

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YUMURTA PASTÖRİZASYONU İÇİN DİELEKTRİK UYGULAMALARIN
(RADYOFREKANS VE MİKRODALGA) PROSES ETKİNLİĞİ AÇISINDAN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Özge KESKİNEL

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YUMURTA PASTÖRİZASYONU İÇİN DİELEKTRİK UYGULAMALARIN (RADYOFREKANS VE MİKRODALGA) PROSES ETKİNLİĞİ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Özge KESKİNEL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Bu çalışmada, kabuklu bütün yumurtaların pastörizasyonu için kullanılma potansiyeli olan mikrodalga ve radyofrekans uygulamaların ürün sıcaklık değişimine etkisi belirlenmiş ve bu iki yöntemin prosese olan etkisi ürün sıcaklık dağılımı ve sıcaklık artışı kapsamında karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle çoklu fizik (ürün içerisinde uygulama sırasında meydana gelen elektromanyetik dağılım ve ürün içerisinde oluşan ısı ve momentum transferi) temeline dayalı olarak matematiksel model geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen modeller deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık verileri kullanılarak doğrulanmış ve farklı mikrodalga ve radya frekans proses koşullarında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, mikrodalga ve radyo frekans uygulamalarda yumurta içerisinde tekdüze sıcaklık dağılımının sağlanabilmesi amacıyla tasarım ve optimizasyon çalışmalarının endüstriyel uygulamaya hitap edecek şekilde gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ağustos 2021, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga, radyofrekans, dielektrik özellikler, yumurta, pastörizasyon

ABSTRACT

Master Thesis

COMPARISON OF DIELECTRIC APPLICATIONS (RADIOFREQUENCY AND MICROWAVE) FOR WHOLE EGG PASTORIZATION IN TERMS OF PROCESS EFFICIENCY

Özge KESKİNEL

Ankara University
Institute of Science and Technology
Department of Food Engineering

Supervisor: Prof. Dr Ferruh ERDOĞDU

In this study, effects of microwave and radio frequency processing, with their potential, on the pasteurization of the whole shell eggs were investigated in the view of temperature increase and temperature distribution during the process. With this concept, multi-physics mathematical models were developed to determine the electromagnetic field distribution and the evolved heat and momentum transfer in the products. These models were then validated using the experimental data obtained at various microwave and radio frequency processing conditions. Following the model validation, simulation studies to describe the improving effects of the microwave and radio frequency processing were carried out. As a result, it was concluded that further design and optimization studies are required to better determine the processing effects on the temperature distribution of the eggs.

August 2021, 77 pages

Key Words: Microwave, Radiofrequency, Dielectric properties, Egg, Pasteurization

TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğum tez çalışmasında yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve destek olan sayın tez danışmanım Prof. Dr. Ferruh Erdoğan'a

Her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili ailem Nermin Keskinel, Mustafa Keskinel, Onur Keskinel ve Deniz Niğdelioğlu'na

Çalışmalarım sırasında bana destek olan değerli ekip arkadaşlarım Hüseyin Topçam, Ozan Karataş, Ozan Altın, Büşra Erol, Eda Coşkun, Ezgi Son'a

Bu yolda benimle beraber omuz omuza yürüyen sevgili arkadaşım M. Müge Yılmaz'a

Yüksek lisans yapmam için beni teşvik eden ve her zaman yanımda olan çok değerli dostlarım Gülsüm Aydın ,Elif Sümer ve Zeynep Sümer'e

Teşekkür'ü bir borç bilirim.

Özge KESKİNEL
Ankara, Ağustos 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
2.1 Yumurta Pastörizasyonu İçin Literatürde Uygulanan İşlemler.....	7
2.2 İnovatif Yöntemler Kullanılarak Yumurta Pastörizasyonu İçin Literatürde Yapılmış Çalışmalar	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1 Deneysel Çalışmalar.....	26
3.1.1 Mikrodalga uygulama amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar	26
3.1.2 Radyofrekans uygulama amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar	27
3.1.3 Matematiksel model çalışmaları için yumurta geometrisinin hazırlanması ..	29
3.2 Matematiksel Modelleme Çalışmaları	30
3.2.1 Mikrodalga ve radyo frekans sistem geometrisi	31
3.2.2 Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan denklikler	35
3.2.3 Başlangıç ve sınır koşulları.....	37
3.2.4 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan çözümleyiciler.....	38
3.2.5 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan termofiziksel özellikler	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
4.1 Mikrodalga Uygulama Sonuçları	42
4.1.1 Mikrodalga uygulama için matematiksel model sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması	42
4.1.2 Mikrodalga uygulama için farklı güç uygulamalarının ürün sıcaklık değişimine etkisi	50
4.2 Radyo Frekans Uygulama Sonuçları.....	53
4.2.1 Radyo frekans uygulama için matematiksel model sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması	53

4.2.2 Radyo frekans uygulama için farklı potansiyel ve yumurta diziliş	
uygulamalarının ürün sıcaklık değişimine etkisi	62
5. SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	77



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

c	Işık hızı (2999792458 m/s)
cm	Santimetre
c_p	Özgül ısı (J/kg.K)
D	d-değeri (dk)
dk	Dakika
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
e	Sabit sayı (2.718218..)
f	Frekans
g	Gram
GHz	Giga Hertz
h	Isı transferi katsayısı ($W/m^2-^{\circ}C$)
h_s	Kabuk kalınlığı (cm)
J	Joule
K	Kelvin
k	Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m-^{\circ}C$)
kg	Kilogram
kGy	Kilogray
m	Kütle (kg)
mL	Mililitre
mm	Milimetre
MHz	Mega Hertz
P_0	Mikrodalga gücü (W)
Q	Isı (J)
r	Yumurta sarısı yarıçapı (cm)
s	Saniye
S_{max}	Maksimum ağ boyutu
T	Sıcaklık($^{\circ}C$)
T_{ref}	Referans sıcaklık(K)
V	Potansiyel fark (Volt)

W	Watt
Z	z-değeri (°C)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
ϵ_0	Boşluğun geçirgenlik değeri (8.854×10^{-12} F/m)
ϵ_r	Permittivite
μ	Dinamik vizkozite
μ'	Bağıl geçirgenlik
μ_0	Boşluktaki manyetik geçirgenlik
μ_r	Manyetik geçirgenlik
ΔT	Sıcaklık farkı (°C)
°C	Derece Celcius
α	Isıl yayınma katsayısı (m ² /s)
ϵ'	Dielektrik Sabiti
ϵ''	Dielektrik Kayıp faktörü
f	Frekans (Hz)
j	$\sqrt{-1}$
π	Sabit sayı (3.14..)
λ	Dalga boyu
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ω	Frekans

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CSPI	Center for Science in the Public Interest
FDA	Food and Drug Administration
GHz	Gigahertz
kob	Koloni oluşturan birim
MHz	Megahertz
MW	Microwave

RF	Radiofrequency
HDL	High-density lipoproteins
LDL	Low-density lipoproteins



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	<i>Salmonella</i> kaynaklı hastalık ve salgınlara sebebiyet veren gıdaların yüzdesel olarak dağılımı	2
Şekil 2.1	Dielektrik Özelliklerin Değişen Frekanslarda Değişimi.....	11
Şekil 2.2	Beher içerisinde yumurta akı (a) ve sarısının (b) farklı mikrodalga güç seviyelerinde ısınma eğrileri	15
Şekil 2.3	Kabuk içerisinde yumurta akı (a) ve sarısının (b) farklı mikrodalga güç seviyelerinde ısınma eğrileri).....	15
Şekil 2.4	Simülasyon ve deneysel çalışmalarda pıhtılaşma halkalarının görünümü (Lau vd. 2016)	18
Şekil 2.5	Mikrodalga (a) ve Radyo frekans (b) ısıtma sistemlerinin şematik görünümü (Marra vd. 2009).....	21
Şekil 3.1	Mikrodalga sistemde çözündürme döngüsü uygulamasında elde edilen güç değişimi.....	26
Şekil 3.2	Deneysel çalışmalarda kullanılan ev tipi LG MS2022D model mikrodalga sistem ve kullanılan deneysel sistem.....	27
Şekil 3.3	Deneysel çalışmalarda kullanılan radyo frekans sistem.....	28
Şekil 3.4	Proses sonrası kaynatılıp kumpas yardımıyla fiziksel (sarı ve beyaz için) boyutların belirlenmesi.....	30
Şekil 3.5	Deneysel çalışmada kullanılan mikrodalga sistem modeli.....	31
Şekil 3.6	Deneysel çalışmada kullanılan radyo frekans fırının sistem modeli.....	32
Şekil 3.7	Mikrodalga uygulamada kullanılan ağ yapısı.....	34
Şekil 3.8	Radyo frekans sistem için kullanılan ağ yapısı.....	35
Şekil 4.1	Mikrodalga uygulamada çözündürme güç döngüsü deneysel çalışmalarında kullanılan yumurtaların boyutları.....	43
Şekil 4.2	Matematiksel model ve (mikrodalga çözündürme döngüsünde elde edilen) deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.3	Yumurta içi (xy ve zx orta kesitlerinde) sıcaklık dağılımının proses süresine bağlı olarak değişimi	46
Şekil 4.4	(a)Yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi (Deney-3).....	47
Şekil 4.5	Mikrodalga sistem ve yumurta içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı (V/m, xy kesiti, yumurta tepe noktasından 3.7 cm alt noktada – Deney-3)	48
Şekil 4.6	Yumurta içi (xy ve zx orta kesitlerinde) sıcaklık dağılımı ve doğal konveksiyonla ısı transferine bağlı olarak oluşan hız profili (a)99s, (b)106s (Deney-3)	49
Şekil 4.7	(a)350 W ve (b) 70 W güç değerinde kullanılan güç döngüleri.....	50
Şekil 4.8	350 W güç döngüsü uygulanması durumunda (a) yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi.....	51

Şekil 4.9	70 W güç döngüsü uygulanması durumunda (a) yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi.....	53
Şekil 4.10	Radyo frekans uygulama sonucunda tek yumurta kullanılarak elde edilen deney sonuçlarının matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.11	Radyo frekans sistem zx kesiti ve yumurta içerisinde oluşan elektrik potansiyel dağılımı (V – Deney-3).....	56
Şekil 4.12	Yumurta içi (zx orta kesitinde) sıcaklık dağılımı ve yumurta beyazında doğal konveksiyonla ısı transferine bağlı olarak oluşan hız profili (a) 3000 s, (b) 5100 s (Deney-2).....	57
Şekil 4.13	Radyo frekans uygulama sırasında (a) yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi (Deney-2).....	58
Şekil 4.14	Radyo frekans uygulama sırasında 6 yumurta kullanılan deneyde yumurtaların sistem içerisinde dizilişi.....	59
Şekil 4.15	Radyo frekans uygulama sonucunda altı yumurta kullanılarak elde edilen deney sonuçlarının, Şekil 4.14’de verilen dizilişe göre (a) Yumurta-24, (b) Yumurta-25 için matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.16	Altı yumurtalı dizilişte radyo frekans uygulama sırasında prosesin 7200. s’de elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı.....	61
Şekil 4.17	Yumurta örneklerinin xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı.....	61
Şekil 4.18	7000 V potansiyel uygulama ve farklı dizilimde planlanan yumurtaların orta kesiti (xy düzleminde) sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi.....	63
Şekil 4.19	7000 V potansiyel ve farklı dizilim uygulaması sonucunda elde edilen, yumurtaların hacimsel sıcaklık ortalama değişimi.....	64
Şekil 4.20	7000 V potansiyel ve farklı dizilim uygulaması sonucunda sistem xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı.....	64
Şekil 4.21	Yumurtaların yatay (90°C) döndürülmüş dizilimleri ve alt dörtgen elektrotta göre oryantasyonları.....	66
Şekil 4.22	7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde planlanan yumurtaların orta kesiti (xy düzleminde) sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi.....	67
Şekil 4.23	7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde planlanan yumurtaların hacimsel sıcaklık ortalama değişimi.....	68
Şekil 4.24	7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde sistem xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

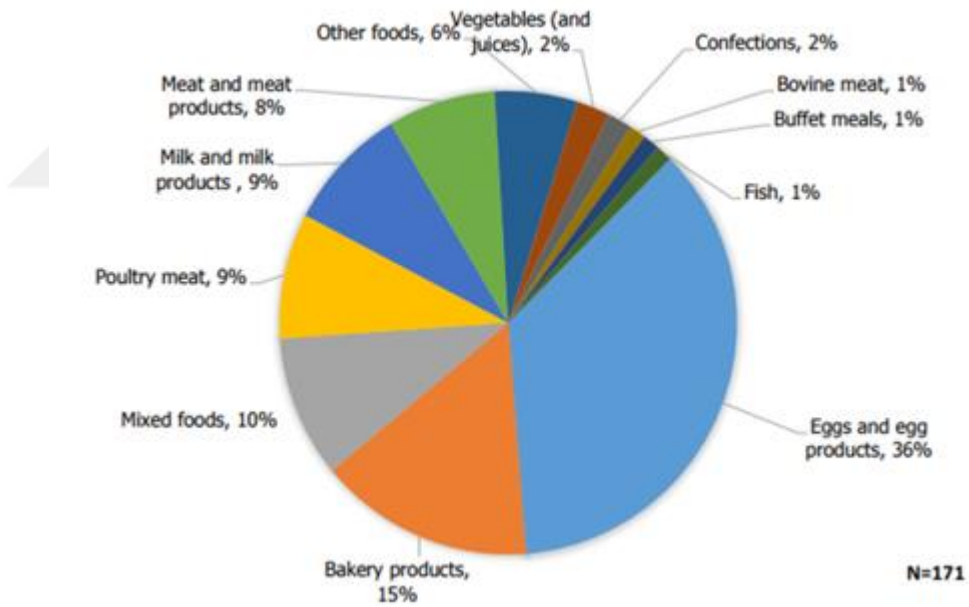
Çizelge 1.1	Türk Gıda Kodeksi Yumurta ve Yumurta Ürünleri Tebliği (2008), Yumurta Ürünleri İçin Mikrobiyolojik Kriterler.....	4
Çizelge 3.1	Mikrodalga ve radyo frekans ısıtım işlem çalışmalarında kullanılan yumurtaların fiziksel boyutları.....	25
Çizelge 3.2	Matematiksel model çalışmalarında mikrodalga ve radyo frekans sistemlerde kullanılan ağ yapısı özellikleri	33
Çizelge 3.3	Mikrodalga uygulamada kullanılan yumurta içeriği (yumurta beyazı, sarısı ve kabuğu)'nin 2450 MHz frekanstaki dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi	39
Çizelge 3.4	Radyo frekans uygulamada kullanılan yumurta içeriği (yumurta beyazı, sarısı ve kabuğu)'nin 27.12 MHz frekanstaki dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi	40
Çizelge 3.5	Yumurta içeriği (yumurta beyazı, sarısı ve kabuğu)'nin ısıtım iletkenlik, ısı kapasitesi ve elektriksel iletkenlik değerleri.....	40
Çizelge 3.6	Yumurta beyazı yoğunluk ve (görünür) viskozite değerleri ile yumurta sarısı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi	40
Çizelge 3.7	Yumurta sarısı viskozitesinin sıcaklık ve kesme hızının bir fonksiyonu olarak hesaplanması için gerekli parametreler.....	41

1. GİRİŞ

Yumurta; besleyici değeri yüksek, ucuz, kolayca pişirilip tüketilebilen ve içerdiği A, D, E, B grubu vitaminler ile proteinler bakımından besleyici değeri yüksek bir gıdadır. Tek başına tüketildiği gibi, pek çok ürünün işlenmesi sırasında, emülgatör, nem tutucu, kabartıcı, renklendirici, aroma verici ve kalınlaştırıcı özellikleri ile de katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu olumlu özelliklerine karşın yumurtaya üretimi ve farklı proseslerde kullanımı sırasında mikroorganizmaların bulaşması kaçınılmazdır. Sağlıklı kümes hayvanlarından elde edilen yumurtaların içi steril kabul edilse de yumurta kabuğunda *Salmonella* Enteritidis başta olmak üzere farklı patojen mikroorganizmalar bulunabilmektedir (*Campylobacter jejuni*, *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica*, *Aeromonas hydrophila*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* ve *Staphylococcus aureus*). Yumurta içerisine mikroorganizmaların girişi yumurtanın yumurtlandığı andan tüketiciye ulaşana kadar geçen sürede gerçekleşmektedir. Yumurta kabuğu, doğal yapısına bağlı olarak, bir bariyer görevi görmesine rağmen mikroorganizmalar kabuk üzerindeki gözeneklerden yumurta içerisine uygun sıcaklık ve nem koşullarının da etkisiyle geçebilmektedirler (Theron vd. 2003). Bu nedenle, kabuk yüzeyinde bulunan mikroorganizmaların çok düşük düzeyde bulunması bile riskli olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, tavukların yumurtalıklarında yumurta oluşum aşamasında olabilen enfeksiyonlara bağlı olarak da *Salmonella* Enteritidis gibi mikroorganizmalar yumurta içerisinde bulunabilmektedir.

Gıda kaynaklı enfeksiyonlara neden olan mikroorganizmalar arasında *Salmonella* ilk sıralardaki yerini korumakta, binlerce kişinin etkilendiği ve ölümlerle sonuçlanan salgınlara neden olmaktadır. Dünyada her yıl, 155000'i ölümle sonuçlanan yaklaşık 94 milyon *Salmonella* gastroenterit vakası görülmekte, bu vakaların %85'inin gıda kaynaklı olduğu ve en yaygın kaynağın da yumurta ve yumurtacılık ürünleri olduğu bildirilmektedir (Oktay vd. 2006). AB ülkelerinde her yıl 100 binden fazla kişide *Salmonella* vakasının tespit edildiği ve 3 milyar € gibi büyük bir ekonomik kayba neden olduğu da rapor edilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, bu mikroorganizmaların gelişiminin önlenmesi/inaktive edilmesi gıda güvenliği kapsamında çok önemlidir.

EFSA (European Food Safety Authority)'nın 12 Aralık 2017'de yayınladığı rapora göre araştırmalara bağlı olarak ortaya çıkan *Salmonella* kaynaklı hastalık ve salgınlara diğer gıda ürünlerine nazaran yumurta ve yumurta ürünlerinin büyük bir oranda sebebiyet verdiği gözler önüne serilmiştir. ABD'de 2010 yılında yaşanan salgında *Salmonella* Enteritidis suşunun yumurtalardan bulaştığının anlaşılması üzerine sağlık yetkilileri yaklaşık 550 milyon yumurtayı raflardan geri toplatmış ve söz konusu yumurtalarda normalin 4 katı oranda *Salmonella* teşhis edilmiştir. Bu süreçte 270'den fazla kişi *Salmonella* teşhisi ile tedavi altına alınmış ve bu olay son 20 yılın en büyük salgını olarak kayıtlara geçmiştir. Yine ABD'de 2015 yılında yaşanan salgında *Salmonella* orienburg serotipi yumurta kabuklarında kendini göstermiş; bunun üzerine şirket dağıtılan tüm eyaletlerdeki yumurtalarını geri çağırıştır. Bir yıldan kısa bir süre içerisinde aynı şirkette ikinci vaka meydana gelmiş ve bu süreçte 6 eyalette 52 kişi *Salmonella* orienburg ile enfekte olmuştur (Anonymous, 2019)



Şekil 1.1 *Salmonella* kaynaklı hastalık ve salgınlara sebebiyet veren gıdaların yüzdesel olarak dağılımı (EFSA/12 Aralık 2017) (Anonymous, 2019)

Mikrobiyal problemlerin dışında, geçtiğimiz aylarda tavuklardaki bit, pire ve keneleri yok etmek için kullanılan fipronil maddesinin bulaşması skandalı ile başta Almanya, Hollanda, Fransa ve Belçika olmak üzere Avrupa ülkelerinde baş gösteren yumurta krizi

ülkelerin satışa sunulan yumurtaları raflardan geri çekmesiyle son bulmuş ancak bu bir çözüm getirmemiştir.

Meydana gelen bu salgın ve problemler, tüketicinin yumurta tüketiminde daha hijyenik olarak kabul edilebilecek ürünlere yönelmesine sebep olmakta ve sorunun önemi araştırmacıları bu kapsamda yeni ve güvenilir yöntemler geliştirmeye zorlamaktadır. Pastörizasyon ve sterilizasyon uygulamaları mikroorganizma faaliyetlerini inhibe ederek gıdanın mikrobiyel yükünün azaltılması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla uygulanan ısı işlemlerdir (Chandrasekaran 2013). Bu kapsamda, etkin patojenik mikroorganizma inaktivasyonu sağlayabilmek için gıda ürünü belirli bir süre boyunca belirli bir sıcaklığa maruz bırakılmaktadır. Bu süreçte konvansiyonel olarak uygulanan ısı işlemlerde ürün renk, lezzet ve besleyici değerinde değişimler olmaktadır. Ancak inovatif yöntemlerin uygulanması ile ürün renk, lezzet ve besleyici değerinde meydana gelen değişimler en aza indirilebilmektedir. İnovatif yöntemler arasında ısı işlem olarak radyofrekans, mikrodalga, kızıl ötesi ve ohmik ısıtma uygulamaları ve ısı olmayan işlemler olarak yüksek hidrostatik basınç, mor ötesi uygulaması, vurgulu elektrik alan, yüksek yoğunluklu ultrason, iyonize radyasyon ve titreşimli manyetik alan uygulamaları kullanılabilmektedir.

Gıda endüstrisinde sıvı yumurta pastörizasyonu için ülkelere göre değişen yasal düzenlemeleri mevcuttur. Örneğin; Amerika’da 60 °C/3.5 dk., İngiltere’de 64,4 °C/2.5 dk. veya 70 °C/1.5 dk sıcaklık zaman kombinasyonları kullanılırken; Türkiye’de 2008 yılında “Yumurta ve Yumurta Ürünleri Tebliği”nde 63 °C/3 dk. veya 72 °C/15 s olarak belirtilen pastörizasyon sıcaklığı ve zamanı konusundaki kısıtlama kaldırılarak üretim teknolojisine uygun yeterli sıcaklık zaman kombinasyonları geliştirme çalışmaları yapılmıştır (Uygun Sarıbay vd. 2012). 2008 yılında Türk Gıda Kodeksi- Mikrobiyolojik Kriterler Tebliği’nde yumurta ve yumurta ürünlerinin tüketici sağlığını tehdit etmeyecek mikrobiyolojik özelliklerinin belirtilen koşullara uygun olması gerektiği belirtilmiştir.

