kısa sürede gerçekleştiği ve buhar basıncı ile oluşan iç basıncın sağladığı şişme etkisinin çökme gerçekleşmeden kurumanın büyük ölçüde gerçekleştiği görölmüştür. Böylece mikrodalga vakum kurutma teknolojisi ile kurutulan enginarların daha poröz bir yapıya sahip olduğu ve oluşan gözenekli yapıdan rehidre edilirken daha kolay su girişi sağladığı sonucuna varılmıştır.

Kurutulmuş enginarların büzölme katsayısı ile RHO arasında yüksek bir pozitif korelasyon katsayısı olduğu bulgulanmıştır. Vakum şiddetinin artırılması ile ürünün büzölmesi daha az gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, mikrodalga gücünün ürünün kuruma hızına etkisinin nem içeriğine bağlı olarak azalması, büzölme katsayısı üzerindeki etkisini sınırlamaktadır.

Enginarların kurutulması için gereken enerji, 667 mm-Hg vakum basıncında ve 800 W mikrodalga gücünde, diğer işlem koşullarına göre en düşük değeri alırken, enerji verimliliğinin bu işlem koşulunda en yüksek olduğu görölmüştür. Buradan, mikrodalga gücü ve vakum şiddetinin artmasıyla enginarların kuruması için kg su başına enerji tüketiminin azaldığı ve kuruma verimliliğinin arttığı görölmüştür.

Laboratuvar ölçekli tasarlanmış bir mikrodalga vakum kurutma sistemi kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma bir ön araştırma niteliğinde olup, kurutulmuş enginardaki kalite kayıplarının azaltılabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca, endüstriyel üretim sistemlerinin tasarımında kullanılmak üzere kuruma hızı ve sıcaklık dağılımı gibi parametrelerin işlem parametrelerine bağlı olarak değişimine ait veriler literatüre kazandırılmıştır. Bununla birlikte, kurutucu içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı dikkate alınarak elektromanyetik dalgaların maksimum seviyede absorblanacağı magnetron yerleşim pozisyonunun belirlenmesi, kurutma işleminin daha yüksek enerji verimliliği ile gerçekleştirilmesini sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., Berrbeuh, M.H. Solar Drying of Sliced Potatoes an Experimental Investigation. *Energy Procedia*. 2013, 36, 1276–1285.
2. Erbay, B., Küçüköner, E. Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri. Türkiye 10. Gıda Kongresi, 21-23 Mayıs, 2008, Erzurum (1045-1048 s).
3. Hepbaşlı, A., Erbay Z., İçier, F., Çolak N., Hancıoğlu E. Güneş Enerjisi Destekli Gaz Motoru Tahrikli Bir Isı Pompası Uygulaması. *Mühendis ve Makine*. 2008, 49(581), 20-29.
4. Güngör, A. Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, 2013, İzmir, (43-63 s).
5. Sutar, P.P. and Prasad S. Modeling Microwave Vacuum Drying Kinetics and Moisture Diffusivity of Carrot Slices. *Drying Technology*. 2007, 25:10, 1695-1702.
6. Aktaş, M., Şevik, S., Doğan, H. ve Öztürk, M. Fotovoltaik ve Termal Güneş Enerjili Sürekli Bir Kurutucuda Domates Kurutulması. *Tarım Bilimleri Dergisi* 2012, 18:1, 287-298.
7. Apaydın, N. Aydın Yöresinde İncir Kurutmada Kullanılacak Olan Doğal Akımlı Bir Güneş Enerjili Kurutucunun Modellenmesi. Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Aydın, 2007, 95 s. (Yüksek Lisans Tezi).
8. Mutlu, A. ve Ergüneş, G. Tokat'ta Güneş Enerjili Raflı Kurutucu İle Domates Kurutma Koşullarının Belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*. 2008, 1 (1), 61-68.
9. Chauhan, A.K.S. and Srivastava, A.K. Optimizing Drying Conditions for Vacuum-Assisted Microwave Drying of Green Peas (*Pisum sativum L.*). *Drying Technology An International Journal*. 2009, Volume 27, Issue 6.
10. Cui, Z.W., Xu, S.Y. and Sun, D.W. Dehydration of Garlic Slices by Combined Microwave-Vacuum and Air Drying. *Drying Technology An International Journal*. 2007, 21(7).
11. Garbetta, A., Capotorto, I., Cardinali, A., Antuono, I.A., Linsalata, V., Pizzi, F. and Minervini, F. Antioxidant Activity Induced by Main Polyphenols Present in Edible Artichoke Heads: Influence of in Vitro Gastro-Intestinal Digestion. *Journal of Functional Foods*. 2014, 10(1), 456-464.
12. Bektaş, Z.K. ve Saner, G. Türkiye'de Enginar Üretimi ve Pazarlaması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 2013, 27(1), 115-128.
13. Food and Agriculture Organization (FAO), Çeşitli Yıllar (<http://www.fao.org>). (Erişim Tarihi: Mayıs 2018)
14. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Çeşitli Yıllar (<http://www.tuik.gov.tr>). (Erişim Tarihi: Mayıs 2018)
15. Lattanzio, V., Kroon, P.A., Linsalata, V. and Cardinali, A. Globe Artichoke: A Functional Food and Source of Nutraceutical Ingredients. *Journal of Functional Foods*. 2009, 1(2), 131-144.
16. Lutz, M., Henriquez, C. and Escobar, M. Chemical Composition and Antioxidant Properties of Mature and Baby Artichokes (*Cynara Scolymus L.*), Raw and Cooked. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2011, 24(1), 49-54.

17. Speroni, E., Cervellati, R., Govoni, P., Guizzardi, S., Renzulli, C. and Guerra, M.C. Efficacy of Different *Cynara Scolymus* Preparations on Liver Complaints. *Journal of Ethnopharmacology*. 2003, 86(2–3), 203-211.
18. Brat, P., George, S., Bellamy, A., Chaffaut, L. D., Scalbert, A., Mennen, L., Armault, N. And Amioti M.J. Daily polyphenol intake in France from fruit and vegetables. *The Journal of Nutrition*. 2006, 2368–2373.
19. Lombardo, S., Pandino, G., Mauromicale, G. And Schieber A. Influence of genotype, harvest time and plant part on polyphenolic composition of globe artichoke [*Cynara cardunculus L. var. scolymus (L.) Fiori*]. *Food Chemistry*. 2010, 119(3), 1175-1181.
20. Doğan, S., Turan Y., Ertürk, H., ve Arslan, O. Characterization and purification of polyphenol oxidase from artichoke (*Cynara scolymus L.*). *Journal of Agriculture Food Chemistry*. 2005, 53(3), 776-785.
21. Curadi, M., Piciarelli, P., Lorenzi, R., Graifenberg, A. And Ceccarelli, N. Antioxidant Activity and Phenolic Compounds in the Edible Parts of Early and Late Italian Artichoke (*Cynara Scolymus L.*) Varieties. *Ital. Journal Food Science*. 2005, 17(1).
22. Lattanzio, V., Cicco, N. And Linsalata, V. Antioxidant Activities of Artichoke Phenolics. *ISHS Acta Horticulturae 681: IV International Congress on Artichoke*, 2005, 10.17660/ActaHortic.2005.681.59.
23. Fratianni, F., Pepe, R. And Nazzaro, F. Polyphenol Composition, Antioxidant, Antimicrobial and Quorum Quenching Activity of the “Carciofo di Montoro” (*Cynara cardunculus var. scolymus*) Global Artichoke of the Campania Region, Southern Italy. *Food and Nutrition Sciences*. 2014, 5(1), 2053-2062.
24. Abu-Reidah, İ.M., Arráez-Román, D., Segura-Carretero, A. and Fernández-Gutiérrez A. Extensive Characterisation of Bioactive Phenolic Constituents from Globe Artichoke (*Cynara scolymus L.*) by HPLC–DAD-ESI-QTOF-MS. *Food Chemistry*. 2013, 141(3), 2269-2277.
25. Alibaş, İ. Sıcak Havayla Kurutulan Enginar Dilimlerinin Kuruma Eğrilerinin Tanımlanmasında Yeni Bir Modelin Geliştirilmesi ve Mevcut Modellerle Kıyaslaması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 2012, 26(1), 49-61.
26. Fratianni, F., Tucci, M., Palma, M.D., Pepe, R, and Nazzaro, F. Polyphenolic Composition in Different Parts of Some Cultivars of Globe Artichoke (*Cynara Cardunculus L. Var. Scolymus(L.) Fiori*). *Food Chemistry*. 2007, 104(3), 1282-1286.
27. Özzambak., E., Uğur, A. Ve Zeybekoğlu, E. Enginar Yetiştiriciliği ve Enginarın Sağlık Açısından Önemi. *Hasad Bitkisel Üretim Tarım Dergisi*. 2006, 2(251).
28. Ekechukwu, O.V. and Norton, B. Review of Solar-Energy Drying Systems II: An Overview of Solar Drying Technology. *Energy Conversion & Management*. 1999, 40(1), 615-655.
29. Evranuz, Ö. Gıda Maddelerinin Kurutulması Sırasında Kuruma Kinetiğini Kontrol Eden Faktörler ve Kalite Üzerine Etkileri. *TÜBİTAK-MAE Beslenme ve Gıda Tek. Araştırma Bölümü, Kocaeli*, 1988, 13(1), 51-58.
30. Hii C. L., Jangam S. V., Ong S.P., and Mujumdar A.J. *Solar Drying: Fundamentals Applications and Innovations*. 2012.
31. Atalay, Ö. Güneş Enerjisi Destekli Nem Almalı Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı ve Termodinamik Analizi. *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli*, 2010. (Doktora Tezi).