Çizelge 1.1 Türk Gıda Kodeksi Yumurta ve Yumurta Ürünleri Tebliği (2008), Yumurta Ürünleri İçin Mikrobiyolojik Kriterler

	n	c	m	M
<i>Salmonella</i>	5	0	25 gramda bulunmamalıdır.	
<i>Enterobacteriaceae</i>	5	2	10 kob/g - mL	1×10^2 kob /g - mL

n : Numune sayısı

c : Mikroorganizma sayısı “m” ile “M” arasında bulunabilecek maksimum numune sayısı

m : Tüm numunelerde bulunabilecek maksimum mikroorganizma sayısı

M : “c” sayıda numunede bulunabilecek maksimum mikroorganizma sayısı

Bütün yumurta da halen pastörizasyon amacıyla uygulanan sıcak suya daldırma (Geveke vd. 2016) ve mikrodalga uygulama ABD ve Güney Afrika’da uygulanmaktadır. Sıcak suya daldırma yöntemi geleneksel olarak uygulanan ve konveksiyon – kondüksiyonla gerçekleşen bir ısı işlem uygulaması örneği olarak uygulanırken mikrodalga uygulama hacimsel ısınmayı mümkün kılması ve atık su dezavantajı olmaması gibi avantajları ile öne çıkmaktadır. Sıcak su uygulamasında yumurtalar belli sıcaklıktaki suda belli süre tutulmaktadır. Daha sonra oda sıcaklığına soğutulan yumurtalar mumlandıktan sonra kurutularak paketlenmekte ve satışa sunulmaktadır. Süre ve sıcaklık uygulaması yumurta boyutuna göre değişebilen bu yöntem halen ABD’de Safe Eggs (<http://www.safeeggs.com/>) firması tarafından uygulanmaktadır. Sıcak su uygulaması ile yumurtaların pastörizasyonu kapsamında, Rose vd. (2002) yaptıkları bir çalışmada *Salmonella Enteritidis* aşılınmış yumurtalarda 30 dk - 57 °C sıcak su uygulaması yapılmıştır. İşlem sonunda yapılan mikrobiyolojik analizde SE üzerinde 5 log kob/g azalma sağlanmıştır. Sanayide de uygulaması olan bu yöntemin dezavantajları sıcak su uygulaması ile birlikte kütikül tabakanın yapıdan uzaklaşması dolayısıyla depolama süresince yaşanan kalite kayıpları ve işlem sonunda büyük miktarlarda atık su problemi olarak belirtilmektedir. Bu işlemde ısı iletimi ile pastörizasyon sıcaklığına 30-45 dakikada ulaşılırken, mikrodalga uygulaması ile sadece 3-5 dakikada ulaşılabilir. Bu kısa süreli ısıtma uygulamasından sonra ürünün rengi ve tat-aroması değişmemiş olarak kalmaktadır (Konak vd. 2009). Lakins vd. (2009) yumurta kabuğundaki *Salmonella Enteritidis* üzerine 20 s mikrodalga uygulamasının 2 log kob/g azalma sağladığını ve kalite kayıplarının olmadığını belirtmişlerdir. Patentli uygulaması olan bu işlem için homojen sıcaklık dağılımının

kontrolünün zor olması ve başlangıç ekipman maliyetinin fazla olması farklı dezavantajlar olarak belirtilmektedir.

Mikrodalga uygulamaya benzer olarak radyo frekans uygulama da, son yıllarda öne çıkan ve pastörizasyon uygulamasında potansiyeli olan bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Elektromanyetik spektrumda radyo frekans bant aralığı 1-300 MHz iken mikrodalga bant aralığı ise 300 MHz -300 GHz arasındadır. Radyo frekans bölgede dalga boyunun daha uzun (ve frekansının düşük) olmasından dolayı penetrasyon derinliğinin daha fazla ve uygulanan gücün düşük olması nedeniyle ortaya çıkan durumlar mikrodalga bölgede geçerli değildir (Marra vd. 2007). Ancak, mikrodalga uygulamada da, uygulama frekansının radyo frekans uygulama frekansına göre yüksek olmasından dolayı ürün içerisinde ısı oluşumu daha fazla olmaktadır. Bu yöntemlerin kullanılmasıyla etkin ve hijyenik bir pastörizasyon sağlanabilmektedir. Üründe meydana gelen sıcaklık değişimlerinin ve sistem içinde oluşan elektromanyetik dağılımının bilinmesi mikrodalga ya da radyo frekans sisteminin tasarımı için gerekli parametrelerdir. Özellikle ürün yüzeyinde sıcaklığın aşırı yükselmesine bağlı olarak ortaya çıkabilecek yanma problemlerinin giderilmesi için ürün geometrisi ve sistem konfigürasyonunun da ürün sıcaklık değişimine etkisi belirlenmelidir. Mikrodalga veya radyo frekans uygulama için uygulanan frekans değerleri sırasıyla radyo frekans endüstriyel uygulama için 27.12 MHz iken mikrodalga endüstriyel uygulama için ise 950 MHz ve ev tipi fırınlarda 2450 MHz'dir. Bu frekans değerlerinde mikrodalga ve

radyo frekans uygulama dalga boyu ise $\left(\lambda = \frac{c}{f} \right)$; c-vakumdaki ışık hızı, ve λ -dalga boyu)

denklemleri kullanılarak Radyo frekans için $\left(\lambda = \frac{2.9979 \times 10^8}{27.12 \times 10^6} = 11.05 m \right)$ ve mikrodalga için

$$\left(\lambda = \frac{2.9979 \times 10^8}{950 \times 10^6} = 0.3156 m \text{ ve } \lambda = \frac{2.9979 \times 10^8}{2450 \times 10^6} = 0.1224 m \right)$$

olarak belirlenebilir. Bu veriler doğrultusunda, mikrodalga uygulamada - daha kısa dalga boyuna bağlı olarak ürün içerisindeki penetrasyon derinliğinin daha kısa ve ısı oluşumunun düzensiz olması beklenirken; radyo frekans uygulamada daha düşük frekansa bağlı olarak daha düşük fakat uzun dalga boyundan dolayı da mikrodalga uygulamaya göre daha fazla homojen bir ısı oluşumu ortaya çıkacaktır. Bu durum

pastörizasyon uygulama alanı olan bu iki yöntemin avantaj ve dezavantajlarını gözler önüne sermektedir. Bundan dolayı ürünün dielektrik özellikleri, ürünün geometrisi ve pastörizasyon sisteminin geometrik konfigürasyonu da ürün içi ısı oluşumu ve sıcaklık dağılımına etki eden tasarım kriterleridir.

Bu kapsamda bu çalışmanın amacı, mikrodalga ve radyo frekans uygulama işlemlerinin bütün yumurta pastörizasyonu açısından karşılaştırmaktır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Yumurta Pastörizasyonu İçin Literatürde Uygulanan İşlemler

Yumurta ve yumurta ürünlerinin pastörizasyonunda amaç insan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek potansiyel patojen mikroorganizma tehlikesini azaltmak ve ürünlerin fiziksel ve fonksiyonel özelliklerini korumaktır (Stadelman ve Cotteril 1986).

Embriyoyu korumak için ana canlı tarafından oluşturulan bir kabuk ile etrafı sarılan yumurta genellikle steril olmasına rağmen, yukarıda da belirtildiği gibi mikrobiyel bulaşıya maruz kalabilir ve insan sağlığı için risk teşkil edebilir (Erol 1994). Yumurta ve yumurta ürünlerinin dikkatli kullanımı ve çeşitli işlemlerle pastörizasyona tabi tutulması *Salmonella* tehlikesi içermediğini garanti eder. Pastörizasyon, yumurtanın besleyici değerinde, aromasında veya renginde önemli bir değişikliğe neden olmazken fonksiyonel özellikleri (köpürme, kalınlaşma, bağlanma ve emülsifiye olma) ısıtma ile değişikliğe uğrayabilir. *Salmonella*'ları yok etmek için gereken minimum ısı bu nedenle yumurta ürünlerinin kalite özelliklerinde bir değişime sebebiyet vermeden pastörizasyon işleminde kullanılır (Froning vd. 2002).

Stadelman ve Cotteril (1986) çalışmalarında, gıda tedarikinde kabuklu yumurtaların küçük bir yüzdesinde *Salmonella Enteritidis* ile kontamine olabilmek tehlikesini elimine etmek için yumurtaları kabuklarıyla beraber pastörize eden yöntemler geliştirilmiştir. Yumurtaların fonksiyonel veya görsel kalitesinde önemli bir değişiklik olmaksızın aşılانmış yumurtalarda *Salmonella Enteritidis*'te 7 log'a kadar azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Hou 1996'da yapay olarak aşılانmış sağlam kabuklu yumurtalarda *Salmonella Enteritidis*'in yok edilmesi için pastörizasyonun fizibilitesi araştırmıştır. Bozulmamış kabuklu yumurtaların farklı koşullarda pastörizasyonu için su banyosu ve sıcak hava fırınları ayrı ayrı veya kombinasyon halinde kullanılmıştır. 57°C'lik bir sirkülasyonlu su banyosunda 25 dakika pastörize edilen yumurtalarda, *Salmonella Enteritidis*'te yaklaşık 3 log azalma sağlarken, 55°C'de 180 dakika boyunca sıcak hava fırınında ısıtma ile *Salmonella Enteritidis* 5 log azalma sağlamıştır. İki yöntemin bir

kombinasyonu (25 dakika boyunca 57°C'de su banyosu ısıtması ardından 60 dakika boyunca 55°C'de sıcak havayla ısıtma) kabuklu yumurtalarda *Salmonella Enteritidis*'te 7 log azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bu işlemin, güvenli, pastörize kabuklu yumurtalar üretmek için kullanılabilir olduğu doğrulanmış olsa da uzun işlem süresi tercih edilebilirliğini büyük oranda azaltmıştır.

Kabuklu yumurta pastörizasyonunda sıcak hava işlemi Cevoli vd. (2010) tarafından da araştırılmıştır. Sıcak hava işlemi, 70°C'den daha yüksek bir dış kabuk yüzey sıcaklığı ve 55°C'den daha düşük bir merkez sıcaklığı ile sonuçlanmıştır. Yumurta sarısında maksimum 1.9 log *Salmonella Enteritidis* azalması gözlemlenmiştir (Cevoli vd. 2010). *Salmonella Enteritidis*'in kabuklu yumurtalarda sıcak hava ile inaktivasyonu, FDA'nın 5 log'luk bir azalmaya yönelik pastörizasyon gereksinimi göz önüne alındığında yeterli olmadığını göstermiştir.

Günümüzde endüstride uygulanan ve geleneksel pastörizasyon yöntemi olarak adlandırılan yöntemlerden biride sıcak suya daldırma metodudur. Geveke vd. 2016'da yapmış olduğu bir çalışmada yumurtalar, sıcaklığı kademeli olarak yükseltilmiş sıcak suyun içine 60 dakika boyunca batırılmıştır. İşlem sonucunda yumurtalarda 4.5 log *Salmonella* inhibisyonu sağlanmasına rağmen ticari olarak 60 dakika çok uzun bir süre olduğu için ve yumurta akının koagülasyonunu engellemek için kullanılan suyun sıcaklığının koagülasyon sıcaklığını geçmesi dolayısıyla yaşanabilecek kalite kayıpları göz önünde bulundurulduğunda endüstri tarafından tercih edilen bir yöntem olmadığı bildirilmiştir. Ne yazık ki bu sıcaklıkta patojenik bakteriler yeteri kadar inhibe olmazlar. Diğer bir sebep ise sıcaklığın kademeli olarak sudan kabuğa, kabuktan yumurta beyazına ve yumurta beyazından yumurta sarısına geçişidir. Yumurta sarısının yumurta akı koagülasyonunun başladığı sıcaklığa eriştiği süre en az 20 dakika olarak hesaplanmıştır (Geveke vd. 2016). Ancak bu metot ile tüketici tarafından istenmeyen bulanıklıkta ürünler elde edilmiştir.

2003'ten beri en popüler pastörize kabuklu yumurtalar National Inc. Tarafından Davidson's Safest Choice markası altında üretilmektedir (Keener 2017). Kabuklu yumurtalar, Dr. James Cox ve diğerleri tarafından geliştirilen patentli bir suya daldırma işlemi kullanılarak pastörize edilmiştir (Davidson 2015). Yumurta kalitesi üzerinde

önemli bir etki olmaksızın kabuklu yumurta pastörizasyonu için sağlanabilecek zaman-sıcaklık kombinasyonlarını belirlemişlerdir. Isıtıldıktan sonra yumurtaların soğuması için ek süre (saatlerce) gerektiği ancak yumurtalar pastörize edildikten sonra potansiyel olarak tehlikeli bir gıda olarak kabul edilmediğinden soğutmaya gerek olmadığı belirtilmiştir (FDA 2009). Bununla birlikte, pastörize yumurtaların, yumurta kalitesini ve raf ömrünü korumak için genellikle buzdolabında saklandığı bildirilmiştir (Keener 2017).

Gıda hizmet sektörü ve ticari gıda endüstrisince geniş bir alanda kullanılan yumurta ve yumurta ürünlerine güvenli erişim konusunda alternatif yöntemler denenmektedir. Soğuk pastörizasyon olarak nitelendirilen ışınlama, yumurta ve yumurta ürünlerinde birçok ülkede uygulanan bir teknolojidir. Işınlama işlemi özellikle yumurta gibi ısıya hassas proteinlere sahip gıdalar için uygun bir teknolojidir ve 3 kGy'e kadar yapılan ışınlamanın, yumurta ve yumurta ürünlerinin duyu ve fonksiyonel özelliklerinde önemli değişikliğe yol açmadan *Salmonella*'yı inaktive ettiği bildirilmektedir. Işınlama teknolojisini uygulayan ülkelerin kendine ait yasal düzenlemeleri mevcuttur. Ülkemizde “Gıda Işınlama Yönetmeliği” 6 Kasım 1999 tarihli 23868 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir (Uygun Sarıbay 2012).

Yumurta ve yumurta ürünleri üzerinde yapılan ışınlama çalışmaları ile *Salmonella* gibi zararlı mikroorganizmaların iyonize radyasyon ile inaktive edilebileceğine işaret edilmiş, fakat yumurtada bazı olumsuz değişiklikler meydana geldiği gözlemlenmiştir (Uğur vd. 2001). Tek başına ışınlama yöntemi kullanılarak *Salmonella spp.* sayısında düşüş sağlanmasına rağmen kalite üzerinde istenmeyen değişiklikler meydana getirdiği saptanmıştır. Ancak ısıl işlem ile kombine edildiğinde istenilen düzeyde sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir.

Bu kapsamda Alvarez vd. (2007)’nin yaptıkları çalışmada; sıvı bütün yumurtaya uygulanan 57.7 °C’ de 3.5 dakika ısıl işlem ve sonrasında 1.5 kGY iyonize radyasyon ya da 59.3 °C’ de 3.5 dakika ısıl işlem ve sonrasında 0.5 kGY iyonize radyasyon işlemi ile *Salmonella spp.* içermeyen kaliteli ürün elde edildiği belirtilmiştir.

2.2 İnovatif Yöntemler Kullanılarak Yumurta Pastörizasyonu İçin Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Yaygın olarak kullanılan sıcak suya daldırma metodu ile istenilen sıcaklığa ulaşılamaması dolayısıyla üründe yeterli mikroorganizma inaktivasyonu sağlayamaması ve işlem süresinin uzun olması ekonomik anlamda işletme maliyetlerini etkilemesi nedeniyle yerini alacak hızlı bir pastörizasyon metoduna ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu kapsamda pastörizasyon proseslerinde ürünlerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak elektromanyetik dalgalarla sağlanan ısıtma işlemiyle kendine yer edinmiş mikrodalga (MW) ve radyo frekans (RF) ısıtma son yıllarda öne çıkan elektromanyetik uygulamalardır.

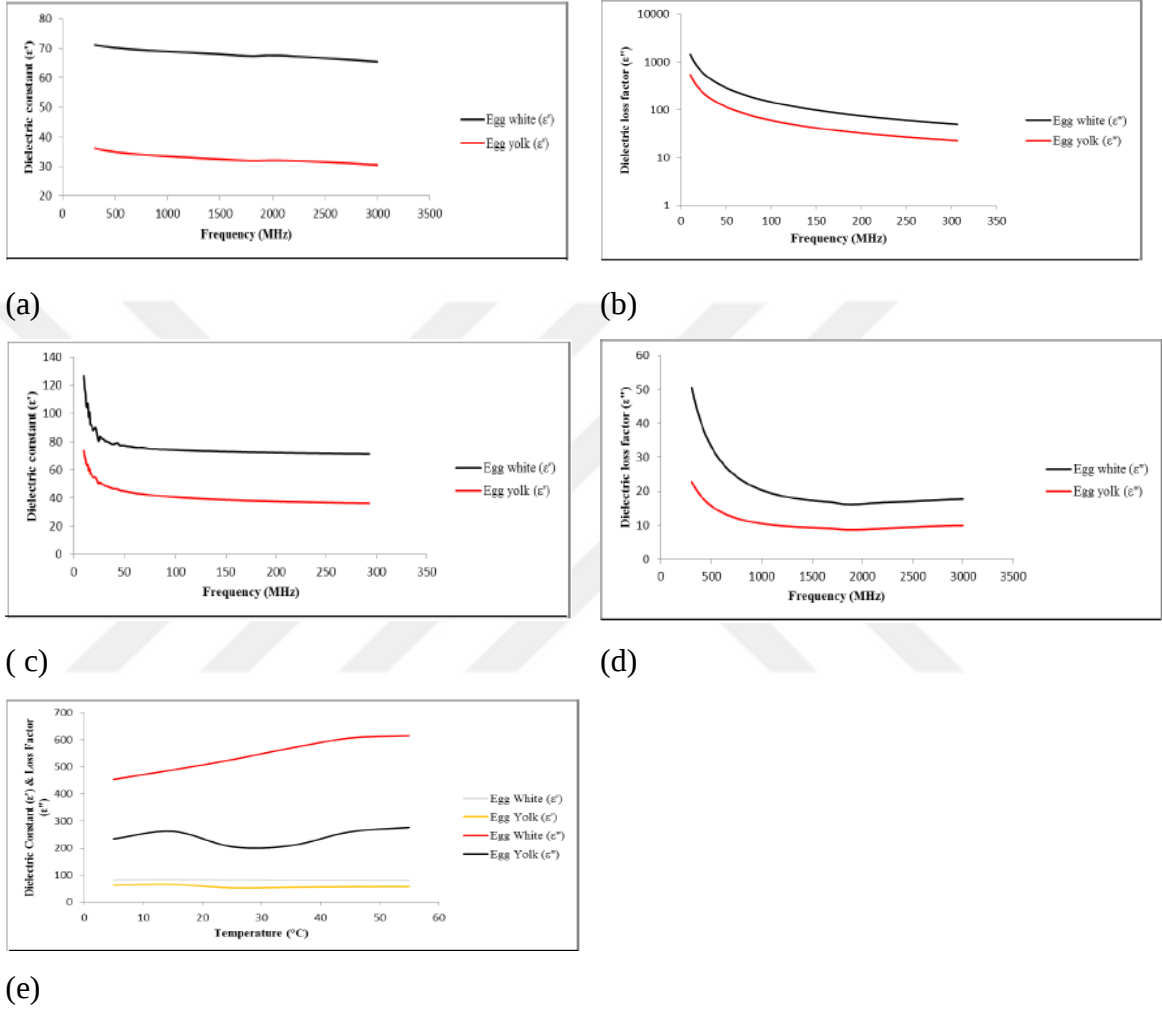
Dielektrik özellikler, gıda ile elektromanyetik dalga enerjisinin interaksyonunu açıklamakta önemli bir rol oynayan elektriksel özelliklerdir (Şakıyan vd. 2006). Gıdalar genellikle iletkenlikleri zayıf olan maddelerdir. Bir elektromanyetik dalgaya maruz bırakıldıklarında elektriksel enerjiyi depo etme ve dağıtma özelliği gösterirler. Dielektrik özellikler, dielektrik sabiti (ϵ') ve dielektrik kayıp faktörü (ϵ'') olarak gerçek ve sanal kısımlardan oluşur ve bağlı dielektrik sabiti aşağıdaki gibi formülize edilir (Çakmak 2011).

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1.1)$$

$j = \sqrt{-1}$ olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik özellikler materyalin sıcaklığına, nem içeriğine, kompozisyonuna ve uygulanan frekans değerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Kannan vd. 2013) Ancak elektromanyetik enerjiyle ısıtılan gıdalar için en önemli bileşen sudur.

Pastörizasyon ekipmanının daha iyi tasarlanması için yumurta akı ve yumurta sarının dielektrik özelliklerinin frekansa ve sıcaklığa göre değerlendirilmesi ve modellenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu özelliklerin bilinmesi sistem tasarımında gerekli optimum kompozisyon ve güç dağıtım sistemlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Kannan vd. (2013) yapmış olduğu bir çalışmada 25°C’de yumurta akı ve yumurta sarısının dielektrik özelliklerinin radyo frekans (10 MHz-300 MHz) ve mikrodalga frekans (300 MHz-3000 MHz) aralığında göre Şekil 4’teki gibi değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 2.1 Dielektrik Özelliklerin Değişen Frekanslarda Değişimi (Kannan vd. 2013)

a) dielektrik sabitinin değişen frekanslarda (10MHz-300MHz) yumurta akı ve yumurta sarısı için değişimi, (b) dielektrik sabitinin değişen frekanslarda (300MHz-3000MHz) yumurta akı ve yumurta sarısı için değişimi, (c) dielektrik kayıp faktörünün değişen frekanslarda (10MHz-300MHz) yumurta akı ve yumurta sarısı için değişimi, (d) dielektrik kayıp faktörünün değişen frekanslarda (300MHz-3000MHz) yumurta akı ve yumurta sarısı için değişimi, (e) dielektrik özelliklerin değişen sıcaklıklarda 27.12MHz frekans bandında yumurta akı ve yumurta beyazı için değişimi

Şekil 2.1(a) ve (d)’ye göre yumurta akı ve sarısının dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün 25°C de radyo frekans aralığında (10 MHz-300 MHz) mikrodalga frekans aralığı (300 MHz-3000 MHz) ile karşılaştırıldığında farklı davranışlar gösterdiği tespit edilmiştir.

Radyo frekans aralığında her iki parametrenin de (Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü) frekans artışını bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.1 (e)' de ise yumurta akı ve sarısının 27.12 MHz'de artan sıcaklık ile dielektrik sabitinin azaldığı görülmüştür. Yumurta akının dielektrik kayıp faktörünün artan sıcaklıkla serbest iyon sayısındaki artışa ile oluşan iyonik kutuplaşmanın artmasına bağlı olarak arttığı düşünülmektedir. Yumurta sarısının dielektrik kayıp faktörü ise artan sıcaklığa bağlı olarak başlangıçta azalmış daha sonra artış göstererek dalgalı bir kurve çizmiştir. Yumurta bileşenlerinin sergilediği tüm bu dielektrik davranışlar yumurta kalitesi ve fonksiyonel özelliklerine zarar vermeyecek düzeyde bir RF ısıtma prosesi için uygun bulunmuştur (Kannan 2013).

Dielektrik uygulama sırasında, ürünün içerisinde oluşan ısı enerjisi değeri ise aşağıda verilen eşitlikle bulunabilmektedir:

$$Q_{abs} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (1.2)$$

Bu denklikte, ω - frekans değerini, ϵ_0 serbest uzay geçirgenlik sabiti değerini ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F / m), ϵ'' ürünün bağıl dielektrik kayıp faktörünü ve $|\vec{E}|$ ise elektriksel alan modülü değerini (V/ m) göstermektedir. Bu eşitlikten de anlaşılabacağı gibi ısı enerjisi oluşumunu sağlayan en önemli etkenlerden biri dielektrik kayıp faktörü, uygulanan frekans değeri ve oluşan elektriksel alan modülüdür.

Dielektrik özelliklerin manuel ölçüm ihtiyacını ve buna bağlı olarak meydana gelebilecek hataları minimize ederek artan verimlilik ve tutarlılık sağlamak amacıyla Lau 2018, dielektrik özelliklerin sıcaklığa bağlı otomatik ölçüm sistemi geliştirmiştir. Frekansa bağlı olarak yumurta akı, yumurta sarısı ve kabuğun dielektrik sabitinin azaldığı, artan sıcaklığa bağlı olarak ise yumurta akı ve yumurta sarısının dielektrik sabitinin radyofrekans bandında arttığı mikrodalga frekans bandında ise azaldığı tespit edilmiştir. Yumurta bileşenlerinin her üçünde de elektrik kayıp faktörünün sıcaklıkla artarken frekansla azaldığı gözlemlenmiştir. Yumurta akı ve yumurta sarısının sıcaklığa bağlı bu davranışının GHz bölgesine girildiğinde tersine dönmeye başladığı

belirtilmiştir. Bu kapsamda literatür verileri arasındaki farkın, kullanılan yumurtaların tazeliğinin dielektrik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini gözler önüne sermektedir (Lau 2018)

Dielektrik ısıtma işleminde önemli faktörlerden biri ürün içerisinde dağılan güç miktarının bilinmesidir. Dağılan güç miktarının belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$Pd = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \quad (1.3)$$

Burada Pd dağılan gücü, E ise elektrik alan şiddetini temsil etmektedir (Metaxas 1991)

Dielektrik ısıtma uygulamalarında ele alınan parametrelerden bir diğeri ise penetrasyon derinliğidir. Ürün üzerine bir elektrik alan uygulandığında gücün %37'ye yani $(1/e)$ 'sine düştüğü uzaklık olarak tanımlanır. Elektromanyetik dalgaların materyale nüfuz etme derinliği, ürünlerin dielektrik özelliklerinin bir fonksiyonudur. Penetrasyon derinliği ürünün dielektrik özelliklerine bağlı olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$dp = 1 / 2\alpha \quad (1.4)$$

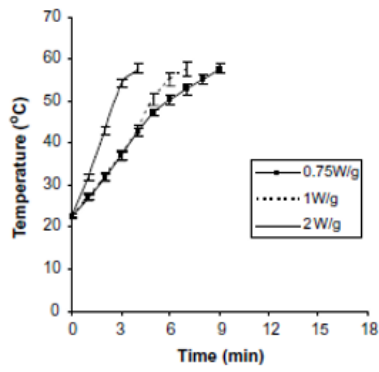
burada α zayıflama faktörüdür ve kayıplı dielektrik materyale nüfuz ederken azalan alan genliğinin bir ölçüsüdür (Metaxas 1991).