32. Iniyana, S., VijayaVenkataRaman, S. and Goic, R. A Review of Solar Drying Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, 16(1), 2652–2670.
33. Mekhelif, S., Saidur, R. and Safari, A. A Review on Solar Energy Use in Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, 15(1), 1777–1790.
34. Mundada, M., Hathan, B.S. and Maske, S. Convective Dehydration Kinetics Of Osmotically Pretreated Pomegranate Arils. *Biosystems Engineering*. 2010, 107(1), 307-316.
35. Bondaruk, J., Markowski, M. and Blaszcak, W. Effect of Drying Conditions on the Quality of Vacuum-Microwave Dried Potato Cubes. *Journal of Food Engineering*. 2007, 81(2), 306-312.
36. Oríkasa, T., Wu, L., Shiina, T. and Tagawa, A. Drying Characteristics Of Kiwifruit During Hot Air Drying. *Journal of Food Engineering*. 2008, 85(2), 303-308.
37. Hiranvarachat, B., Devahastin, S. and Chiewchan, N. Effects of Acid Pretreatments on Some Physicochemical Properties of Carrot Undergoing Hot Air Drying. *Food Bioprod Process*. 2011; 89(1), 116-127.
38. Zhang, Y., Pan, Y.K., Zhao, L.J., Chen, G., Mujumdar, A.S. Osmotic Dehydration Pretreatment in Drying of Fruits and Vegetables. *Drying Technology*. 2003, 21(6), 1101-1114.
39. Donsi, G., Ferrari, G. and Matteo, D.I. Utilization of Combined Processes in Freeze-Drying of Shrimps. *Food and Bioprocess Processing*. 2001, 79(3), 152-159.
40. Kuş, S. Mikrodalga Enerjisiyle Ayva Ve Armut Meyvesinin Kuruma Davranışı ve Modellemesi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2016. (Yüksek Lisans Tezi)
41. Karabacak, A.Ö., Sinir, G.Ö. ve Suna, S. Mikrodalga ve Mikrodalga Destekli Kurutmanın Çeşitli Meyve ve Sebzelerin Kalite Parametreleri Üzerine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 2015, 29(2), 125-135.
42. Luan, D., Tang, J., Pedrow, P.D. and Tang, Z. Analysis of Electric Field Distribution Within a Microwave Assisted Thermal Sterilization (MATS) System by Computer Simulation. *Journal of Food Engineering*. 2016, 188(1), 87-97.
43. Rattanadecho, P. And Makul, N. Microwave-assisted drying: A review of the state of the art. *Drying Technology*. 2016, 34(1), 1-38.
44. Sun, D., Drummond, L., Durance, T.D. and Scaman, C.H. Combined Microwave Vacuum Drying. *Emerging Technologies for Food Processing*. 2013, 23(1), 427-445.
45. Yoğurtçu, H. Mikrodalga Fırında Limon Kurutma: Kinetiği ve Modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2014, 26 (1), 27-33.
46. Çelen, S. Mikrodalga ve Vakum Kurutucuda Bazı Gıda Ürünlerinin Kurutulması ve Modellenmesi. *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Edirne*, 2010, 136 s. (Doktora Tezi).
47. Özsoy, E. Mikrodalga Bantlı Kurutucuda Elma (Gala) Dilimlerinin Kuruma Davranışı. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tekirdağ, 2015, 74 s. (Yüksek Lisans Tezi).
48. Karaaslan, S.N. and Tunçer, İ.K. Development of a Drying Model for Combined Microwave-Fan Assisted Convection Drying of Spinach. *Biosystems Engineering*. 2008, 100(1), 44-52.