Dielektrik uygulamalar arasında kendini gösteren mikrodalga ısıtma ile sağlanan pastörizasyon işlemi geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında gıda ürününü çok daha hızlı ısıtabilmektedir. Proses süresinin kısa olmasına bağlı olarak üründe aşırı sıcaklık artışı meydana gelmemesi geleneksel yöntemlere göre mikrodalga'nın avantajı sayılabilecek ürünün tat koku görünüm tekstür gibi özelliklerini de koruduğu belirtilmiştir (Lau 2000). Geleneksel yöntemlerle yapılan pastörizasyon işleminde istenilen sıcaklığa 30-45 dakikada ulaşılırken, mikrodalga uygulamayla 3 ila 5 dakikada ulaşılmaktadır. Uygulama süresinin kısa olmasına bağlı olarak ürünün kalite özelliklerinde bir değişme gözlemlenmemiştir. Buna bağlı olarak mikrodalga

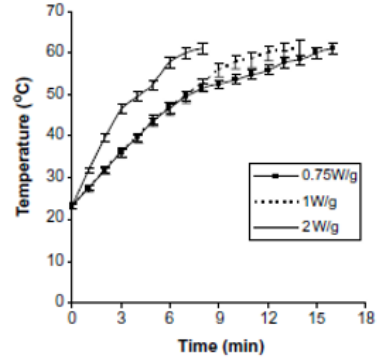
teknolojisinin avantajları arasında sayabileceğimiz ürünün kalite gelişimine olanak sağlaması, katkı maddesi kullanılmaksızın raf ömründe uzama, doğal özelliklerin korunması (görünüş, tekstür, tat, renk, koku, tazelik), enerji tasarrufu, düşük bakım masrafı (uzun ömürlü magnetrondan dolayı), az sayıda personel çalıştırma ve çevre dostu olması sayılabilir (Schlegel 1992). Buna karşın bazı dezavantajları da mevcuttur. Örneğin proses süresinin kısa olması bir yönden avantaj gibi gözükse de bu süre içerisinde inaktive edilemeyen mikroorganizmalar bulundurulur. Bu mikroorganizmaların kontrol altında tutulabilmesi için önerilen dört kontrol noktası arasında plastik film ile kaplama, küçük boyut, düşük mikrodalga gücü ve uzun işlem süresidir (Lin ve Sawyer 1988). Mikrodalga ile proses edilen gıdaların güvenliği açısından dikkat edilen her yerde bulunabilen ve hastalığa sebep olan gıda kaynaklı patojenler (*Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp.*) bu çalışmalarda odak noktası olmuşlardır (Heddleson ve Doores 1993).

Kabuklu yumurtanın su banyosu uygulanarak pastörize edilmesi için yüksek sıcaklıklarda uzun süre ısıtma gerektiğinden Hou vd. (1996), böyle bir ısıtma işlem uygulamasının yumurta beyazındaki proteinlerin aşırı ısınma sonucu denatürasyona uğrayacağını ve pıhtılaşacağını belirtmişlerdir. Mikrodalga işlemi ile ürün kısa sürede ısındığından, aşırı ısınmadan kaynaklı sorunların çözümünde mikrodalga yöntemi, sudaki ısıtma yöntemlerine alternatif durumundadır. Ancak mikrodalga ısıtma yönteminin tekdüze olmayışı, dezavantajları arasındadır. Fleischman (2004), özel mühendislik tasarımlarıyla bu dezavantajların giderilebileceği görüşündedir.

Dev vd. (2008), mikrodalga yönteminin, kabuklu yumurtanın pastörizasyon için ideal olduğunu bildirmişlerdir. Dev vd. (2008) yaptığı bir çalışmada ilk olarak uygun sıcaklık (0-62°C) ve frekans (200 MHz-10 GHz) 'ın yumurta bileşenlerinin dielektrik özelliklerine etkisi araştırılmış daha sonra yumurta bileşenlerinin her biri pastörizasyon sıcaklığına getirilerek laboratuvar ölçekli 2450 MHz mikrodalga fırın ile ısıtılmış ve elde edilen ısıtma eğrilerinden farklı güç seviyeleri için gereken ısıtma süreleri hesaplanmıştır.

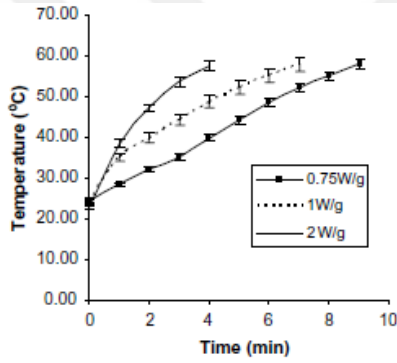


(a)

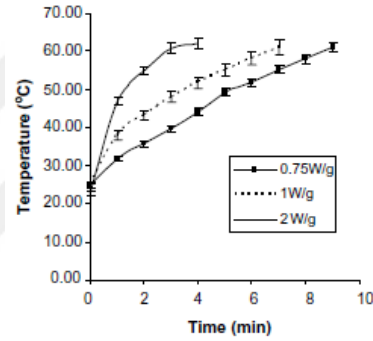


(b)

Şekil 2.2 Beher içerisinde yumurta akı (a) ve sarısının (b) farklı mikrodalga güç seviyelerinde ısınma eğrileri (Dev vd. 2008)



(a)



(b)

Şekil 2.3 Kabuk içerisinde yumurta akı (a) ve sarısının (b) farklı mikrodalga güç seviyelerinde ısınma eğrileri (Dev vd. 2008)

Yapılan analizlerde proses süresi ve ürün kalitesi kapsamında mikrodalga ile pastörizasyon prosesinin su banyosu pastörizasyon tekniği ile kıyaslandığında yumurta kabuğu ve kabuk zarının bütünlüğünü kaybetmeden elektromanyetik dalga geçirgenliğinin etkin bir pastörizasyon için uygun olduğu belirlenmiştir (Dev vd. 2008).

Zhang vd. (2013) yaptığı bir başka çalışmada ise mikrodalga pastörizasyonu sırasında sıcaklığın homojenliğini değerlendirmek ve sıcak ve soğuk noktaları belirlemek amacıyla farklı konsantrasyonlarda (%20-%25-%27.5-%30) yumurta akı ve bütün yumurta tozları ile farklı miktarlarda eklenen tuz (0-50-100-200mM) ile örnekler hazırlanmıştır. 915 MHz'de yumurta akı ve bütün yumurta örneklerinin dielektrik

sabitleri ve jelleşme ısısının artan konsantrasyon ile azaldığı görülürken dielektrik kayıp faktöründe bir değişim gözlenmemiştir. Ancak yumurta akı ve bütün yumurtanın dielektrik kayıp faktörü ilave edilen tuz ile orantılı olarak artış göstermiştir. Ayrıca tuz içeriğinden bağımsız olarak 70°C ve 80°C’de %25 katı konsantrasyonda yumurta akı ve bütün yumurtada ısınmaya bağlı olarak bir jelleşme meydana gelmiştir. Bu sıcaklık değerleri yumurta akı ve bütün yumurtaların mikrodalga pastörizasyon işlemi sırasında jel yapıda gıdalar oluşturabileceğini göstermiştir. Jelleşme gücü ve su tutma kapasitesi proses sonrası ürün kalitesi açısından değerlendirilmiş ve yumurta akı ve bütün yumurtanın mikrodalga ile pastörizasyonu için modellemeye uygun olduğunu göstermiştir.

İyonize olmayan radyasyon grubuna dahil edilen radyo dalgaları ve mikrodalgalar, biyolojik açıdan yararlı atomları iyonize etmek için yeterli enerjiye sahip olmadığından herhangi bir ortam ya da ürün tarafından absorbe edildiğinde yaratacakları en muhtemel etki ısıtmadır (Piyasena 2003, Marra 2007).

Radyo dalgaları, bir elektromanyetik dalganın tekrarlanan birimleri arasındaki mesafe olarak tanımlanan dalga boyu ve bir dalga boyunun bir saniyede kat ettiği mesafe olarak tanımlanan frekans kavramlarıyla nitelendirilir (Çakmak 2011). RF sistemde elektromanyetik spektrum aralığı geniş olmasına karşın US Haberleşme Komisyonu (FCC) tarafından endüstriyel ve bilimsel alanlarda 13.56 MHz, 27.12 MHz ve 40.68 MHz frekans değerinde çalışan sistemlerin kullanımına izin verilmiştir (Guo vd. 2019). Gıda alanında ürün proseslerinde dalga boyu yaklaşık 11 m olan 27.12 MHz frekans tercih edilmektedir (Yazar 2013). Yüksek dalga boyu ve düşük frekansa bağlı olarak ürün içerisinde etkin bir penetrasyon derinliği meydana geldiğinden radyofrekans sistemler büyük ve yığın ürünlerde hacimsel ısınma etkisi sağlayabilirler. Yapılan radyofrekans çalışmalarında literatüre bakıldığında üründe tekdüze sıcaklık dağılımı elde edilmesi ve köşe kenar bölgelerinde sıcaklık artışlarının engellenmesi amacıyla ürün geometrisi ve boyutları, elektrotlar arası uzaklık, proses sırasında uygulanan güç – yüklü elektrot potansiyeli ve ürünün hareketi gibi parametrelerin etkisi konusunda farklı ürünlerde deneysel ve matematiksel çalışmalar yapılmıştır (Erdoğan vd. 2017, Li vd. 2018, Zhu vd. 2018). Radyofrekans ısıtma elektromanyetik alanda oluşan dalgaların

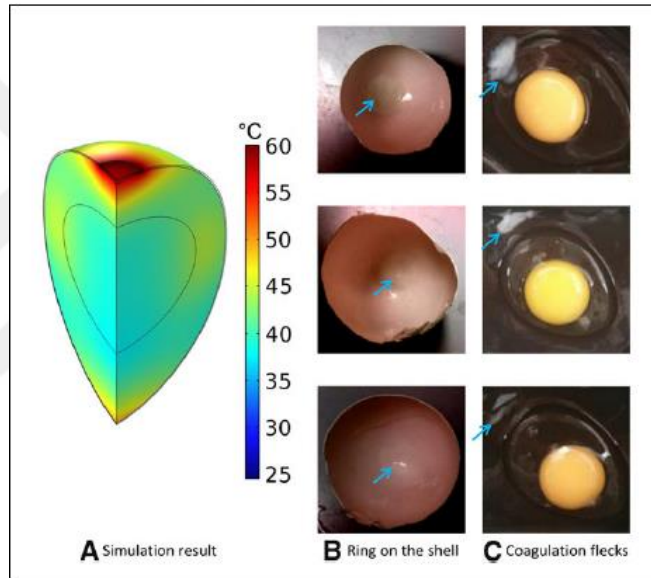
yarattığı ısı enerjisiyle gıdanın içinde daha homojen bir dağılım göstermesi ve işlem süresinin de kısalmasıyla gıda sanayinde pastörizasyon, kurutma, çözündürme, dondurma, sterilizasyon, böcek kontrolü, enzim inaktivasyonu, pişirme gibi uygulamalarla alternatif bir yöntem olarak uygulama alanı bulmaktadır. (Yazar 2013)

Gıda endüstrisinde radyofrekans uygulamalarına mikrodalgaya göre daha az rastlanmasına rağmen literatürde radyofrekans sisteminin çeşitli gıdalar üzerinde etkinliğinin denenmesine dair çalışmalar bulunmaktadır.

Trujillo ve Geveke (2014) tarafından yakın zamanda radyo frekans enerjisi kullanılarak kabuklu yumurtaların pastörize edilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Yumurtalar silindirler boyunca döndürüldükçe radyo frekans enerjisine maruz bırakılmıştır. Bu teknolojinin geleneksel sıcak suya daldırma yöntemine göre benzersiz avantajı, yumurta beyazını önemli ölçüde ısıtmadan yumurta sarısını seçici olarak ısıtma yeteneği olduğu düşünülmektedir. Yumurta sarısı radyo frekans enerjisi ile pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra, beyazı pastörize etmek için yumurta sıcak su banyosuna daldırılmış ve işlem yaklaşık 20 dakika sürmüştür. Bu durumun kullanılan bu metodu sıcak suya daldırma işleminden yaklaşık 3 kat daha hızlı hale getirdiği tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada radyo frekans işleminin, kabuklu yumurtalarda yumurta akı görünümünü değiştirmeden 5 log *Salmonella Typhimurium*'u etkisiz hale getirdiği belirtilmiştir. Ancak yumurta özelliklerinde ve yumurta geometrilerinde doğal varyasyonları garanti etmek için endüstriyel ölçekte daha fazla test yapılması gerekmektedir. Bu varyasyonlar, yumurtaların tümünün pastörize edildiğinden ve hiçbir yumurtanın az veya fazla işlenmediğinden emin olarak uygun şekilde yönetilmelidir.

Radyo frekans uygulaması ile pastörize edilen yumurtalardaki değişimleri incelemek isteyen Lau vd. 2016'da yaptıkları bir çalışmada 27.12 MHz'de basit bir radyo frekans ısıtma ile 50 farklı konfigürasyonda sonlu element modeli kullanılarak denemeler yapılmıştır. Üst elektrot voltajını, elektrotlar arası boşluk ve yumurtanın dikey konumu ile ilişkilendiren bir regresyon denklemi geliştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar ve deney sonuçlarına göre her iki çalışmada da kabuğun altında bulunan hava hücreleri etrafında bir "pıhtılaşma halkası" olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun yumurta bileşenlerinin

farklı dielektrik özelliklere sahip olması ve kabuk-hava hücresi- yumurta akı ara yüzeyinde yeniden yönlendirme ve elektrik alan konsantrasyonundan kaynaklandığı savunulmaktadır. Artan proses süresine rağmen elektrotlar arasında boşluğun arttırılması ya da hava hücrelerinin soğutulması gibi ilave işlem yardımcılarının bu soruna çözüm getireceği düşünülmektedir. Isıtma ile oluşan bu pıhtılaşma halkası, yumurta kalitesine etkisi nedeniyle yumurtanın bir bütün olarak pastörize edilmesini engellemiştir. Elektrik alan modeli analiz edildiğinde heterojen gıdalarda RF ısıtmanın düzensiz olduğu ve heterojen gıdalar için radyo frekans ısıtmanın geliştirilmesi gerektiği gözler önüne serilmiştir (Lau 2016)



Şekil 2.4 Simülasyon ve deneysel çalışmalarda pıhtılaşma halkalarının görünümü (Lau vd. 2016)

Yumurta gibi farklı dielektrik özelliklere sahip birden fazla bileşenden oluşan heterojen gıdalarda gözlenen düzensiz radyo frekans ısıtma problemi araştırmacıları alternatif çözümler üretmeye teşvik etmiştir. Gıdayı benzer dielektrik özelliklere sahip bir ortamla çevrelemek, gıdayı karıştırmak veya ilave bir ısıtma veya soğutma cihazı takmak gibi yöntemler ile denemeler yapılmıştır. (Birla vd. 2004, Wang vd. 2007, Jiao vd. 2014) Lau vd. (2016)'da yaptıkları kabuklu yumurta örneğinde yumurta sarısının koagülasyon sıcaklığı dikkate alınarak ısıtma yapılmıştır. Çünkü yumurta sarısı (65°C) yumurta akından (56.7°C) daha yüksek sıcaklıkta koagüle olduğu daha önce yapılan çalışmalarda

belirlenmiştir. (Nakamura vd. 1982). Ancak kabuk- hava hücreleri- yumurta akı ara yüzeyinde oluşan pıhtılaşma halkası etkin bir ısınma oluşmasını önlemiştir. Bu yüzden yeni bir soğutucu yüzey ve elektrik alan kombinasyonuna gerek duyulmuş ve bunun yumurtayı başka bir ortama daldırılarak başarılabileceği düşünülmüştür.

Geveke 2016 yaptığı çalışmada, Sıcak suya daldırılarak işlenen kabuklu yumurtalar da *Salmonella Enteritidis*'in ısıya dayanıklı suşlarının termal inaktivasyon kinetiğini belirlenmiş ve bu işlemenin yumurta kalitesi üzerine etkisi değerlendirilmiştir. 60 dakika 56.7°C ve 100 dakika 55.6°C'de sıcak suya daldırma muamelelerinde 4.5 log'luk inaktivasyon sağlanmış ve bu işlemin ardından hayatta kalan *Salmonella Enteritidis* popülasyonu dört hafta soğutulmuş depolamada stabil kalmıştır. Ancak yumurta kalitesini etkileyen birkaç özelliğe değişim meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Yang vd. 2019 bir diğer çalışmada ise, gözle görülür kalite değişikliğine neden olmadan kabuklu yumurtada *Salmonella Typhimurium* inaktivasyonu için en uzun (8 dakika-30W-30°C) ve en kısa (4.5 dakika-35W-38°C) işlemlerin etkileri araştırılmıştır. Kombine radyo frekans/sıcak suya daldırma işlemlerinin kalite üzerinde yalnızca sıcak suya daldırma işleminden kaynaklanabilecek olası etkilerini elimine ettiği gözlemlenmiştir. En uzun ve en kısa işlemler arasında işlem süresinin kısa olmasına bağlı olarak güç ve sıcaklık parametrelerinin yüksekliğinin yumurta akı bulanıklaşması yaratmasına rağmen yumurta kaliteleri arasında gözle görülür farklara rastlanılmadığı belirtilmiştir. İşlem süresinin en kısa olana göre %78 daha fazla olması ve %47 daha fazla enerji gerektirdiğinden endüstri tercihi en kısa olandan yana olacağı düşünülmektedir. Daha büyük zaman, güç ve sıcaklık daha fazla inaktivasyonu sağlasa bile yumurtaya zarar verebileceği tahmin edilmektedir. Seçilen koşullar altında yumurtalar da >5 log daha fazla bakteri yok edildiği ve radyo frekans/sıcak suya daldırma ile işlem görmüş yumurtaların yalnızca sıcak suya daldırılarak muamele edilmiş yumurtalara eşit ya da daha iyi kalite de olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca radyo frekans ile 4.5 ve 8 dakika işlem gören yumurtalar arasında bulanıklık dışında hiçbir fark gözlemlenmediği belirtilmiştir (Yang vd. 2019).

Yang vd. tarafından 2020 yılında, sıcak hava, sıcak suya daldırma ve sıcak su püskürtme işlem yardımcıları ile radyo frekans işleminin kabuklu yumurtalar da *Salmonella* inaktivasyonu üzerine etkisini incelemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda sıcak suya daldırma ve sıcak su püskürtme işlemlerinin sıcak hava muamelesine göre daha etkili ve daha hızlı sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca radyo frekans işlemi ardından yapılan ek işlemlerin pastörizasyon süresini kısalttığı gözlemlenmiştir. *Salmonella* popülasyonunda 5 log azalma sağlayabilmek için radyo frekans/sıcak su daldırma yönteminin gereken süre 19.5 dakika ve radyo frekans/sıcak su püskürtme yöntemi için gereken süre 24.5 dakika olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında kombine radyo frekans işlemleriyle daha az bulanık yumurta akı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca bu işlemlere tabi tutulan yumurtalardan yapılan keklerin hacmi ve yumuşaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak sıcak suya daldırma ve sıcak su püskürtme işlem yardımcıları radyo frekans pastörizasyonun ikinci adımı olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir (Yang vd. 2020).

Yang vd. 2020 yılında ele aldıkları bir diğer çalışmada ise radyo frekans işlemi uygulanan yumurtaların depolama şartları üzerine etkisi incelenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda *Salmonella Typhirum* aşılana ve radyo frekans/sıcak su pastörizasyonuna tabi tutulan yumurtalarda 5 log *Salmonella* inaktivasyonu sağlandığı bilinmektedir. Bu teknolojiyle doğal olarak kontamine olmuş yumurtalarda depolama şartları gözardı edildiğinde bile 7.2°C’de beş haftaya kadar stabilitesini koruyabilen yumurtalar elde edildiği tespit edilmiştir. Radyo frekans /sıcak su kombine işlem ile pastörize edilmiş kabuklu yumurtalar ile işlem görmemiş kabuklu yumurtaların benzer bir raf ömrüne sahip olduğu belirtilmiştir. Buna bağlı olarak beş haftalık süre yumurta kalitesinde belirgin bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Kombine radyo frekans/sıcak su işlemi mevcut ticari sıcak su muamelesi ile karşılaştırıldığında daha iyi bir ısı dağılımı ve yumurta kalitesi meydana getirdiği belirtilmiştir. Bu çalışma ile radyo frekans/sıcak su işlemi ticari olarak uygun raf ömrüne sahip güvenli kabuklu yumurta üretebilen alternatif bir pastörizasyon teknolojisi olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir.

Mikrodalga ve radyo frekans sistemlerin çalışma prensipleri temelde birbirine benzerdir ve şematik olarak aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Şekil 2.4a’da görüldüğü gibi mikrodalga işleminde magnetron veya klystron denilen özel oscillator tüplerinden yayılan mikrodalga bir dalga kılavuzu aracılığı (waveguide) ile ürünün olduğu bölüme yönlendirilmektedir. Şekil 2.4b’de ise, radyofrekans uygulamada iki plaka şeklindeki elektrotlar (alt elektrot topraklama işlevi görerek elektrik enerjisini depolamaktadır) arasına yerleştirilmiş ve kapasitör işlevi görerek elektrik enerjisini absorbe edebilen ürün gösterilmektedir.

RF uygulama ile MW uygulama arasındaki temel fark radyo frekanslarının daha düşük frekansta çalışması ve dalga boyunun daha uzun olmasıdır (27.12 MHz frekansında dalga boyu ≈ 11 m). Elektromanyetik spektrumda mikrodalga bölgede kullanılan frekansa bağlı olarak elde edilen dalga boyunun (2.45 GHz frekansında ≈ 12 cm) daha kısa ve enerjisinin daha fazla olduğu bilinmektedir.

Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi, endüstriyel uygulama kapsamında, RF uygulamanın penetrasyon derinliği yani ürün içerisine nüfus etme yetisi daha yüksek olup bu kapsamda ürün içerisinde mikrodalga uygulamaya göre daha homojen bir ısı oluşumu sağlanabilmektedir. Mikrodalga uygulamada ise penetrasyon derinliğinin az olması ve yüksek frekansa bağlı olarak daha fazla ısı enerjisi oluşumu sonucu üründe bölgesel aşırı ısınmalar hatta yanma ve renk değişikliği gibi problemlere neden olmaktadır.



Şekil 2.5 Mikrodalga (a) ve Radyo frekans (b) ısıtma sistemlerinin şematik görünümü (Marra vd. 2009)

Gıda ürünleri, içerisinde rastgele dağılım gösteren su ve benzeri polar moleküller içerirler. Elektrik alana maruz bırakılan ürün içerisindeki moleküller, uygulama frekansına göre elektrik alanının yön değiştirmesiyle birlikte dönmektedir (dipol dönmesi). Örnek olarak, 27.12 MHz’de çalışan bir radyo frekans sistemde elektrik alanın yönünün saniyede 27.12 milyon defa değiştiği anlamına gelmektedir. Elektrik alanın hızla değişimi ile moleküllerin birbirleriyle sürtünmeleriyle ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Su moleküllerinin polar özelliğinden dolayı elektriksel enerjiyi diğer moleküllere göre daha iyi ısıya dönüştürebilmektedir (Uslu ve Certel 2006). 1 GHz üstü frekanslarda bu ısıtma mekanizmasının daha önemli hale geldiği belirtilmekte olup, endüstriyel uygulama frekansına sahip (2450 MHz) mikrodalga sistemlerde, dipol dönmenin ürünlerin ısınmasındaki etkin mekanizma olduğu da düşünülebilir.

Ürün içerisindeki çözünmüş tuzların iyonik bileşenleri, üzerlerinde taşıdıkları elektriksel yükten dolayı, elektrik alanının polaritesine ters yönde hızlanarak harekete başlamaktadır. Bu kapsamda, RF sistemlerde elektrotlara uygulanan değişken elektrik alanı (+) yüklerin negatif elektrik alanına, (-) yüklerin ise pozitif elektrik alanına doğru hareket etmesine sebep olmaktadır. İyonların hareketleri ve bu hareketlerin sonucu aralarında oluşan sürtünme ve birbirleriyle çarpışmaları kinetik enerjilerinin artarak ısı enerjisine dönüşmesine neden olmaktadır. Artan frekansa bağlı olarak elektromanyetik alan içerisinde gıda ürünü içerisindeki dipol dönmesi ve iyonların hareketlerin hızı da artış gösterir (Uslu ve Certel 2006).

Genel olarak iyonik polarizasyonun daha düşük frekanslarda çalışan radyofrekans aralığında baskın ısıtma mekanizması olduğu kabul edilir. Mikrodalga için kullanılan daha yüksek frekanslarda ise (915 ve 2450 MHz) her iki (iyonik polarizasyon ve dipol dönme etkisi) mekanizma da ürünün su ve iyon içeriğine bağlı olarak baskın olabilmektedir (Tang 2005). Su, mikrodalga ile ısıtmada en önemli bileşen olup gıdalarda protein ve yağ mikrodalga enerji ile daha az etkileşime girmekte ve bu kapsamda ürün sıcaklığının artışında ürün ısı kapasitesi değeri de etkili olabilmektedir (Ryynanen 1995). Buna karşın su miktarı azaltılmış ürünlerde, örneğin bisküvilerin veya cipslerin son kurutma aşamalarında, radyo frekans ısıtma sistemleri daha seçici ve etkin olarak davranabilmektedir.

Radyo frekans ısıtma metodunda dielektrik özelliklerin yanı sıra gıdanın geometrisinin de etkili olabileceği düşünülerek, hangi gıda şeklinde homojen ısınmanın etkili olabileceğini gözlemlemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Romano vd. (2008) yaptığı çalışmada kübik şekilli gıdaların silindirik şekilli gıdalara nazaran daha hızlı ve daha düzenli bir ısınma sağladığı ve güç emiliminin daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Lau vd. 2017 çalışmasında kabuklu yumurta pastörizasyonu üzerinde radyo frekans ısıtma ve iyonize su destekli denemeler yapılmıştır. İncelenen tüm koşullarda yumurta akını pıhtılaştırmadan yumurta sarısında konsantre ısıtma meydana geldiği gözlemlenmiş bazılarında 20 dakikada radyo frekans ısıtma sonrası yumurta sarısında iç sıcaklığın 60°C yaklaştığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda yumurtadaki daha düşük elektrik alan yoğunluğu ile birlikte suyun soğutma etkisinin yumurta sarısında yoğunlaşmış ısıtmaya neden olduğu düşünülmektedir. Ölçeklendirilmiş bir radyo frekans ısıtma işleminin üst elektrot voltajı 10.5 kW iken ardından sıcak suya daldırma işlemi ile 37 dakika içerisinde yumurta sarısında en az 3 log *Salmonella* inaktivasyonu sağladığı belirlenmiştir.

Geveke vd. 2017 tarafından yapılan bir çalışmada, geleneksel pastörizasyon yöntemi ile pastörize edilen yumurtalar da uzun işlem süresini kısaltmak ve potansiyel *Salmonella* taşıyıcısı yumurtaların endüstriyel sahada pastörizasyon sırasında uzun işlem süresine bağlı olan engellerini ortadan kaldırmak ve işlem süresini yarı yarıya düşürmek için RF enerjisi ve sıcak su kullanılan iki aşamalı bir sistem geliştirilmiştir. Yumurta içerisinde oluşabilecek güç yoğunluğuna bağlı sıcak noktaları engellemek için tasarlanan bu sistemde uygun radyofrekans jeneratörü seçmek için kabuklu yumurtaların empedansı 10-70 MHz frekans aralığında ölçülmüştür. Yumurta sarısına 7.5 log *E.Coli* enjekte edilmiştir. İlk olarak yumurta 35°C suda 3.5 dakika 60 MHz radyofrekans enerjisi ile muamele edilmiş daha sonra 56.7°C suda 20 dakika daha uzatılmıştır. Bu iki aşamalı süreç sonucunda *E.Coli* popülasyonunun 6.5 log azaldığı belirtilmiştir. Geleneksel olarak sıcak suya daldırılarak *E.Coli* popülasyonun da sağlanacak 6.6 log inaktivasyon için gereken süre 60 dakika iken bu çalışmada yapılan iki aşamalı RF ve sıcak su daldırma kombinasyonu mevcut ticari işlemden daha hızlı bir pastörizasyon süreci

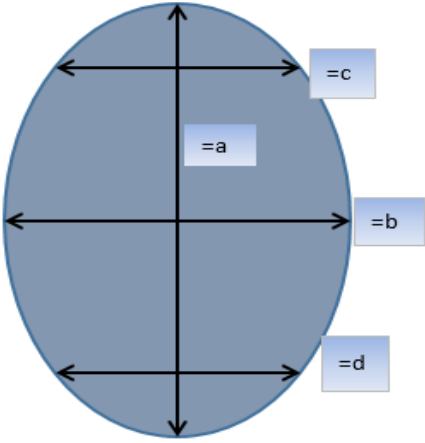
sağladığı ve yumurta kaynaklı gıda salgınlarının azalması için pastörizasyon endüstrisine ön ayak olduğu belirtilmiştir.

Pastörizasyon sürecinde iyileştirme ve mevcut maliyetleri azaltmada için geleneksel sıcak su yöntemi ile sağlanan pastörizasyon işleminden %60 daha hızlı pastörizasyon sağlayan radyo frekans / sıcak su kombinasyonu için mevcut maliyetleri azaltma ve sürece iyileştirilmesi adına Geveke vd. 2018 tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda radyo frekans pastörizasyon ekipmanı yumurta dönüşünü ve su kullanımını otomatikleştirmek için yeniden tasarlanmıştır. Çalışma aşamalarında ilk olarak yumurtalar 6 dakikada radyo frekans enerjisi ile ardından 15 dakikada 56.7 °C’de su ile ısıtılmıştır. 21 dakikalık işlem süresince albümünde bulanıklaşmaya neden olmadan 6.1 log *Salmonella Typhirum* inaktive edildiği belirtilmiştir. İşlem gören yumurtaların kek endüstrisinde kullanımıyla daha büyük hacme sahip ürünler elde edildiği gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Belirtilen amaçlar kapsamında tez çalışması deneysel çalışmalar ve matematiksel modelleme çalışmaları olmak üzere iki bölümden oluşmuştur. Deneysel çalışmalar mikrodalga ve radyo frekans sistemlerde yumurta içi sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar geliştirilen matematiksel modellerin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Mikrodalga ve radyo frekans uygulama sırasında yumurta içi sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla UMI-4 veri toplama sistemi ve fiber optik probalar (FISO, Canada) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan (50 – 60 g ağırlığında A – kalite) yumurtalar Gölbaşı – Ankara’dan yerel bir marketten temin edilmiştir. Çizelge 3.1 kullanılan yumurtaların fiziksel boyutlarını göstermektedir. Elde edilen veriler toplam 25 yumurtadan elde edilmiştir.

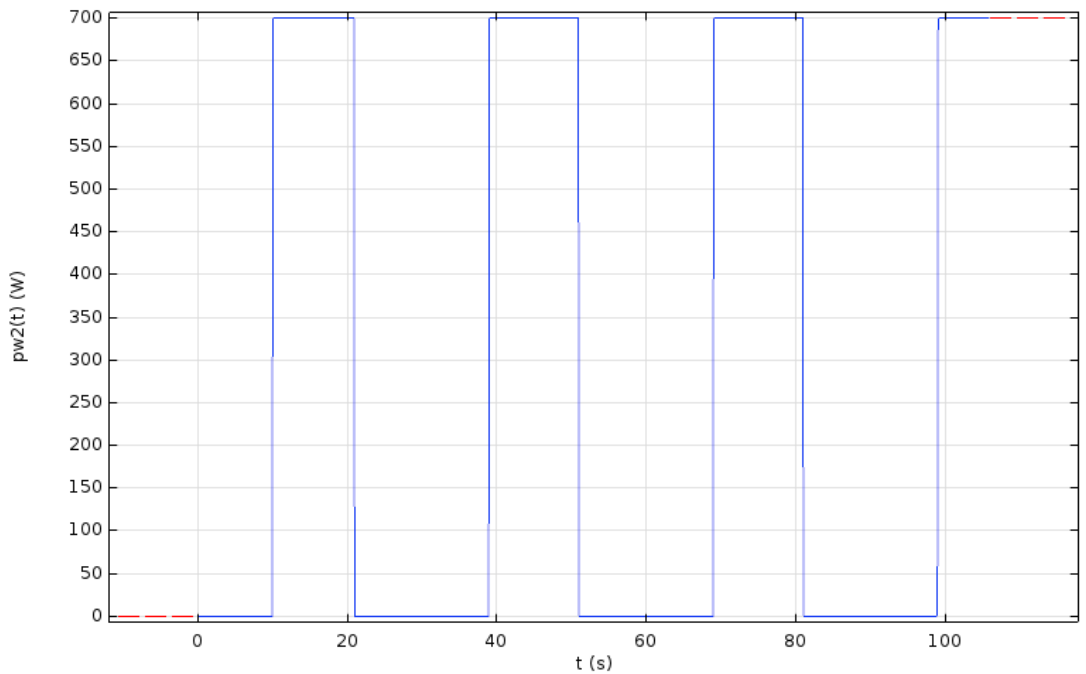
Çizelge 3.1 Mikrodalga ve radyo frekans ısıtma işlem çalışmalarında kullanılan yumurtaların fiziksel boyutları

	a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)
	5.91±0.12	4.47±0.08	3.43±0.29	3.58±0.39

3.1 Deneysel Çalışmalar

3.1.1 Mikrodalga uygulama amacıyla gerçekleştirilern deneysel çalışmalar

Mikrodalga uygulama amacıyla ev tipi 2450 MHz frekansa çalışan LG MS2022D model mikrodalga sistem kullanılmıştır. Proses sırasında yumurtaların sıcaklık değişimlerinin takip edilebilmesi amacıyla, fiber optik probların sistem içine girişine izin verecek şekilde sistemin üst tarafında açılmış olan 3.385 cm yarıçaplı bir kesit kullanılmıştır. Yine proses sırasında bu kesitten dışarı sızan dalgaları engellemek amacıyla proba zarar vermeyecek bir kapak sistemi deneysel çalışmalar sırasında kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda yumurtalarda, kullanılan güç seviyelerine göre patlama problemi yaşanmaması amacıyla (yumurta içerisinde yerel olarak meydana gelen yüksek sıcaklık artışları oluşan buhar ve meydana gelen buhar basıncına bağlı olarak patlama meydana gelebilmektedir) en düşük güç döngülerinden birisi olan çözdürme modu deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Şekil 3.1 çözdürme modu güç uygulamasında elde edilen döngüyü göstermektedir.



Şekil 3.1 Mikrodalga sistemde çözdürme döngüsü uygulamasında elde edilen güç değişimi

Kullanılan mikrodalga sistem 1 kW gücünde olup %70 elektrik enerjisi verimliliği ile çalıştığından güç döngüsü kapsamında maksimum güç değeri 700 W olarak kullanılmıştır. Yumurta içerisindeki sıcaklık değişiminin fiber optik prob kullanımı ile belirlenebilmesi için yumurtalar tepelerinden bir iğne yardımı ile delinmiş ve fiber optik prob bu delikten yumurta içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3.2 bu bağlamda kullanılan deneysel sistemi göstermektedir. Sistem içerisinde yumurtalarında dik durabilmesi amacıyla viyol kullanılmış ve dönme mekanizmasının engellenmesi amacıyla mikrodalga sistemin döner tablası deneyler sırasında çıkartılmıştır.



Şekil 3.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan ev tipi LG MS2022D model mikrodalga sistem ve kullanılan deneysel sistem

3.1.2 Radyofrekans Uygulama Amacıyla Gerçekleştirilen Deneysel Çalışmalar

Radyo frekans uygulama amacıyla 10 kW gücünde ve 27.12 MHz frekans değerinde çalışan Yumurta pastörizasyonunda dielektrik uygulama olarak adlandırılan ve mikrodalga sistem ile benzer çalışma prensibine sahip ancak mikrodalgaya göre daha

düşük frekans bant aralığında etki gösteren ve yine mikrodalga sisteme göre kat kat daha fazla nüfuz edebilme yeteneğine sahip radyo frekans sistem kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan 10 KW güç ve 27.12 MHz frekansta çalışan çapraz diziliimli silindirik elektrotlara sahip bir sistem kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Deneysel çalışmalarda kullanılan radyo frekans sistem

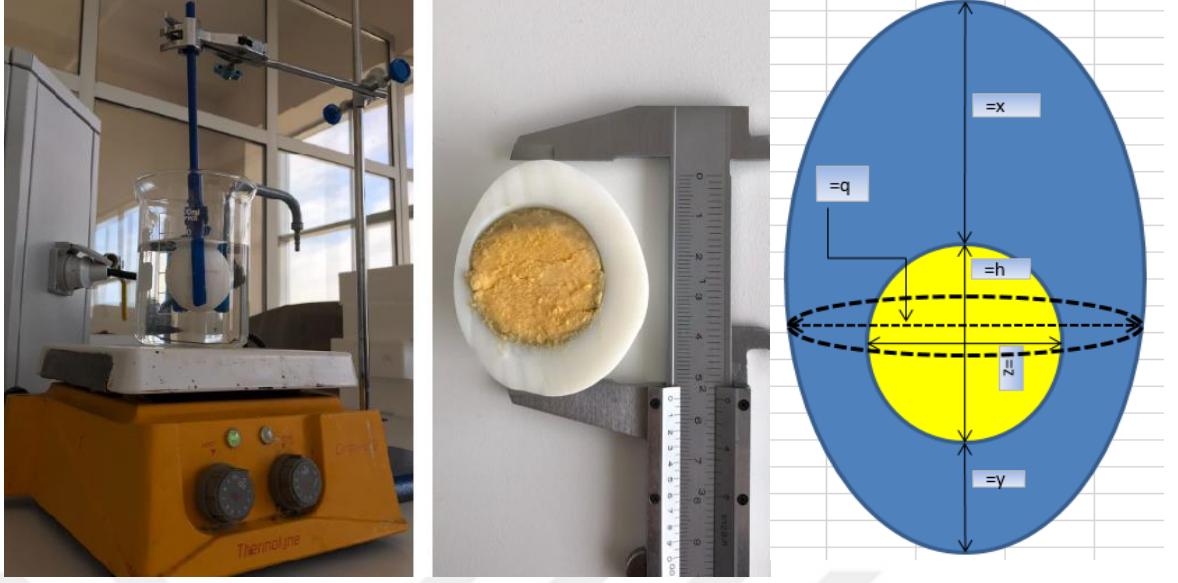
Radyo frekans uygulama sırasında yumurtaların sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla yine fiber optik problara kullanılmış olup, kullanılan deneysel sistem Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Fiber optik problemlerin yumurtaların içerisine yerleştirilmesi yukarıda mikrodalga uygulama deneylerinde açıklandığı şekilde yapılmıştır. Mikrodalga uygulama sırasında sadece 1 yumurta kullanılırken, radyo frekans uygulamada 1 ve 6 yumurtalı deneysel sistemlerde deneyler gerçekleştirilmiştir. 6 yumurta kullanıldığı durumlarda 2 yumurta içerisinden sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Model doğrulama çalışmaları için mikrodalga uygulamada 3 farklı deney yapılırken, radyo frekans uygulamada tek yumurta kullanıldığı durum için 3, 6 yumurta kullanıldığı durum için ise 2 adet deneysel çalışma yapılmıştır.

Mikrodalga ve radyo frekans ısıtma işlem deneylerinin tamamlanmasından sonra, matematiksel model çalışmalarında kullanılmak üzere yumurta geometrisinin hazırlanması için çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.1.3 Matematiksel Model Çalışmaları İçin Yumurta Geometrisinin Hazırlanması

Geliştirilen matematiksel modellerin deneysel veriler kullanılarak doğrulanması kapsamında yumurta geometrisinin doğru ve gerçeğe en yakın şekilde hazırlanması önemli bir noktadır. Bu nedenle yumurta sarısının ve beyazının geometrik ölçüleri ve yumurta sarısının yumurta içerisindeki yerinin bilinmesi amacıyla deneysel çalışmalarda kullanılan yumurtalar öncelikle kaynatılmıştır. Bu işlem sırasında yumurta sarısının ürün içerisindeki yerinin değişmediği varsayımı yapılmıştır. Şekil 3.4 bu kapsamda yapılan deneysel sistemi ve kaynatılmış yumurtadan elde edilecek geometrik ölçümleri göstermektedir.

Deneysel çalışmaların modelleme çalışmalarıyla karşılaştırılmasında verilerin doğru girilmesi son derece önemlidir. Bu sebeple proses sonrası yumurtalar en, boy, çap ve yumurta kabuğu kalınlığı ölçümü için beher içerisinde kaynatılmıştır. Kaynatılan yumurtaların fiziki ölçümleri yapılmış ve modelleme çalışmalarında bu ölçüler kullanılmıştır. Kullanılan yumurtalarda yumurta kabuk kalınlığı 0.55 mm ve yumurta sarısının çapı da ortalama olarak 3.2 cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.4 Proses sonrası kaynatılıp kumpas yardımıyla fiziksel (sarı ve beyaz için) boyutların belirlenmesi

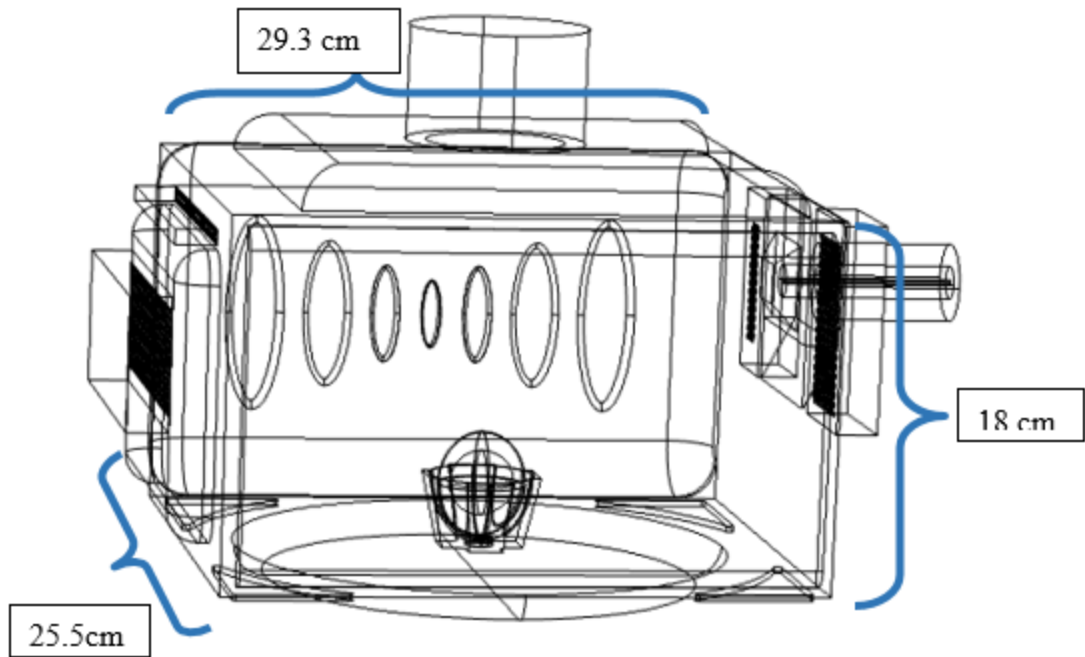
3.2 Matematiksel Modelleme Çalışmaları

Matematiksel model geliştirme amacıyla sonlu eleman yöntemine dayalı çoklu fizik programı Comsol V5.3a (Comsol AB, Stockholm, Sweden) yazılımı kullanılmış olup bu kapsamda model geliştirmeye çalışmaları kapsamında öncelikle sistem (mikrodalga ve radyo frekans) geometrileri oluşturulmuş, ürün ısı ve fiziksel özellikleri belirlenmiş (bu bağlamda literatür değerleri kullanılmıştır), sınır ve deneysel verilere bağlı olarak başlangıç koşulları tanımlanmış ve ağ yapısının oluşturulmasıyla uygun çözücüler kullanılarak modeller hazırlanmıştır.

Yapılan modelleme ve doğrulama çalışmalarında; mikrodalga sistem ve radyofrekans sistem için sıcaklık dağılımının analizi amacıyla sistemlerin kavite, magnetron, dalga kılavuzu geometrisinin fiziksel ölçüleri belirlenmiş ve bu değerler Comsol çoklu fizik programına aktarılmıştır. Daha sonra ürünün fiziksel özellikleri, sınır ve başlangıç koşulları, ağ yapısı ve kavite içindeki elektromanyetik alan dağılımı belirlenerek çözümleme yapılmıştır.