49. Seçmeler, Ö. Comparison of Microwave Drying and Microwave Mixed-Bed Drying of Red Peppers. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003. (Yüksek Lisans Tezi).
50. Arda, S.O. Mikrodalga Ve Güneş Enerjisi Kombinasyonlu Kurutucu Kullanılarak Kurutma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tekirdağ, 2017, 38 s. (Yüksek Lisans Tezi).
51. Feng, S., Lu, S., Peng, W., Li, Q., Qi, C., Fen, T. and Jian, S. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with CMFBG filter and saturable absorber. *Optics and Laser Technology*. 2013, 45(1) 32-36.
52. Bircan, C. Bazı Gıda Bileşenlerinin Dielektrik Özelliklerinin Farklı Frekans ve Sıcaklıklarda Belirlenmesi. ADÜ Ziraat Fakültesi, 2006, 3(1), 5-9.
53. Luan, D., Wang, Y., Tang, J. and Jain, D. Frequency Distribution in Domestic Microwave Ovens and Its Influence on Heating Pattern. *Journal Food Science*. 2016, 82(2).
54. Konak, Ü.İ., Certel, M. ve Helhel, S. Gıda sanayisinde Mikrodalga Uygulamaları. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 2009, 4(3), 20-31.
55. Şahin., F.H. Domates Kurutmada Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Ana Bilim Dalı, Tekirdağ, 2010, 154 s. (Doktora Tezi).
56. Karaaslan, S. Meyve ve Sebzelelerin Mikrodalga Destekli Kurutma Sistemleri ile Kurutulması. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi. 2012, 7 (2), 123-129.
57. Sham, P.W.Y., Scaman, C.H. and Durance T.D. Texture of Vacuum Microwave Dehydrated Apple Chips as Affected by Calcium Pretreatment, Vacuum Level, and Apple Variety. *Journal Of Food Science*. 2001, 66(9).
58. Al-Duri, B. and McIntyre, S. Comparison of Drying Kinetics of Foods Using a Fan-Assisted Convection Oven a Microwave Oven and a Combined Microwave/Convection Oven. *Journal of Food Engineering*. 1992, 15(1), 139-155.
59. Maskan, M. Microwave/air and Microwave Finish Drying of Banana. *Journal of Food Engineering*. 2000, 44(2), 71-78.
60. Motevalli, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B. And Darvishi, H. Energy Analyses and Drying Kinetics of Chamomile Leaves in Microwave-Convective Dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2016, 15(1), 179–187.
61. Drouzas, A.E., Tsami, E. and Saravacos, G.D. Microwave/Vacuum Drying Of Model Fruit Gels. *Journal of Food Engineering*. 1999, 39(1), 117-122.
62. Kiranoudis, C., Tsami, E., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D. Drying Kinetics of Some Fruits. *An International Journal*. 1997, 15(5), 1399-1418.
63. Drouzas, A.E. and Schubert, H. Microwave Application in Vacuum Drying of Fruits. *Journal of Food Engineering*. 1996, 28(1), 203-209.
64. Lin, T.M., Durance, T.D. and Scaman C.H. Characterization of Vacuum Microwave Air and Freeze Dried Carrot Slices. *Food Research International*. 1998, 31(2), 111-117.
65. Cui, W.Z., Xu, S.Y. and Sun, D.W. Dehydration of Garlic Slices by Combined Microwave-Vacuum and Air Drying. *Drying Technology An International Journal*. 2003, 21(7), 1173–1184.