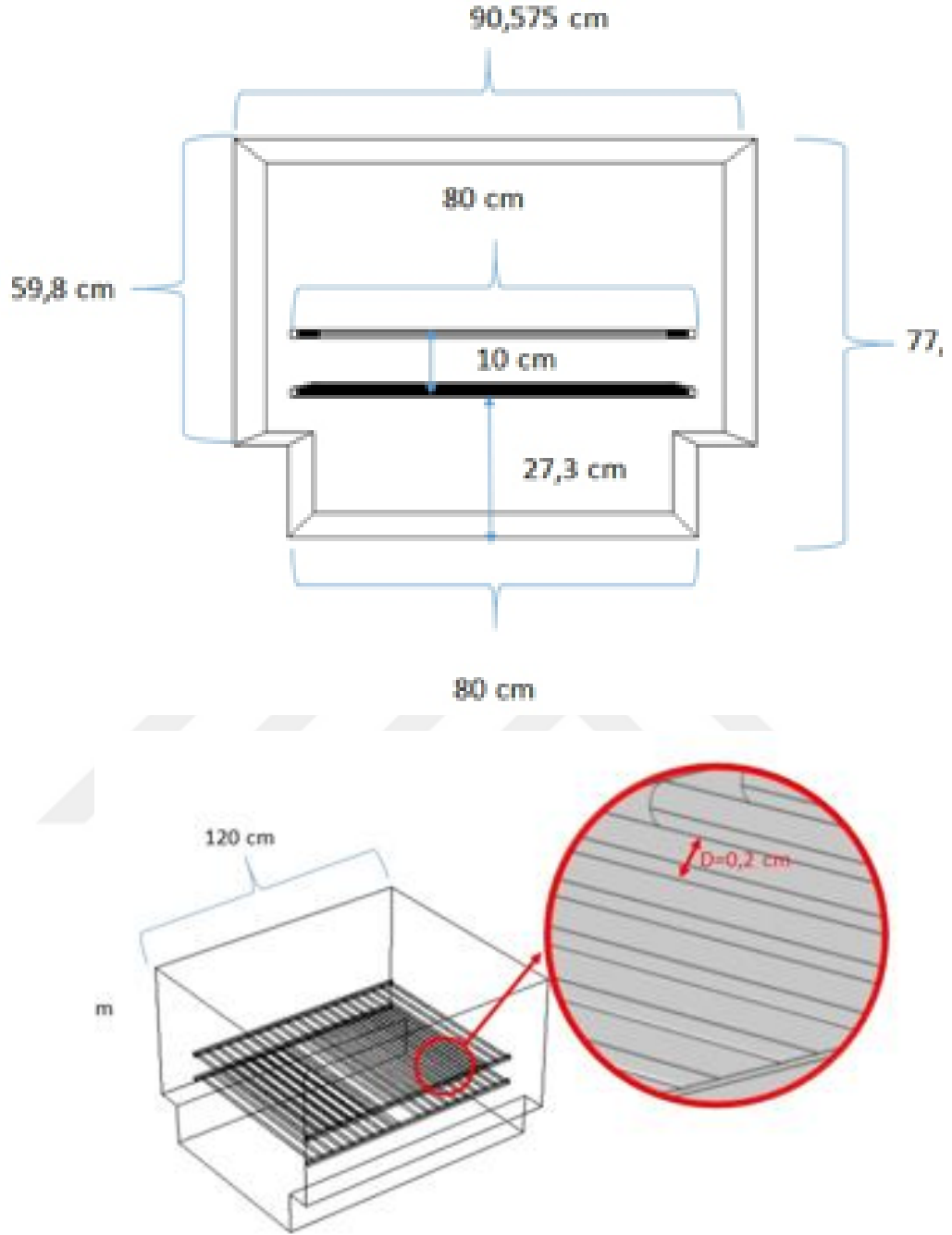
3.2.1 Mikrodalga ve radyo frekans sistem geometrisi

Mikrodalga sistem geometrisi 29.3 cm genişliğinde, 25.5 cm derinliğinde ve 18 cm yüksekliğinde bir kavite içermekte olup sistem içi elektromanyetik alan dağılımının doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla bütün sistem özellikleri gerçeğiyle birebir olmak üzere tanımlanmıştır. Şekil 3.5 bu bağlamda hazırlanan sistem geometrisini göstermektedir.



Şekil 3.5 Deneysel çalışmada kullanılan mikrodalga sistem modeli

Radyo frekans sistem geometrisi ise şekil 3.6'da gösterilmiş olup genişliği 90.57 cm, uzunluğu 120 cm ve yüksekliği 77.8 cm'dir. Silindirik elektrot boyutları 80 cm olup alt ve üst elektrot arası boşluk maksimum 20 cm'dir. Deneysel çalışmalar sırasında elektrotlar arası boşluk 8 cm olarak kullanılmıştır. Elektrotların her birinin yanal boşluğu ise 2 cm'dir.



Şekil 3.6 Deneysel çalışmada kullanılan radyo frekans fırının sistem modeli

Hazırlanan model sistemler kapsamında ağ yapısının oluşturulmasında öncelikle Nyquist eşitliğinden yararlanılmıştır:

$$S_{max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\mu\epsilon'}} \quad (3.1)$$

Nyquist eşitliğinde; (λ) metre cinsinden dalga boyunu, (c) ışık hızı (m/s), (f) frekans değerini (Hz), (μ') bağıl geçirgenlik değerini ve (ϵ') dielektirik sabitini ifade edilmektedir. Bu eşitliğe göre, ağ yapısı içeriğinde maksimum hücre boyutunun sistem içerisindeki dalga boyunun yarısından küçük olması gerekmektedir. Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan mikrodalga ve radyo frekans sistemlerdeki ağ yapısının fiziksel özellikleri çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.2 Matematiksel model çalışmalarında mikrodalga ve radyo frekans sistemlerde kullanılan ağ yapısı özellikleri

Sistem	Ağ yapısı özellikleri		
Mikrodalga sistem	Dörtgen element sayısı	269196	
	Üçgen element sayısı	38345	
	Kenar element sayısı	3079	
	Köşe element sayısı	279	
	Sistem hacmi (cm ³)	17810	
Radyofrekans sistem		Tekli yumurta	Altılı yumurta
	Dörtgen element sayısı	758623	1011350
	Üçgen element sayısı	57160	110258
	Kenar element sayısı	6528	9890
	Köşe element sayısı	394	524
	Ağ hacmi (cm ³)	904800	

Çizelge 3.2’de belirtilen verilere kullanılarak mikrodalga ve radyo frekans sistemlerde kullanılan ağı meydana getiren hücrelerin ortalama boyutu denklik 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Hücreboyutu} = \sqrt[3]{\frac{\text{Ağ hacmi}}{\text{Element sayısı}}} \quad (3.2)$$

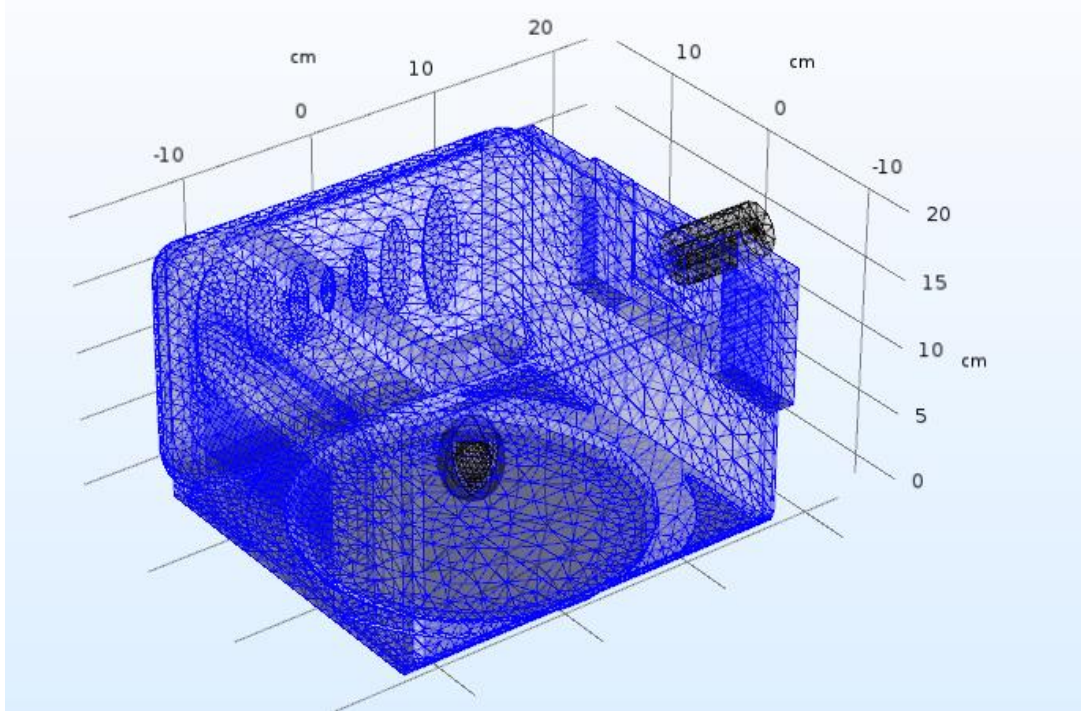
Bu kapsamda mikrodalga sistem için hücre boyutu = $\sqrt[3]{\left(\frac{17810}{269196}\right)}$ eşitliğinden 0.40 cm, radyo frekans sistem için ise, tekli ve altılı yumurta deneysel koşulları için sırasıyla ortalama olarak 1.06 cm ve 0.96 cm olarak hesaplanmıştır. Ancak yumurta içerisi ve çevresinde çok daha küçük ağ yapısı özellikle kullanılmıştır. Nyquist eşitliğine (Denklik

3.1) göre (aşağıda da açıklanacağı şekilde yumurta beyazının ortalama dielektrik sabiti 2450 MHz’de 60 ve 27.12 MHz’de 80 kabul edilerek) kullanılması gereken hücre boyutları 0.0079 ve 0.61 m olarak belirlenmiştir:

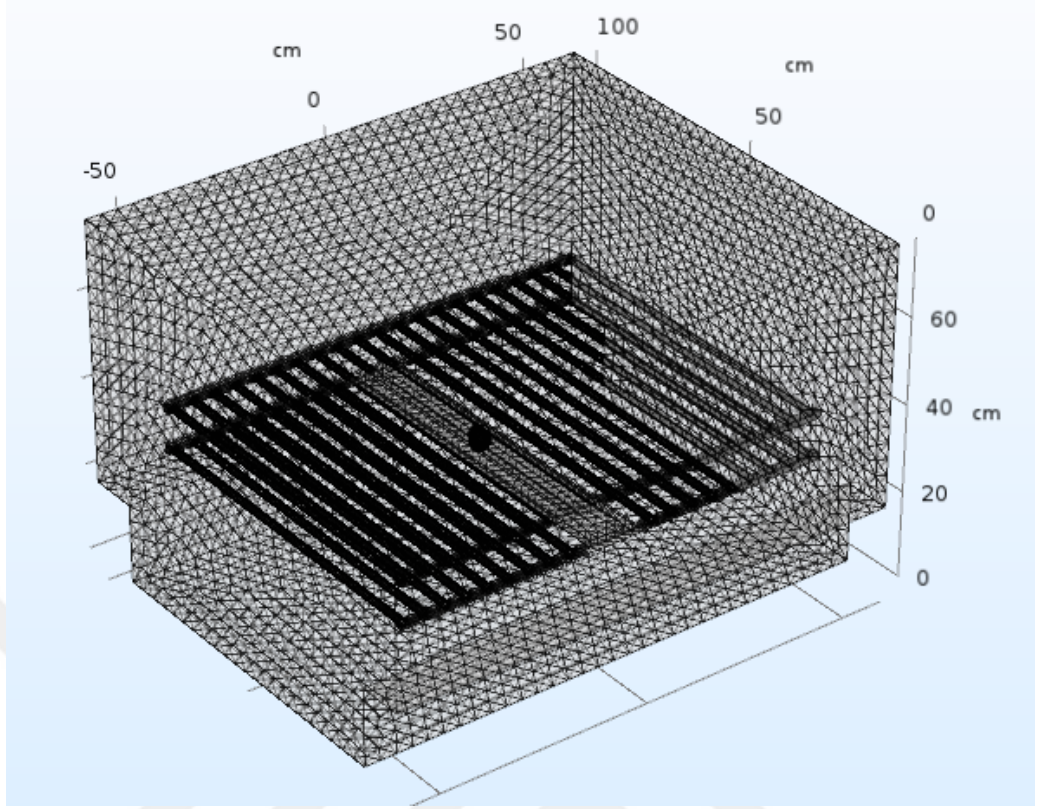
$$\frac{c}{2f\sqrt{\mu'\epsilon'}} = \frac{2999792458}{2*2450000000\sqrt{60*1}} = 0.0079 \text{ m}$$

$$\frac{c}{2f\sqrt{\mu'\epsilon'}} = \frac{2999792458}{2*27120000\sqrt{83*1}} = 0.61 \text{ m olarak hesaplanmıştır.}$$

Bu bağlamda Çizelge 3.2’de belirtilen ağ yapısı özelliklerinden de anlaşılacağı üzere elektromanyetik alan dağılımının doğru olarak belirlenebilmesi amacıyla son derece yoğun bir hesaplamalı geometri kullanılmıştır. Yoğun ağ yapısı kullanımı yumurta içi sıcaklık değişimlerinin de doğru olarak belirlenmesi amacıyla özellikle seçilmiş olup, Şekil 3.7 ve 3.8 kullanılan ağ yapılarını mikrodalga ve radyo frekans sistemler için göstermektedir.



Şekil 3.7 Mikrodalga uygulamada kullanılan ağ yapısı



Şekil 3.8 Radyo frekans sistem için kullanılan ağ yapısı

3.2.2 Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan denklıklar

Mikrodalga uygulama model çalışmalarında, sistem geometrisi içerisindeki elektromanyetik alan dağılımını, uygulanan ısı işleme bağlı olarak ürün sıcaklık değişimini hesaplamak amacıyla elektromanyetik dalga modülü, ısı transferi modülü ve laminar akış modülü kullanılmıştır. Radyo frekans uygulamasında ise elektrostatik modülü, ısı transferi modülü ve laminar akış modülü kullanılmış olup sistem geometrisi-konfigürasyonu, ürün fiziksel boyut geometrisi ve dielektrik özellikleri de göz önüne alınarak çözülmesi gereken denklıklar aşağıda verilmiştir:

Isı transferi denklığı:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\alpha \cdot \nabla T) + \frac{Q_{abs}}{\rho \cdot c_p} \quad (3.3)$$

Bu denklikte ρ ısıtılan ürünün yoğunluğunu $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$, c_p ısı kapasitesini $\left(\frac{J}{kg-K}\right)$, α ısı yayılım katsayısını $\left(\frac{m^2}{s}\right)$, t zamanı (s), T sıcaklığı (K), ve Q_{abs} elektriksel alanla oluşan ve ürün tarafından absorbe edilen enerjiyi $\left(\frac{W}{m^3}\right)$ göstermektedir.

$$Q_{abs} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot |\bar{E}|^2 \quad (3.4)$$

2'nolu denklikte, f frekansı, ε_0 serbest uzay geçirgenlik sabiti değerini $\left(8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}\right)$, ε ürünün dielektrik sabiti değerini, ε'' ürünün bağıl dielektrik kayıp faktörünü ve $|\bar{E}|$ ise elektriksel alan modülü değerini $\left(\frac{V}{m}\right)$ göstermektedir. Radyofrekans uygulamada elektriksel alan modül değerinin bulunması için gerekli denklik ise Maxwell denkliklerinin quasi-statik yaklaşımı ile elde edilecektir (Gauss kanunu):

$$\nabla(\varepsilon \cdot \bar{E}) = 0 \quad (3.5)$$

Radyofrekans sistemlerde kullanılan elektromanyetik dalgaların dalga boyu (27.12 MHz frekansında) $\sim 11m$ $\left(\lambda = \frac{2.9979 \times 10^8}{27.12 \times 10^6} = 11.05m\right)$ olduğundan ve RF sistem boyutuna göre çok büyük olduğundan Maxwell eşitlikleri manyetik alan etkisi ihmal edilerek sadece Laplace eşitliğine indirgenebilmektedir. Mikrodalga uygulamada ise 3.6 numaralı Maxwell eşitliğinin çözümüyle elektriksel alan değişimi elde edilecektir:

$$\nabla \left(\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \bar{E} \right) + \nabla^2 \bar{E} + k^2 \cdot \bar{E} = 0 \quad (3.6)$$

Bu denklikte k değeri dalga sayısını göstermektedir.

Maxwell eşitliğinin çözümünde; mikrodalga sistem için 2450 MHz frekans, Gauss denkliğinin çözümünde de radyofrekans sistem için 27.12 MHz frekans baz alınmıştır. Laminer akış modülü kapsamında kullanılan momentum ve süreklilik denklikleri ise aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + F + \rho g \\ \rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Bu denklikte ρ yoğunluğu (kg/m³), $\mathbf{u}$ hız profilini (m/s), p basınç değerini (Pa), μ viskozite değerini (Pa-s), ve g yerçekimi ivmesini (m/s²) göstermektedir. Yumurta içerisinde sarı ve beyaz bölümler için yoğunluk değişimlerine bağlı olarak doğal konveksiyonla ısı transferine bağlı sıcaklık değişimleri bu denklikler bazında elde edilmiştir. Yumurta sarısı radyo frekans uygulama çalışmalarında, yüksek viskozite değerine bağlı olarak katı kabul edilmiş ve sarı içerisinde meydana gelen hız değişimleri ihmal edilmiştir. Ancak, mikrodalga uygulama sırasında meydana gelen hızlı sıcaklık artışından dolayı, yumurta sarısı da sıvı kabul edilerek gerekli denklik çözümleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 Başlangıç ve sınır koşulları

Mikrodalga uygulamada, elektromanyetik alan dağılımının belirlenmesi amacıyla eş-merkezli port tanımlaması üzerinden zamana bağlı güç değişimleri (Şekil 3.1) uygulanırken, çapraz elektrot düzeneğine sahip radyo frekans sistemde alt elektrot grubuna potansiyel sınır koşulu tanımlanmıştır. 8 cm alt ve üst elektrot grubu uzaklığında gerçekleştirilen deneylerde uygulanan alt elektrot potansiyelleri 3500 V'dur. Mikrodalga sistemde kavite duvarları için mükemmel elektrik iletkenliği sınır koşulu kullanılırken (Denklik 3.8) radyo frekans sistemde üst elektrot grubu ve kavite duvarlarına topraklama sınır koşulu uygulanmıştır ($V=0$).

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (3.8)$$

Belirtilen sınır koşulları, mikrodalga uygulama için Topcam vd. (2020) ve radyo frekans uygulama için Altın vd. (2022) tarafından, detaylı olarak açıklanmıştır.

Isı transferi modülünde başlangıç koşulu olarak, deneysel verilerden elde edilen tekdüze sabit sıcaklık kullanılırken, yumurta yüzeyinde konveksiyon sınır koşulu uygulanmıştır:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\sigma} = h(T|_{\sigma} - T_{\infty}) \quad (3.9)$$

Konveksiyon sınır koşulunda ısı transfer katsayısı (h) 10 W/m²-K ve ortam sıcaklığı (T_{∞}) 20 °C olarak kullanılmıştır. Laminer akış modülünde yumurta kabuğu iç yüzeyine kaymama (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır. Mikrodalga uygulamada hem yumurta sarısı hem de yumurta beyazı akışkan olarak tanımlandığından, kaymama sınır koşulu sarı-beyaz ara yüzeyinde mikrodalga model çalışmalarında tanımlanmıştır. Sıvı – sıvı ara yüzeylerinde kaymama sınır koşulu uygulaması (akışkan ürünler birbirine karışmadığı sürece) Koplik ve Banavar (2006) tarafından da detaylı olarak açıklanmıştır. Aynı sınır koşulu, yumurta sarısının katı kabul edildiği, radyo frekans uygulamalarında da kullanılmıştır.

3.2.4 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan çözümleyiciler

Geliştirilen matematiksel modelleme çalışmalarında mikrodalga ve radyo frekans uygulamalarında, proses uyumlu olarak, zamana bağlı (transient) çözüm yapılmıştır. COMSOL yazılımı, sonlu element problemlerinde ortaya çıkan lineer denklemlerin çözümünde direkt ve yinelemeli yöntemler olarak adlandırılan 2 farklı algoritma kullanmaktadır. Direkt yöntemler LU ayrıştırması (Cholesky yöntemi) yöntemine dayanmakta olup PARDISO (Parallel Sparse Direct Solver), MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver) ve SPOOLES (SParse Object Oriented Linear Equations Solver) olmak üzere 3 farklı çözüm yaklaşımından oluşmaktadır. Bu çalışmada, elektromanyetik alan çözümü için MUMPS, ısı ve momentum transferi içinse PARDISO yöntemi kullanılmıştır. Radyo frekans uygulamada ise BiCGStab ve PARDISO çözümleyicileri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları HP Z800 model 90 GB RAM ve 2.4 GHz (çift) işlemci hızına sahip iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yatışkın olmayan koşullarda mikrodalga simülasyon çalışmaları ≈24 saatte radyo frekans simülasyonları ise ≈10 saatte tamamlanmıştır.

3.2.5 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan termofiziksel özellikler

Matematiksel model çalışmalarında kullanılan (yumurtanın) termal ve fiziksel özellik değerleri literatür verilerinden alınmıştır. Çizelge 3.3 ve 3.4’de yumurta ve içeriği için 2450 MHz ve 27.12 MHz frekansta kullanılan dielektrik özellikler (dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü) sıcaklığın fonksiyonu olarak verilmiştir. Yumurta sarısı, beyazı ve kabuğu için kullanılan ısıl iletkenlik katsayısı, ısı kapasitesi ve elektriksel iletkenlik değerleri ile yumurta kabuğu yoğunluk değeri ise Çizelge 3.5’de sunulmaktadır. Mikrodalga (yumurta beyazı ve sarısı) ve radyo frekans (yumurta beyazı) uygulama sırasında oluşan doğal konveksiyonla ısı transferine bağlı sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi için yumurta sarısı ve beyazı yoğunluk değişimleri sıcaklığın fonksiyonu olarak kullanılmıştır (Çizelge 3.6). Laminer akış modeli için ise yumurta beyazı (görünür) viskozite değeri sıcaklığın fonksiyonu olarak kullanılırken (Çizelge 3.6), yumurta sarısı (radyo frekans uygulamalarda) viskozitesi sıcaklık ve kesme hızının (s^{-1}) bir fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda yumurta sarısı viskozite değişimi denklik 3.10’da belirtildiği şekilde ifade edilmiştir:

$$\mu = m \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (3.10)$$

Çizelge 3.3 Mikrodalga uygulamada kullanılan yumurta içeriği (yumurta beyazı, sarısı ve kabuğu)’nin 2450 MHz frekanstaki dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (Lau 2016)

Sıcaklık (T-°C)	Yumurta beyazı		Yumurta sarısı		Yumurta kabuğu	
	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')
20	64.69	17.29	43.27	12.94	7.87	0.59
30	62.99	15.39	41.97	11.84	8.01	0.56
40	61.29	13.49	40.67	10.74	8.03	0.56
50	59.59	11.59	39.37	9.64	8.06	0.59
60	57.89	9.69	38.07	8.54	8.18	0.70
70	56.19	7.79	36.77	7.44	8.22	0.76

Çizelge 3.4 Radyo frekans uygulamada kullanılan yumurta içeriği (yumurta beyazı, sarısı ve kabuğu)'nin 27.12 MHz frekanstaki dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (Lau 2016)

Sıcaklık (T-°C)	Yumurta beyazı		Yumurta sarısı		Yumurta kabuğu	
	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')
20	82.27	512.81	49.58	172.05	12.39	12.07
30	81.37	641.31	53.25	250.07	13.18	15.90
40	79.94	828.61	55.64	280.45	13.56	17.90
50	79.21	909.01	54.04	321.90	14.63	21.73
60	82.06	1129.6	58.59	363.95	15.19	23.21
70	82.05	1177.4	57.39	453.82	15.21	27.30

Çizelge 3.5 Yumurta içeriği (yumurta beyazı, sarısı ve kabuğu)'nin ısı iletkenlik, ısı kapasitesi ve elektriksel iletkenlik değerleri (Lau 2016)

Isısal ve fiziksel özellikler	Yumurta beyazı	Yumurta sarısı	Yumurta kabuğu
Isıl iletkenlik – k (W/m-K)	0.54	0.35	0.68
Isı kapasitesi – c_p (J/kg-K)	3420	2500	900
Yoğunluk – ρ (kg/m ³)	-	-	2300
Elektriksel iletkenlik – σ (S/m)	0.62	0.35	0.9

Çizelge 3.6 Yumurta beyazı yoğunluk ve (görünür) viskozite değerleri ile yumurta sarısı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

Yumurta beyazı				Yumurta sarısı	
Sıcaklık (T-°C)	Yoğunluk – ρ (kg/m ³)	Sıcaklık (T-°C)	Viskozite - μ (Pa-s)	Sıcaklık (T-°C)	Yoğunluk – ρ (kg/m ³)
4	1038.77	4	0.028	4	1040.16
10	1038.12			10	1036.73
20	1035.86	25	0.020	20	1030.42
40	1026.90			40	1015.58
45	1023.74	55.6	0.017	45	1011.41
55	1016.30			55	1002.51

Çizelge 3.7 Yumurta sarısı viskozitesinin sıcaklık ve kesme hızının bir fonksiyonu olarak hesaplanması için gerekli parametreler (denklik 3.10)

Sıcaklık (T-°C)	m (Pa-s)	n
4	1.013	0.9324
25	0.437	0.8970
60	0.284	0.8777

Yumurta sarısının viskozite değerinin belirlenmesi için gerekli olan m - ve n - değerleri, sıcaklığın fonksiyonu olarak Çizelge 3.7’de verilmiştir. Yumurta sarısı ve beyazı viskozite değişimi Atılgan ve Unluturk (2008)’den alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

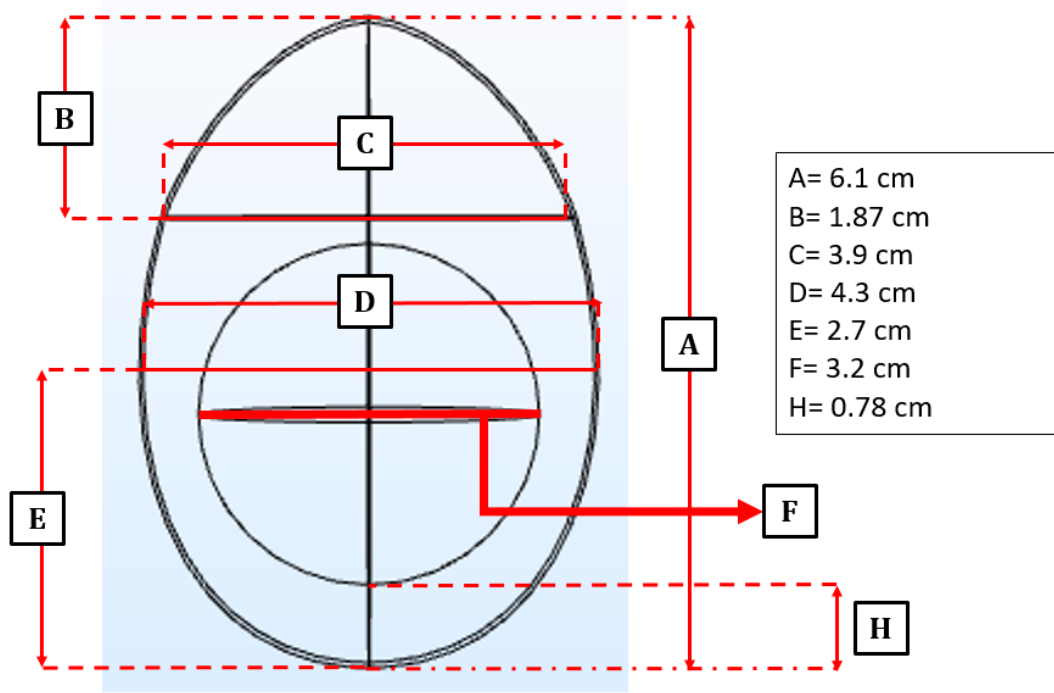
Mikrodalga uygulamada daha kısa dalga boyuna bağlı olarak ürün içerisindeki penetrasyon derinliğinin daha az ve lokal sıcaklık artışlarının düzensiz olması beklenirken radyo frekans uygulamada daha düşük frekansa bağlı olarak düşük güç absorpsiyonu ve uzun dalga boyundan dolayı tekdüze bir sıcaklık dağılımı beklenmektedir. Bu durum bütün yumurtalara ısıtma işlemi uygulaması açısından uygun olan bu iki yöntemin avantaj ve dezavantajlarını gözler önüne sermektedir. Bu doğrultuda çalışmanın öncelikli amacı laboratuvar ölçekli sistemlerde matematiksel model geliştirilmesi, geliştirilen modellerin deneysel veriler kullanılarak doğrulanması ve bu model çalışması temelinde endüstriyel ölçekli proses tasarımı amacıyla gerekli altyapının oluşturulmasıdır.