66. Arslan, D. And Özcan, M.M. Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in Drying Behavior, Colour and Antioxidant Content. Food and Bioproducts Processing. 2011, 504–513.
67. Soysal, Y. Microwave Drying Characteristics of Parsley. Biosystems Engineering. 2004, 89 (2), 167–173. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.07.008.
68. Mejia-Meza, E., Yanez, J.A., Davies, N.M. and Clary, C. Improving Nutritional Value of Dried Blueberries ( *Vaccinium corymbosum* L. ) Combining Microwave-Vacuum, Hot-Air Drying and Freeze Drying Technologies. International Journal of Food Engineering. 2008, 4(6).
69. Kwok, B.H.L., Hu, C., Durance, T. and Kitts, D.D. Dehydration Techniques Affect Phytochemical Contents and Free Radical Scavenging Activities of Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia* Nutt.). Journal Of Food Science. 2004, 69(3).
70. Wojdyło, A., Teleszko, M. and Oszmiański, J. Antioxidant Property and Storage Stability of Quince Juice Phenolic Compounds. Food Chemistry. 2014, 152(1), 261-270.
71. Wojdyło, A., Figiel, A. and Oszmiański, J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. Journal of Agricultural Food Chemistry. 2009, 57, 1337–1343.
72. İçier, F., H. Yildiz, ve T. Baysal, “Polyphenoloxidase Deactivation Kinetics during Ohmic Heating of Grape Juice”, Journal Food Engineering. 2008, 85, 410-417.
73. Bai, X., Zhang, H. and Ren, S., 2013. Antioxidant activity and HPLC analysis of polyphenol-enriched extracts from industrial apple pomace. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2013, 93(1), 2502-2506.
74. Jaiswal, V., Dermarderosian, A. And Porter, J.R. Anthocyanins and Polyphenol Oxidase From Dried Arils of Pomegranate (*Punica granatum* L.). Food Chemistry. 2010, 118(1), 11-16.
75. Giri, S.K. and Prasad, S. Optimization of Microwave-Vacuum Drying of Button Mushrooms Using Response-Surface Methodology. Drying Technology. 2006, 25(5), 901–911. doi: 10.1080/07373930701370407.
76. Nagvanshi, S., Shrivastava, S.L. and Goswami, T.K. Study of Changes in Shrinkage and Density as a Function of Moisture Content during Microwave Vacuum Drying under Various Operating Conditions. Journal of Food, Nutrition and Population Health.,2017, 1(2), 13.
77. Zarein, M., Samadi, S.H. and Ghobadian, B. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013.
78. Durance, T.D. and Wang, J.H. Energy Consumption, Density, and Rehydration Rate of Vacuum Microwave- and Hot-Air Convection- Dehydrated Tomatoes. Journal of Food Science. 2002, 67(6), 2212 – 2216.
79. Clary, C.D., Wang, S. and Petrucci, V.E. Fixed and Incremental Levels of Microwave Power Application on Drying Grapes Under Vacuum. Journal Food Science. 2005, 70(1), 344-349.
80. Alibaş, İ. Energy Consumption and Colour Characteristics of Nettle Leaves During Microwave, Vacuum and Convective Drying. Biosystems Engineering. 2007, 96(4), 495-502.