Materyal ve yöntem bölümünde de açıklandığı şekilde, kabuklu bütün yumurtalardaki mikrodalga ve radyo frekans uygulama sırasında ürün sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla COMSOL yazılımı kullanılmış ve model sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması ile model doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

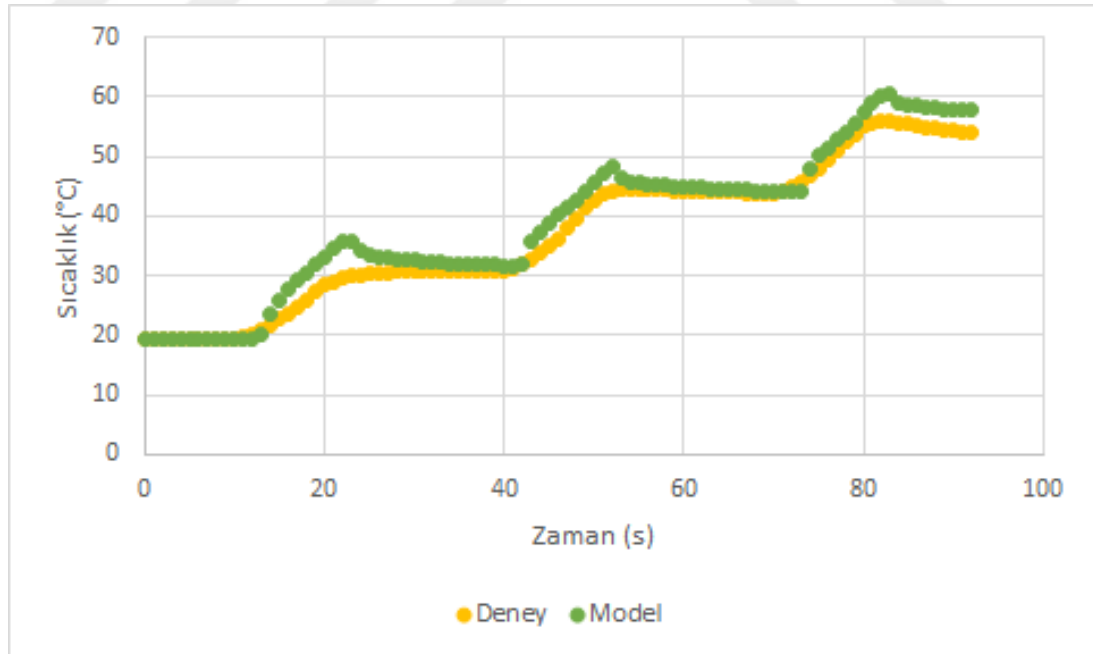
4.1 Mikrodalga Uygulama Sonuçları

4.1.1 Mikrodalga uygulama için matematiksel model sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

Mikrodalga uygulama kapsamında, kullanılan mikrodalga sistemin (Şekil 3.2) çözündürme güç modu kullanılarak 3 farklı deney yapılmıştır. Çözündürme moduna göre daha düşük bir güç seviyesi olan 70 W uygulama çok uzun sürdüğü için (deneysel çalışmalarda) tercih edilmezken 350 W uygulama ise lokal sıcaklık artışlarına bağlı olarak yumurtaların patlama riski olduğu için kullanılmamıştır. Ancak 70 W ve 350 W güç uygulamasının sonuçları, deneysel olarak doğrulanmış model kullanılarak gösterilmiştir. Mikrodalga çözündürme uygulamasında, deneysel çalışmalarda kullanılan, yumurtaların boyutları Şekil 4.1’de verilmiş olup Şekil 4.2’de de model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Yapılan deneylerin hepsinde fiber optik, yumurta tepe noktasından (merkez eksen üzerinde) 3.7 cm derinliğe yerleştirilmiştir.

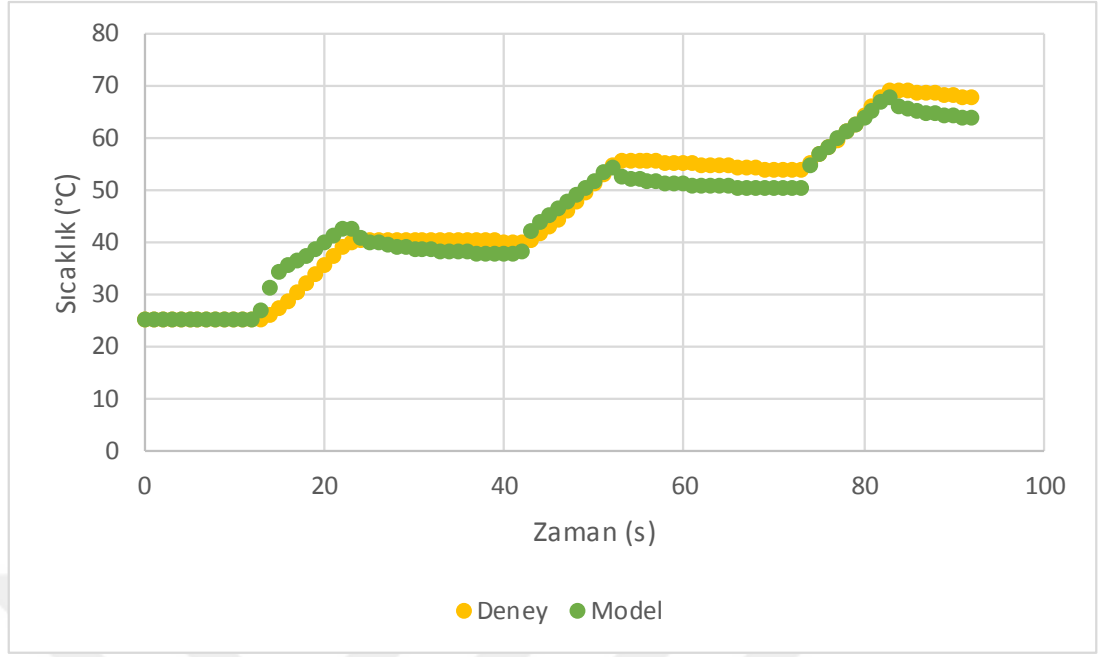


Şekil 4.1 Mikrodalga uygulamada çözündürme güç döngüsü deneysel çalışmalarında kullanılan yumurtaların boyutları

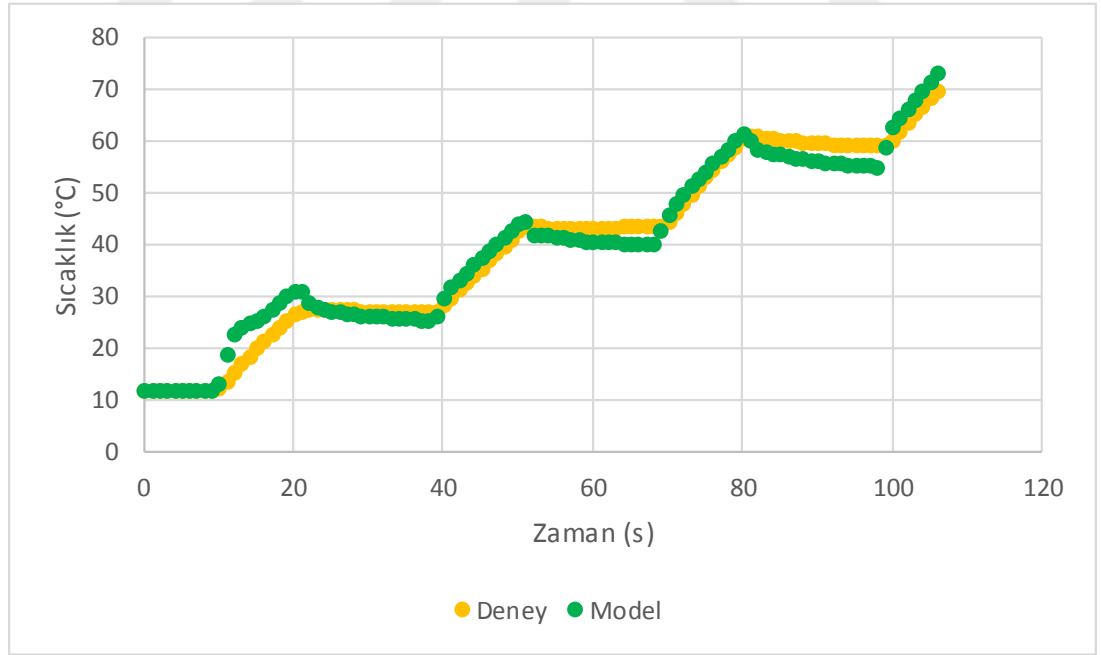


(a) Deney-1

Şekil 4.2 Matematiksel model ve (mikrodalga çözündürme döngüsünde elde edilen) deney sonuçlarının karşılaştırılması (a) Deney-1, (b) Deney-2, (c) Deney 3



(b) Deney-2



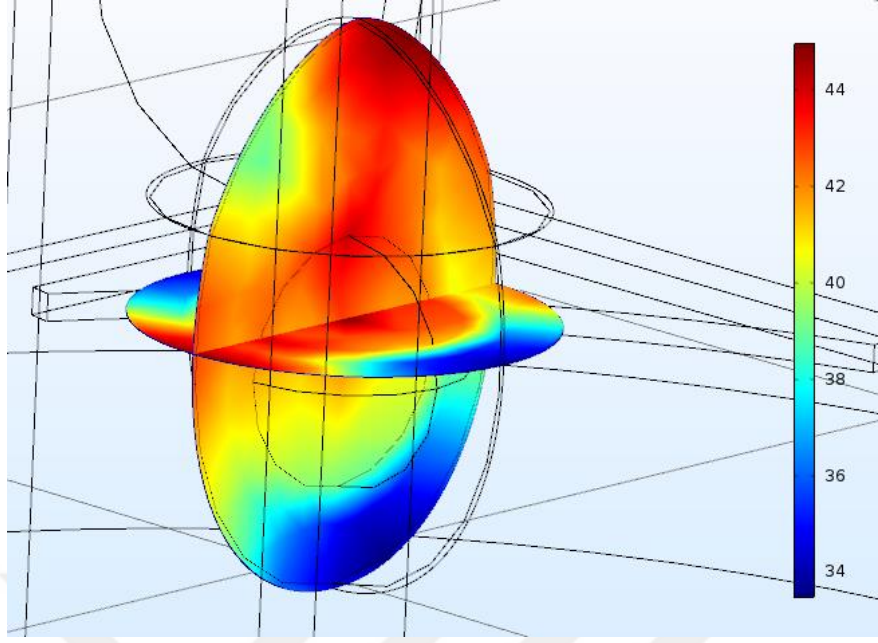
(a) Deney-3

Şekil 4.2 Matematiksel model ve (mikrodalga çözdürme döngüsünde elde edilen) deney sonuçlarının karşılaştırılması (a) Deney-1, (b) Deney-2, (c) Deney-3 (devam)

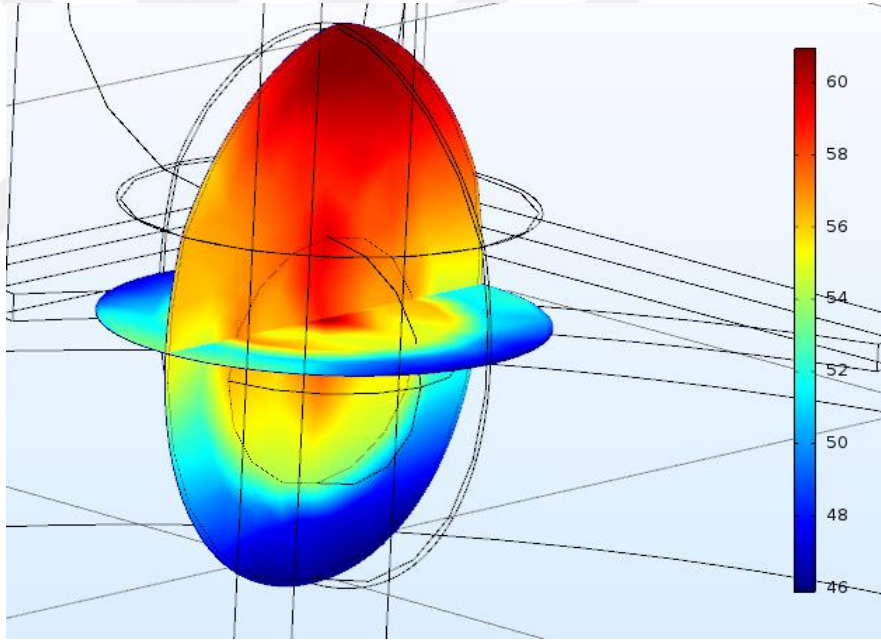
Şekil 4.2’de gözlendiği şekilde geliştirilen matematiksel modelden elde edilen sonuçlar mikrodalga sistem çözündürme modu kullanıldığında yumurta içerisinde elde edilen sıcaklık değişimi ile uyum göstermektedir. Model – deney sonuçları karşılaştırılması kapsamında RMSE (denklik 4.1) değerleri ise sırasıyla 2.59, 2.94 ve 2.69 °C olarak hesaplanmış olup bu değerlerin düşük olması da model – deney sonuçları uyumunu göstermektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{model} - T_{deney})^2} \quad (4.1)$$

Lokal olarak elde edilen model doğrulama sonuçlarının yanı sıra yumurta içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve yumurta sarısı ve beyazı sıcaklık değişimi mikroorganizma aktivasyonu açısından önemli olan faktörlerdir. Deney-3’den elde edilen yumurta içi (xy ve zx orta kesitlerinde) sıcaklık dağılımı proses süresine bağlı olarak Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Bu şekilde de gözlendiği gibi yumurta içerisinde önemli bir sıcaklık dağılımı meydana gelmektedir. Yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ise Şekil 4.4a’da verilirken yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi Şekil 4.4b’de gösterilmiştir.

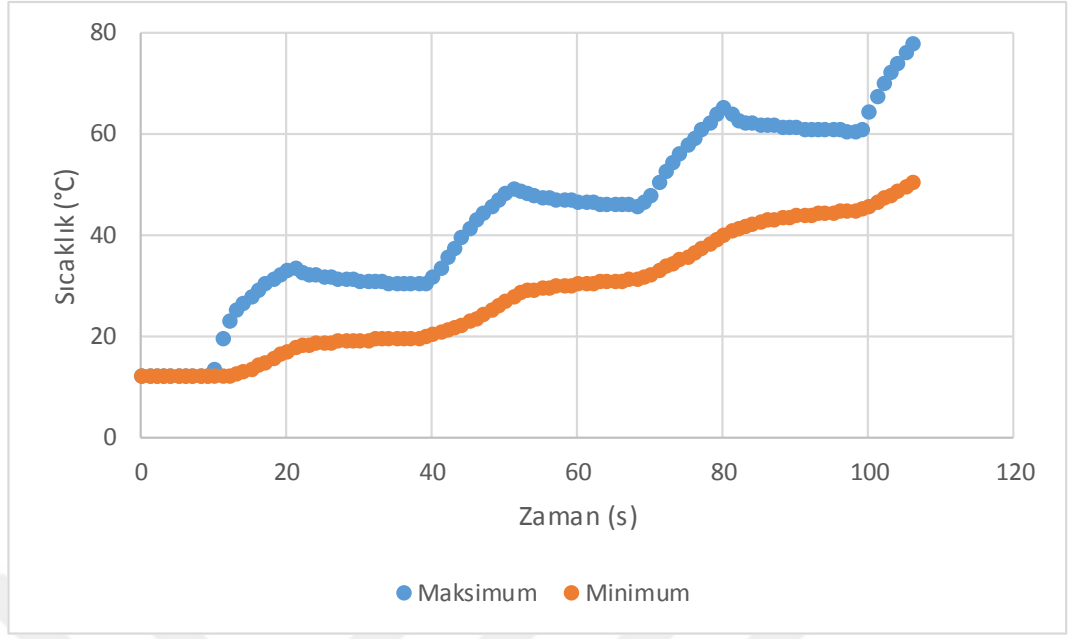


(a) 51 s

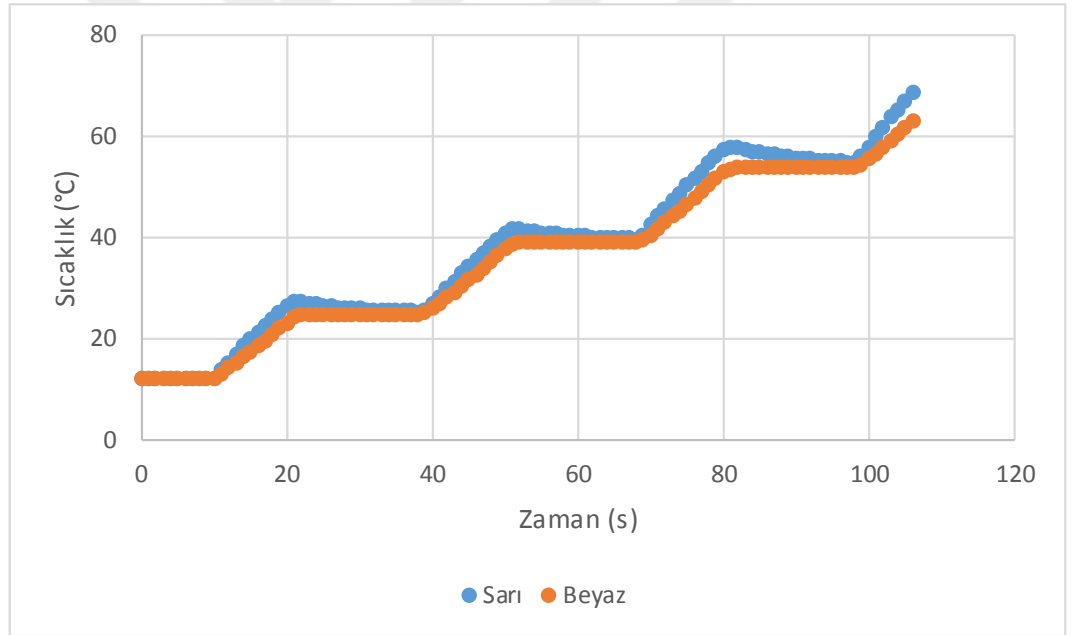


(b) 99 s

Şekil 4.3 Yumurta içi (xy ve zx orta kesitlerinde) sıcaklık dağılımının proses süresine bağlı olarak değişimi (a) 51 s, (b) 99 s (Deney-3)



(a)

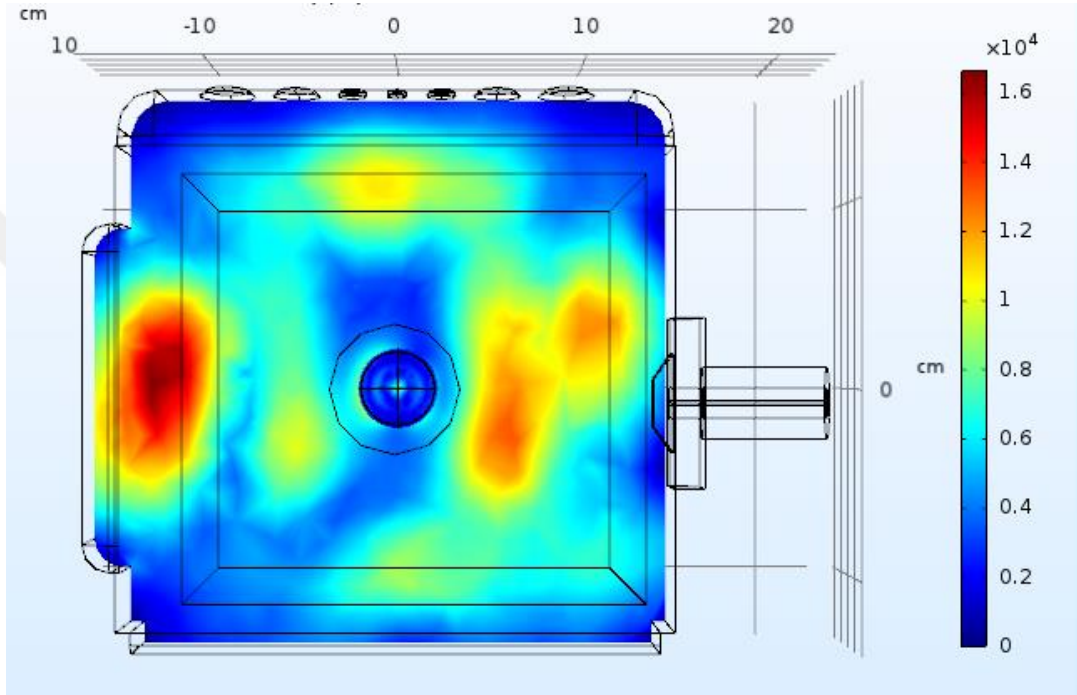


(b)

Şekil 4.4 (a) Yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi (Deney-3)

Şekil 4.4’de gözlemlendiği gibi yumurta sarısı ile beyazı arasında, hacimsel ortalama sıcaklık değişimi açısından, proses süresince, mikrodalga penetrasyon derinliği ve doğal konveksiyonla gerçekleşen ısı tranferine bağlı olarak önemli bir sıcaklık farkı gözlenmezken (Şekil 4.4b), yumurta içerisindeki lokal maksimum ve minimum sıcaklık

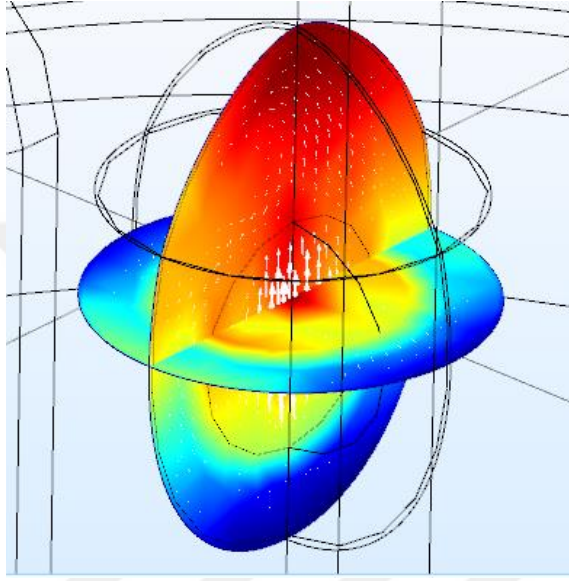
bölgeleri arasında önemli bir fark meydana gelmektedir. Bu durum, özellikle mikrodalga sistem ve yumurta içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı ile açıklanabilir. Şekil 4.5 mikrodalga sistem ve yumurta içerisinde oluşan elektrik alan dağılımını (V/m, xy kesiti, yumurta tepe noktasından 3.7 cm alt noktada) göstermektedir.