81. Knoerzer, K., Regier, M. and Schubert, H. A Computational Model for Calculating Temperature Distributions in Microwave Food Applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2008, 9(3), 374-384.
82. Chandrasekaran, S., Ramanathan, S. and Basak, T. Microwave Food Processing. *Food Research International*. 2013, 52(1), 243–261.
83. Bayraktaroğlu Urun G. Organik Patlıcan ve Kabağın Farklı Kurutma Şartlarında Kuruma Karakteristiklerinin Ve Raf Ömrünün Belirlenmesi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2015, 210 s. (Doktora Tezi).
84. Masatcıoğlu, M.T. Ekstrüzyon Pişirmenin Maillard Reaksiyonu Üzerine Etkileri. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2013, 126 s. (Doktora Tezi).
85. Parin, H. Effect Of Pretreatment and Air Temperature On The Drying Rate, Rehydration Capacity and Color of Artichoke. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2004, 102 p.
86. Karataş, N. Farklı Kurutma Yöntemlerinin Bazı Kayısı Çeşitlerinin Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 2014, 155 s. (Doktora Tezi).
87. Aktaş, M. ve Aktekeli, B. Isı Pompalı Kurutucuda Atık Isı Kullanımının Performansa Etkisi ve Deneysel Analizi. *Tarım Bilimleri Dergisi*. 2015, 21(1), 220-235.
88. Önez, Z. Üzüm ( *Vitis Vinifera L.* ) İzole Edilen Polifenol Oksidaz Enziminin Özelliklerinin Belirlenmesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara, 2006, 87s. (Yüksek Lisans Tezi).
89. Gökkaya, Ö. Beyaz Kiraz Meyvesi (Starks Gold) Polifenol Oksidaz Enziminin Karakterizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji Anabilim Dalı, Adana, 2009, 39 s. (Yüksek Lisans Tezi).
90. Cerrahoğlu, E. ve Arabacı, G. Eflatun Çiçekli Ballıbaba ( *Lamium Purpureum* ) Polifenol Oksidaz Enziminin Karakterizasyonu ve İnhibisyonu. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*. 2016, 20(2), 245-250.
91. Arısoy, İ. Vişne ve Kirazın Kuruması Sırasında Büzülmenin İncelenmesi. Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 2010, 89s. (Yüksek Lisans Tezi).
92. Williamson G., Carughi A. Polyphenol Content And Health Benefits Of Raisins. *Nutrition Research*. 2010, 30(1), 511 – 519.
93. Malafrente, L., Lamberti, G., Barba, A.A. and Ahrne, L.M. et al., Combined convective and microwave assisted drying: Experiments and modeling. *Journal of Food Engineering*. 2012, 112(4), 304-312.
94. AOAC, 2005. Metot No:934.06 Moisture in Dried Fruits.
95. Keçebaş, T. Farklı Haşlama Uygulamalar İle Saklamanın Kurutulmuş Brokkolinin Renk Ve Antioksidan Aktivitesi Üzerine Etkileri. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007. (Yüksek Lisans Tezi)
96. Konuk, D. Ve Korel, F. Kurutma Sıcaklığının Üzüm Çekirdeklerinin Toplam Fenolik Madde İçeriği Ve Antioksidan Kapasitesi Üzerine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2015, 21(9), 404-407.
97. İzli, N. Ve Polat, A. Dondurarak Kurutma Yönteminin Zencefilin Kurutma Karakteristikleri, Renk, Mikroyapı ve Rehidrasyon Özellikleri Üzerine Etkisi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 2016, 33(Ek sayı), 126-136.