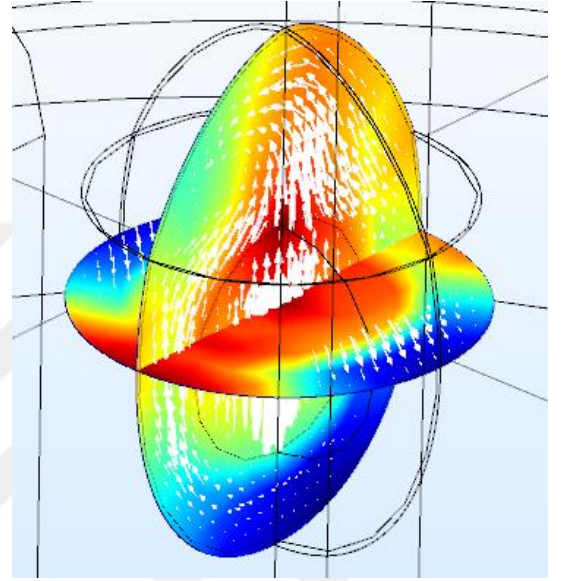
Şekil 4.5 Mikrodalga sistem ve yumurta içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı (V/m, xy kesiti, yumurta tepe noktasından 3.7 cm alt noktada – Deney-3)

Şekil 4.5’de gözlendiği gibi sistem içerisinde önemli bir elektrik alan dağılımı ortaya çıkarken yumurta içerisinde göreceli olarak daha tekdüze bir dağılım elde edilmektedir. Yukarıda da açıklandığı üzere bu durum yumurta dielektrik özellikleri ve penetrasyon derinliği kavramı ile açıklanabilmektedir. Ancak, yumurta içerisinde de özellikle merkez bölgesinde diğer bölgelere göre daha yüksek bir elektrik alan oluşumu bulunmaktadır. Yumurta sarısı ile beyazında oluşan doğal konveksiyon hız profili ise Şekil 4.6’da verilmiştir. Doğal konveksiyonla oluşan hız profilinin de yumurta sarısı ve beyazı arasında önemli bir sıcaklık farkı meydana gelmemesinde oynadığı rol bu şekilde

gösterilmiştir. Doğal konveksiyon mekanizması özellikle mikrodalga sistemin güç döngüsünün “dur” bölgesinde önemli bir etkinlik göstermektedir. Şekil 4.6’da gösterilen 99 s’den sonra magnetron durmakta ve “dur” sürecinde önemli bir doğal konveksiyonla meydana gelen hız profili ortaya çıkmaktadır.



(a) 99 s

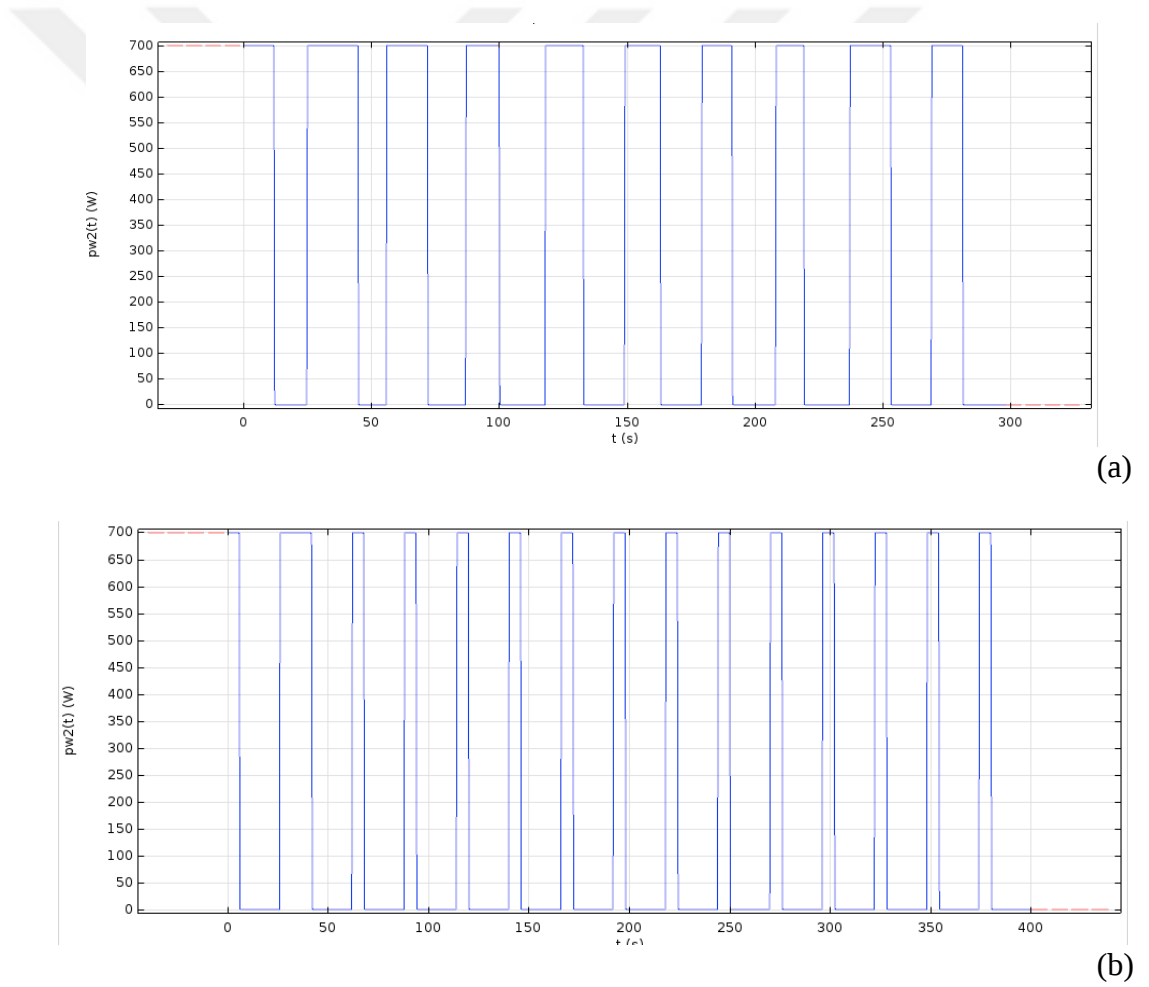


(b) 106 s

Şekil 4.6 Yumurta içi (xy ve zx orta kesitlerinde) sıcaklık dağılımı ve doğal konveksiyonla ısı transferine bağlı olarak oluşan hız profili (a) 99 s, (b) 106 s (Deney-3)

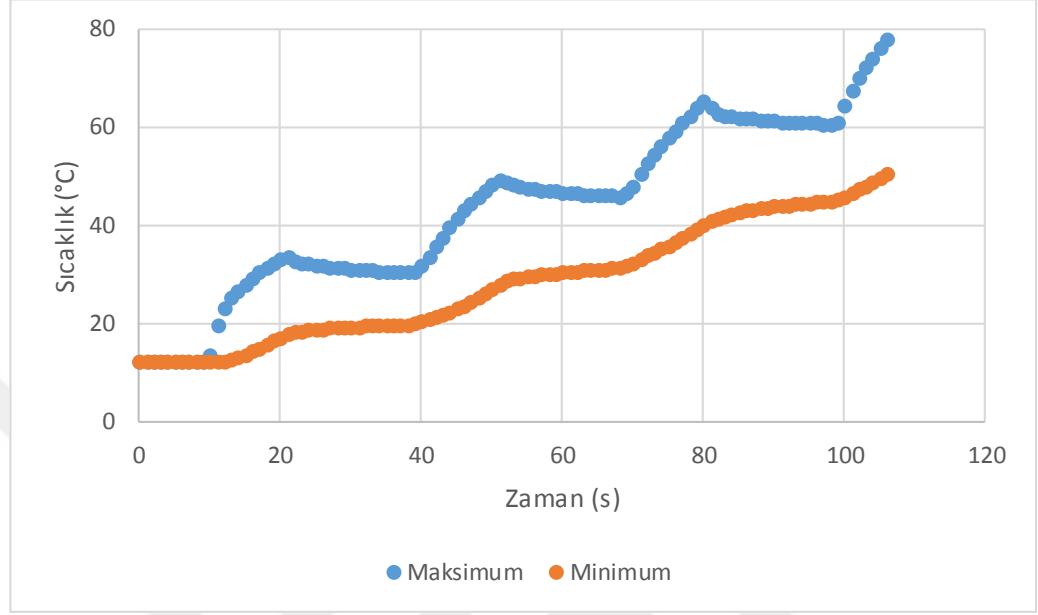
4.1.2 Mikrodalga uygulama için farklı güç uygulamalarının ürün sıcaklık değişimine etkisi

Model doğrulama çalışmalarına ek olarak, mikrodalga sistem uygulama gücünün ürün sıcaklık değişimine etkisini göstermek amacıyla, Deney-3'den elde edilen başlangıç koşulu ve yumurta boyutları kullanılarak 2 ayrı simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda 350 W (çözdürme güç döngüsünün üstü) ve 70 W (çözdürme güç döngüsünün altı) güç sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Şekil 4.7a-b, 350 ve 70 W güç değerinde kullanılan güç döngüsünü göstermektedir.

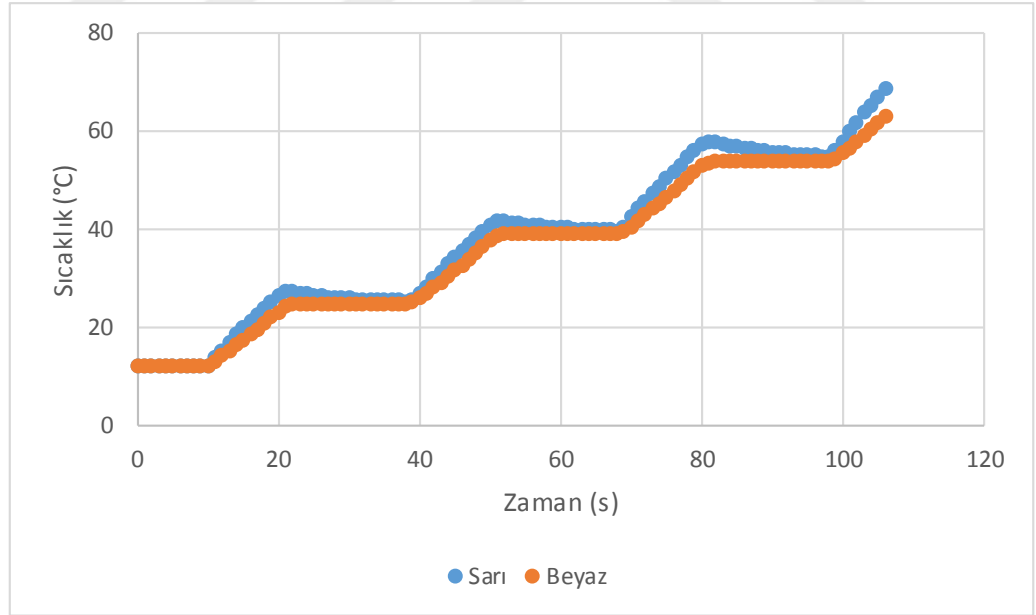


Şekil 4.7 (a) 350 W ve (b) 70 W güç değerinde kullanılan güç döngüleri

350 W güç döngüsü uygulanması durumunda yumurta içi maksimum – minimum sıcaklık değişimi ve aynı şekilde yumurta sarısı ve beyazının sıcaklık değişimleri Şekil 4.8’de verilmiştir.



(a)



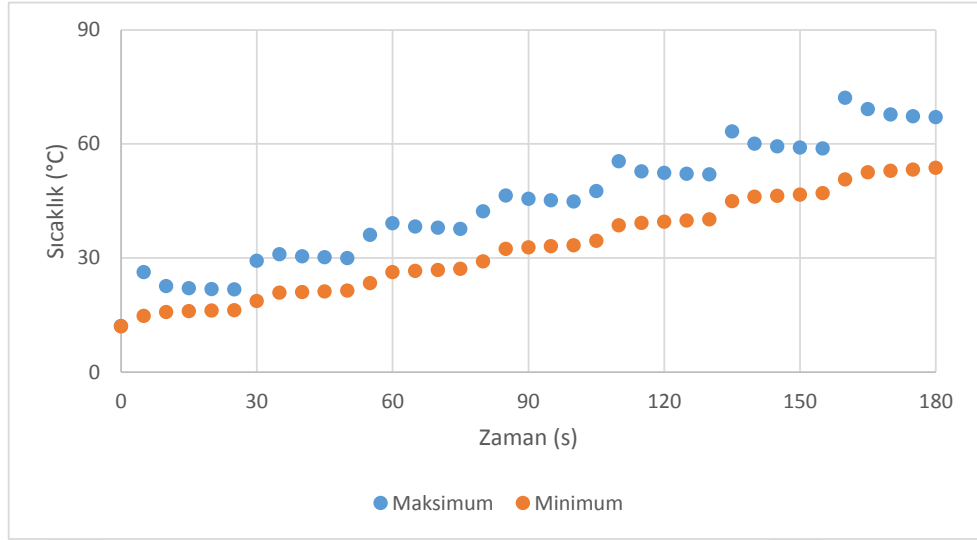
(b)

Şekil 4.8 350 W güç döngüsü uygulanması durumunda (a) yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi

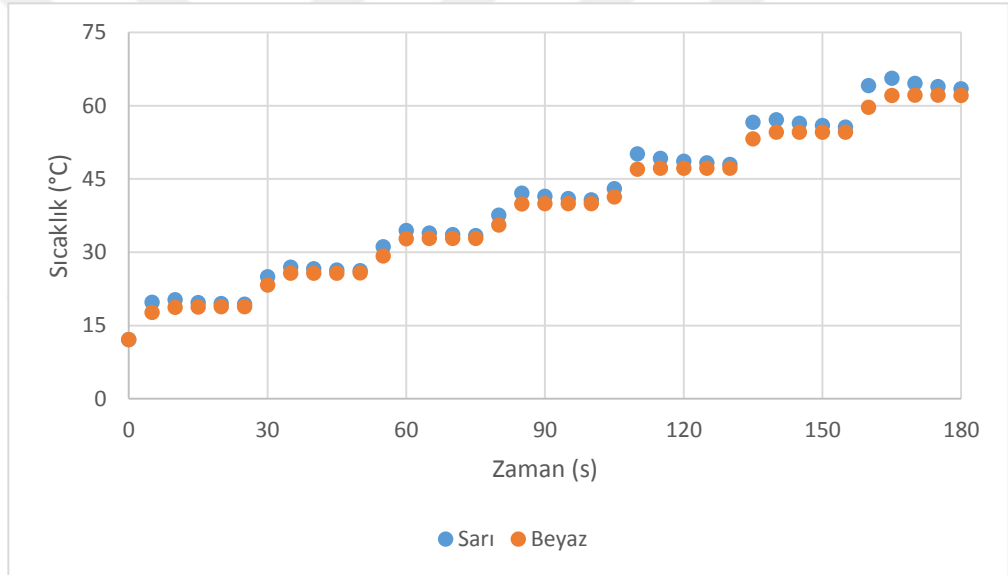
Şekil 4.8a’da gözlemlendiği şekilde yumurta içerisinde yüksek sıcaklığa ulaşan nokta 80 s içerisinde 60 °C üzeri bir sıcaklığa ulaşmaktadır. Yumurta içerisinde 57 °C’nin üzerinden itibaren koagülasyon –denatürasyon başlayacağından bu durum ürün kalitesi açısından problem yaratacak bir proses koşulu olarak kabul edilmektedir. Bobus-Alkaya vd. (2016) tarafından da belirtildiği gibi yumurta albumeninde literatürde 60-65 °C aralığı olarak verilen denatürasyon başlangıç noktası 60 °C’nin altında da olabilmektedir. Albumenin (yumurta beyazı) fiziksel özelliklerinin değişmeden kaldığı sıcaklık derecesi ise USDA tarafından 55.6 °C olarak belirtilmektedir (Bobus-Alkaya vd. 2016). Çözdürme güç döngüsünde gözlenen yumurta sarısı ve beyazı sıcaklık değişimlerinin benzer olması durumu 350 W uygulamada da gözlenmiştir (Şekil 4.8b).

70 W güç döngüsü uygulanması durumunda yumurta içi maksimum – minimum sıcaklık değişimi ve aynı şekilde yumurta sarısı ve beyazının sıcaklık değişimleri ise Şekil 4.9’da gösterilmiştir. 350 W uygulama durumunda yumurta sarısı ve beyazı ortalama sıcaklık değerlerinin 60 °C sıcaklığa ulaşması 80 s sürerken, 70 W uygulamada bu süre 150 s’ye çıkmıştır. Daha önceki model doğrulama (çözdürme döngüsü) ve 350 W uygulamalarında gözlemlendiği şekilde yumurta sarısı ve beyazı arasında önemli bir sıcaklık farkı gözlenmemiş olup (Şekil 4.9b), yumurta içi maksimum sıcaklık değişimlerinde de 350 W uygulamaya göre daha ılımlı bir artış gözlenmiştir.

Üç farklı güç döngüsü kapsamında verilen bu sonuçlar yumurta pastörizasyonu amacıyla mikrodalga uygulamasının ürün içi sıcaklık değişimi kapsamında dikkatli bir şekilde planlanması gerektiğini göstermektedir.



(a)



(b)

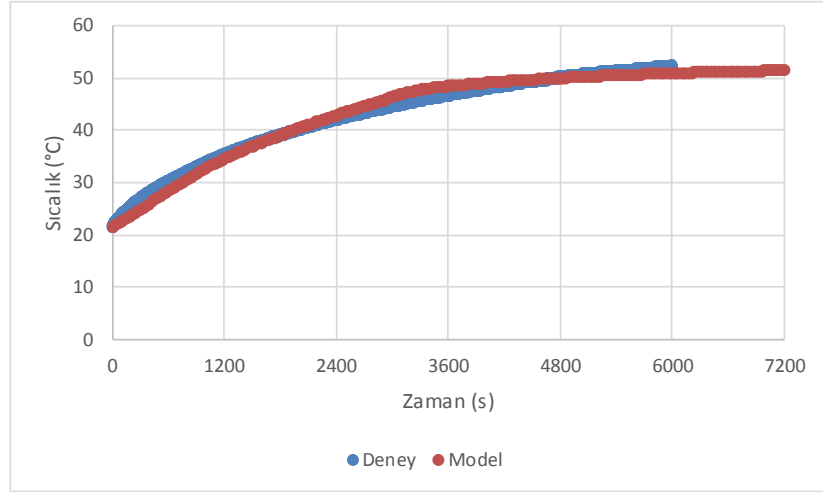
Şekil 4.9 70 W güç döngüsü uygulanması durumunda (a) yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi

4.2 Radyo Frekans Uygulama Sonuçları

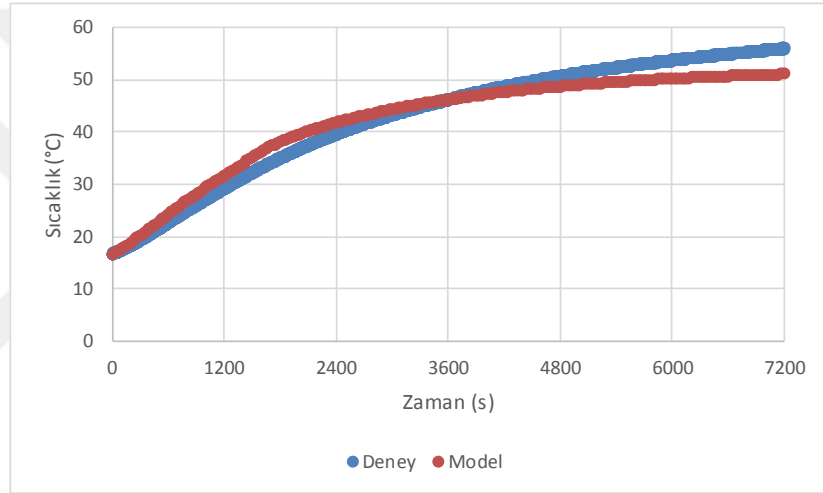
4.2.1 Radyo frekans uygulama için matematiksel model sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

Radyo frekans uygulama kapsamında, kullanılan sistemde (Şekil 3.3), elektrotlar arası uzaklık 8 cm olduğu durumda (alt elektrota uygulanan potansiyel 3500 V) 2 farklı

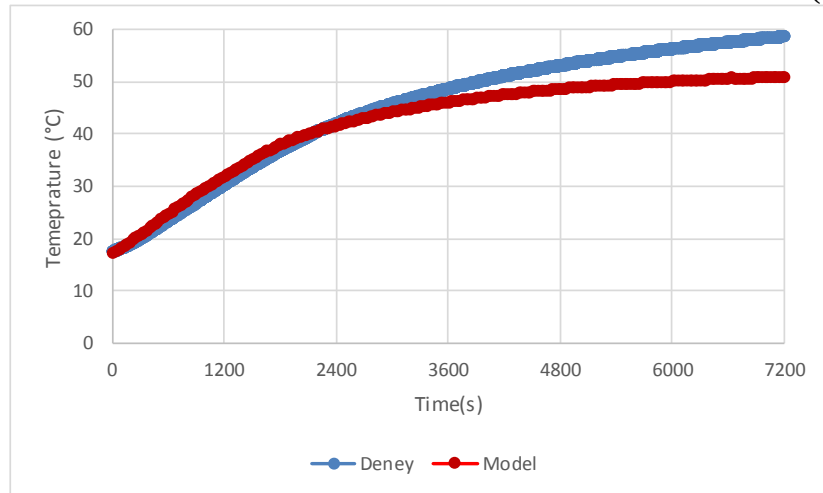
deney çalışması yapılarak model validasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta tek bir yumurta, ikinci grupta ise 6 yumurta birlikte radyo frekans sistem içerisinde ısıtılma işlemi tabii tutulmuştur. Deneylerde kullanılan yumurtaların boyutları Şekil 4.1’de verilmiştir. Her iki durumda da fiber optik probun yumurta tepesi noktasından, merkezi çizgisi üzerinde, 3.17 cm derinliğe yerleştirilmiştir. Birinci grupta gerçekleştirilen 3 ayrı deneyden elde edilen sonuçların model sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre RMSE (Denklik 4.1) değerleri sırasıyla 1.82, 2.55 ve 3.66 °C olarak belirlenmiştir. Model sonuçları ile deneysel sonuçları arasında bir uyum gözlenmekle birlikte, model sonuçlarının prosesin ilerleyen sürelerinden deneysel verilerden sapma eğilimi gösterdiği de Şekil 4.10b-c’de görülmektedir. Bu durum, uzun süren prosese bağlı olarak fiber optik probun yerinin oynaması sonucu deneysel hataya bağlı olarak ortaya çıkabileceği gibi dielektrik özelliklerin farklı olmasına da bağlı olabilir. Ayrıca elektrostatik yaklaşımla uygulanan ısıtılma mekanizması da ürün bazında doğru bir yaklaşım olmayabilir. Yumurta sarısının radyo frekans uygulamalarda, yavaş ısınma ve sınırlı sıcaklık artışına bağlı olarak viskozite değişiminin de mikrodalga uygulamada gözlenen duruma göre sınırlı olmasına bağlı olarak, katı kabul edilmesinin de bu sonuçta etken bir rol oynadığı düşünülmektedir. Radyo frekans uygulama sürecinde sistem içerisinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı Şekil 4.11’de, ürün sıcaklık dağılımı (Deney-3 model sonuçlarına göre) Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Yumurta sarısı ve beyazının sıcaklık değişimi ile hacim içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklık değişimleri ise Şekil 4.13a-b’de verilmiştir. Şekil 4.11’de görüldüğü şekilde ürün içerisinde tekdüze bir elektrik potansiyel dağılımı elde edilirken, bu durum mikrodalga uygulamada olduğu gibi yumurta sarısı ve beyazı ortalama sıcaklık değerlerinin benzer şekilde artmasını sağlamıştır (Şekil 4.13b). Ancak, ürün içerisinde çok yüksek sıcaklığa sahip, özellikle ürün alt yüzeyine yakın lokasyonlarda gözlenmiştir. Alt elektroda potansiyel uygulanması ve ürünün alt elektroda çok yakın olması da bu durumda etkili olmuştur.