98. Yemencioğlu, A. ve Cemeröğlu B. Hale Haven Şeftalilerinde Polifenol Oksidaz Enzimlerinin Bazı Nitelikleri. A.Ü. Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tr. J. of Agriculture and Forestr, Ankara, 1998, 261-265 s.
99. Moreno, J., Simpson, R., Pizarro, N. And Bugueno, G. Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv. Granny Smith). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2013, 20(1), 198–207.
100. Darvishi, H., Asl, A.R., Asghari, A., Najafi, G. and Gazori, H.A. Mathematical Modeling, Moisture Diffusion, Energy Consumption and Efficiency of Thin Layer Drying of Potato Slices. *Food Processing & Technology*, 2013, 4(3).
101. Funebo, T. and Ohlson, T. Dielectric Properties of Fruits and Vegetables as a Function of Temperature and Moisture Content Dielectric Properties of Fruits and Vegetables as a Function of Temperature and Moisture Content. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 1999, 34(1), 1999.
102. Guida, V., Ferrari, G., Pataro, G., Chambery, A., Maro, A.D. and Parente, A. Effects of Ohmic and Conventional Blanching on the Nutritional, Bioactive Compounds and Quality Parameters of Artichoke Heads. *Lwt- Food Science and Technology*. 2013, 569-579.
103. Mrad, N.D., Boudhrioua, N., Kechaou, N., Courtois, F. and Bonazzi, C. Influence of Air Drying Temperature on Kinetics, Physicochemical Properties, Total Phenolic Content and Ascorbic Acid of Pears. *Food and Bioproducts Processing*. 2012, 90(3), 433-441.
104. Nicolas, J., Richard-Forget, F.C., Goupy, P.M., Amiot, M.J. and Aubert, S.Y. Enzymatic Browning Reactions in Apple and Apple Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1994, 34(1) 109-157.
105. Michalczyk, M. Macura, R. and Matuszak, I. The Effect of Air-Drying, Freezedrying and Storage on the Quality and Antioxidant Activity of Some Selected Berries. *Journal Food Process, Preserv.* 2009, 33(1), 11-21.
106. de Ancos, B., Ibañez, E., Reglero, G. and Cano, M.P. Frozen Storage Effects on Anthocyanins and Volatile Compounds of Raspberry Fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2000, 48(1), 873-879.
107. Bai, J., Sun, D., Xiao, H., Mujumdar, A.S., Gao, Z. Novel High-Humidity Hot Air Impingement Blanching (HHAIB) Pretreatment Enhances Drying Kinetics and Color Attributes of Seedless Grapes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2013, 20(1), 230–237.

## EKLER

### EK A. Taze ve Farklı İşlem Koşullarında Kurutulan Enginarlar



Şekil 1. Taze ve -526 mm-Hg 800 W'da kurutulduktan sonra enginar



Şekil 2. Taze ve -526 mm-Hg 450 W'da kurutulduktan sonra enginar



**Şekil 3. Taze ve -667 mm-Hg 800 W'da kurutulduktan sonra enginar**



**Şekil 4. Taze ve -667 mm-Hg 450 W'da kurutulduktan sonra enginar**



**Şekil 5. -667 mm-Hg 800 W'da kurutulmuş ve rehidre edilmiş enginar**

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çiğdem MUŞTU

Doğum Yeri ve Yılı : Bakırköy, 1994

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : cigdemmustu\_94@hotmail.com

### Eğitim Durumu

Lise: Füsun Yönder Lisesi

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü

Lisans: Anadolu Üniversitesi, İşletme Bölümü

Yüksek Lisans: Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü

### Yayımları

Muştu, Ç., Eren, İ. Malaksasyon İşleminde Yeni Teknolojiler Ve Zeytinyağı Kalitesi Üzerine Etkisi. 10. Gıda Mühendisliği Kongresi, 9-11 Kasım 2017, Antalya.