(a) Deney-1



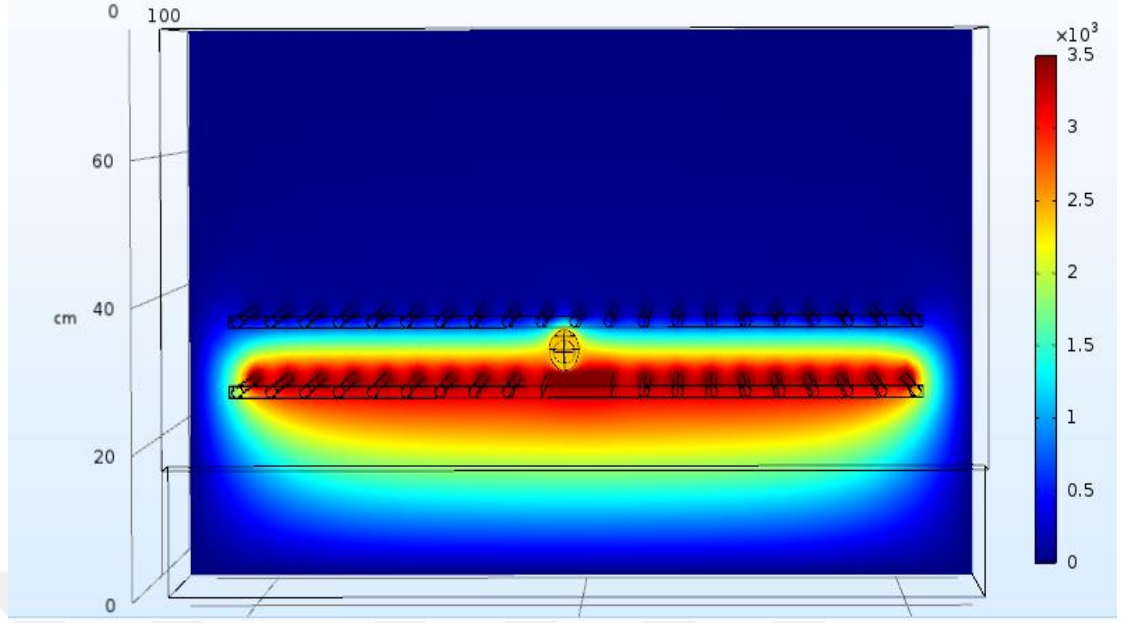
(b) Deney-2



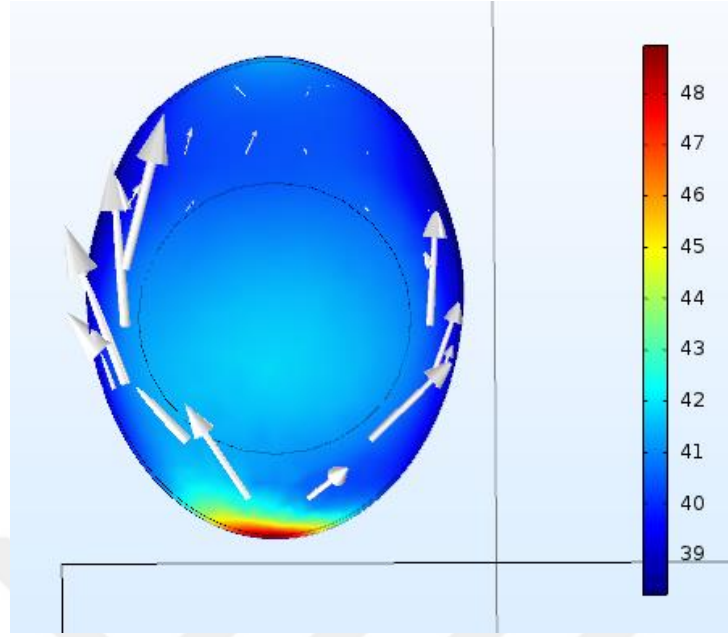
(c) Deney-3

Şekil 4.10 Radyo frekans uygulama sonucunda tek yumurta kullanılarak elde edilen deney sonuçlarının matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılması

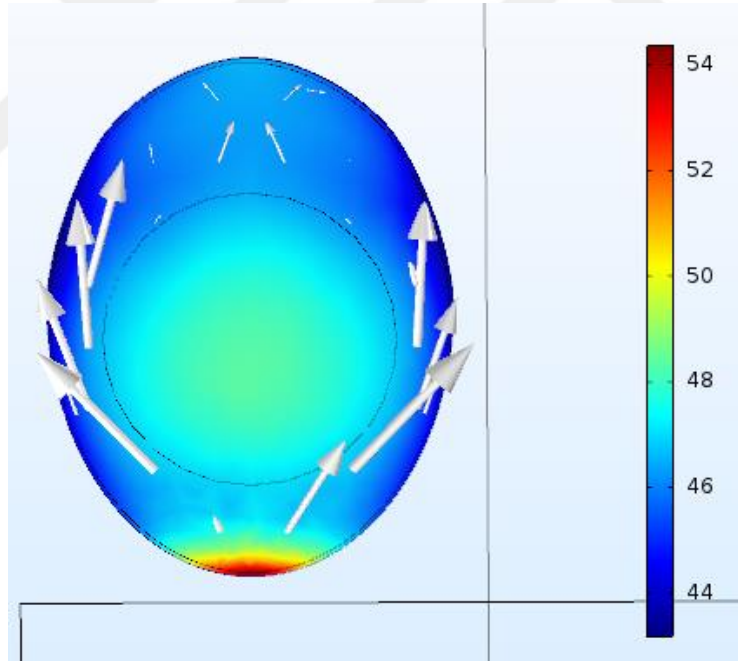
(a) Deney-1, (b) Deney-2, (c) Deney-3



Şekil 4.11 Radyo frekans sistem zx kesiti ve yumurta içerisinde oluşan elektrik potansiyel dağılımı (V – Deney-3)

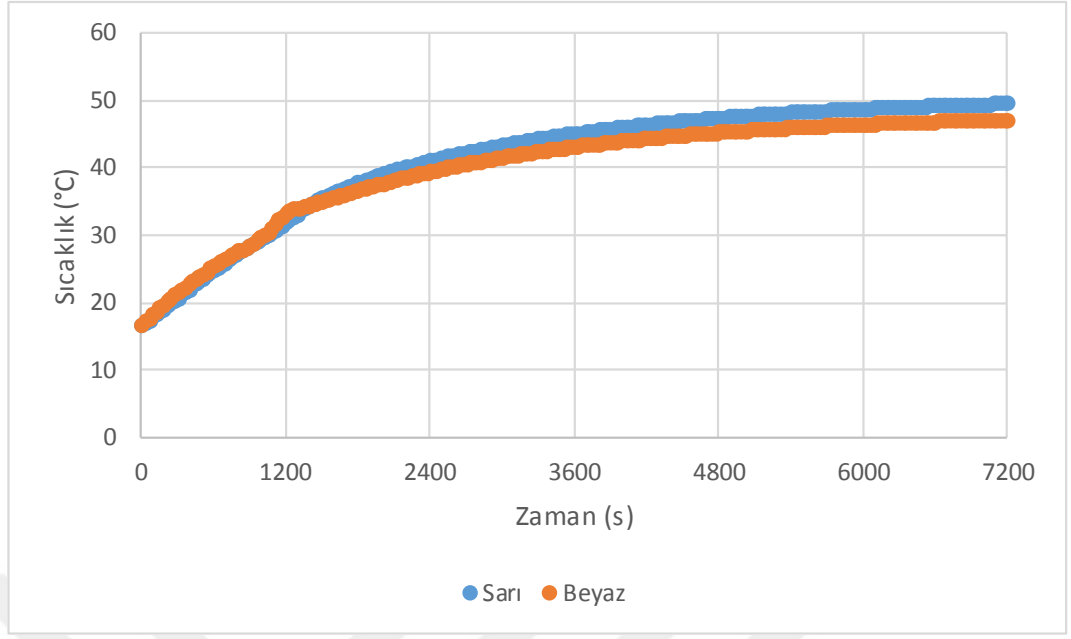


(a) 3000 s

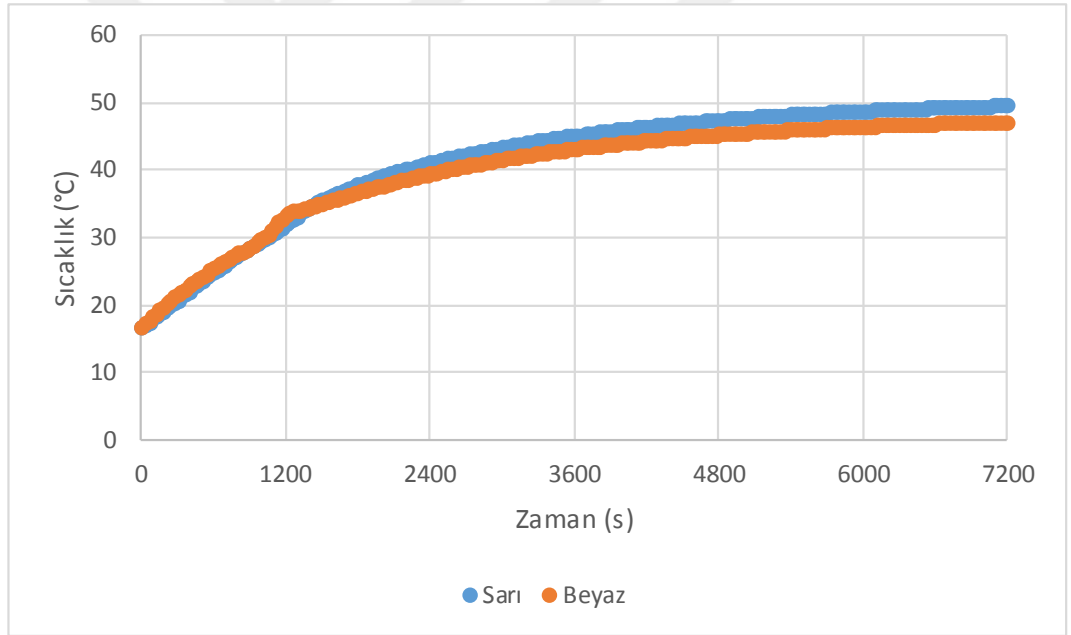


(b) 5100 s

Şekil 4.12 Yumurta içi (zx orta kesitinde) sıcaklık dağılımı ve yumurta beyazında doğal konveksiyonla ısı transferine bağlı olarak oluşan hız profili (a) 3000 s, (b) 5100 s (Deney-2)

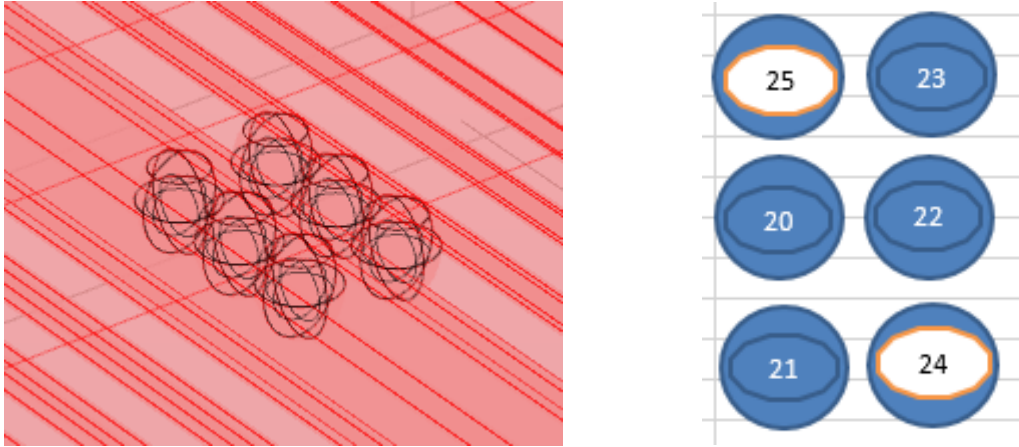


(a)



(b)

Şekil 4.13 Radyo frekans uygulama sırasında (a) yumurta içerisindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değişimi ve (b) yumurta sarısı ve beyazı hacimsel ortalama sıcaklık değişimi (Deney-2)

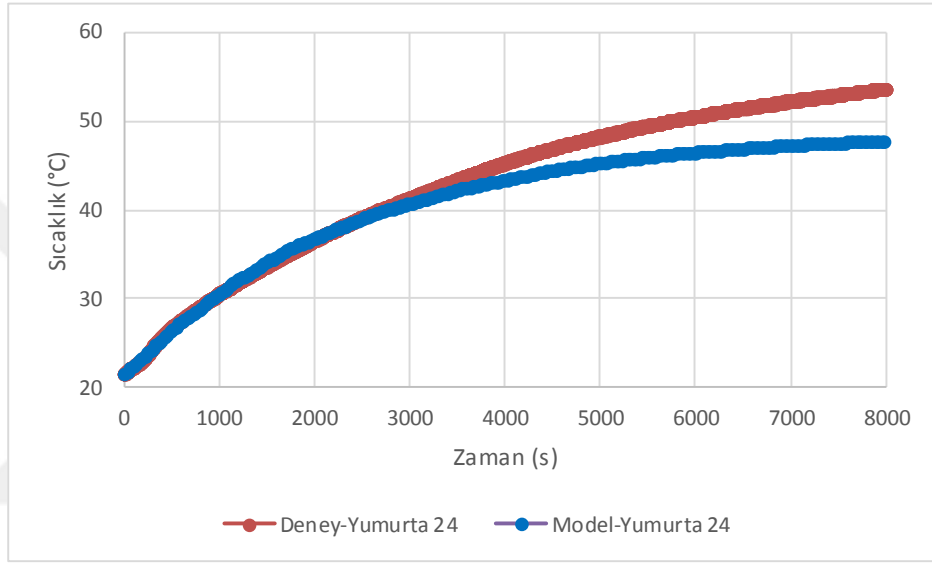


Şekil 4.14 Radyo frekans uygulama sırasında 6 yumurta kullanılan deneyde yumurtaların sistem içerisinde dizilişi

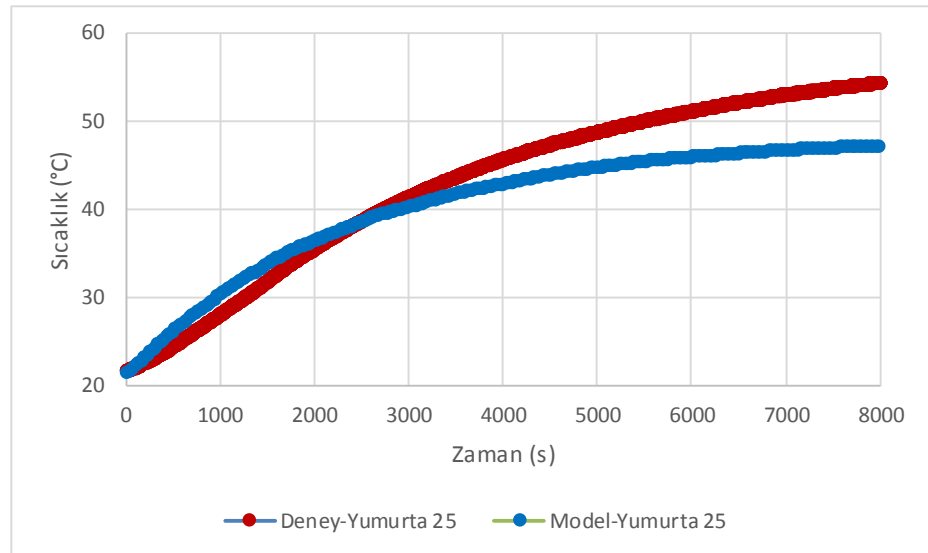
Model doğrulama çalışmalarının ikinci aşamasında 6 yumurta birlikte radyo frekans sistem içerisinde ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda bir adet deney yapılmış olup (Deney 4), deney sırasında yumurtaların sistem içerisinde dizilişi Şekil 4.14’de ve bu deney sonuçları ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Bu bağlamda 24 ve 25 numara ile adlandırılan yumurtalara fiber optik prob lar, yine tepe noktalarından 3.17 cm derinlikte olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 4.19’da gösterilen model – deney karşılaştırılması kapsamında RMSE değerleri (Denklik 4.1) sırasıyla 2.88 ve 3.89 °C olarak hesaplanmıştır.

Sistem içerisinde simetrik olarak meydana gelen elektrik potansiyel dağılımına bağlı olarak 24 – 25 ve 21 – 23 (Şekil 4.14) numaralı yumurtalarda benzer bir sıcaklık değişimi elde edilebilecektir. Şekil 4.16 prosesin 7200. s’de elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu şekilden de anlaşılabileceği üzere altı yumurta kullanılması durumunda, yumurta dizilişine de bağlı olarak ürünler arasında mükemmel bir simetri profili elde edilmiştir. Ayrıca, 24-25 ve 21-23 numaralı yumurtalarda elde edilen sıcaklık artışının da benzer olduğu bu şekilde net olarak gözlenmektedir. Ancak, 20 ve 22 numaralı yumurtalarda sıcaklık artışı diğerlerine göre daha sınırlı olarak elde edilmiştir. Yumurta örneklerinin xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı Şekil 4.17’de gösterilmiş olup, bu şekilde 20 ve 22 numaralı yumurtalarda oluşan elektrik alanının diğerlerine göre daha düşük olduğu net olarak

belirlenmiştir. Gerçekleştirilen model doğrulama çalışmalarının sonuçlarına göre, yumurta diziliminin radyo frekans uygulamada önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, uygulanan potansiyel değeri (3500 V)'nin düşük olmasına bağlı olarak proses sürelerinin, endüstriyel bir uygulama için çok uzun olduğu da gözlenmiştir. Bu bağlamda proses süresinin kısaltılması ve dizilişe bağlı olarak sıcaklık tekdüzelığının sağlanması amacıyla ekstra simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

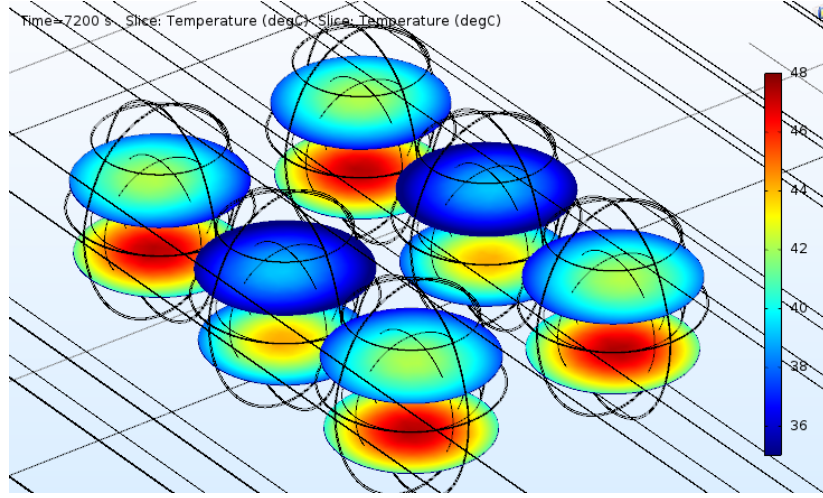


(a) Yumurta-24

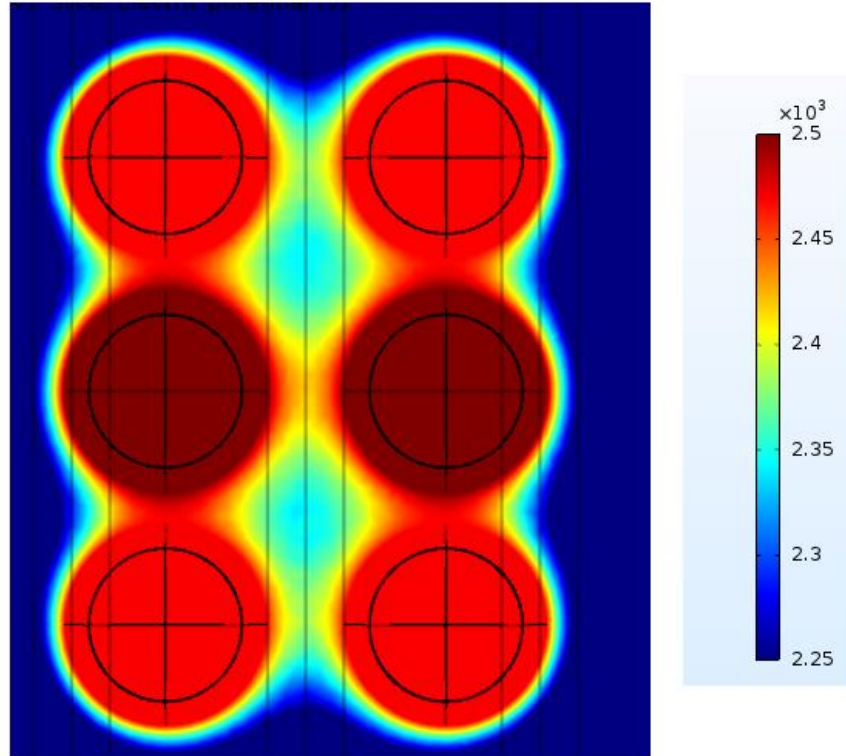


(b) Yumurta -25

Şekil 4.15 Radyo frekans uygulama sonucunda altı yumurta kullanılarak elde edilen deney sonuçlarının, Şekil 4.14'de verilen dizilişe göre (a) Yumurta-24, (b) Yumurta-25 için matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılması



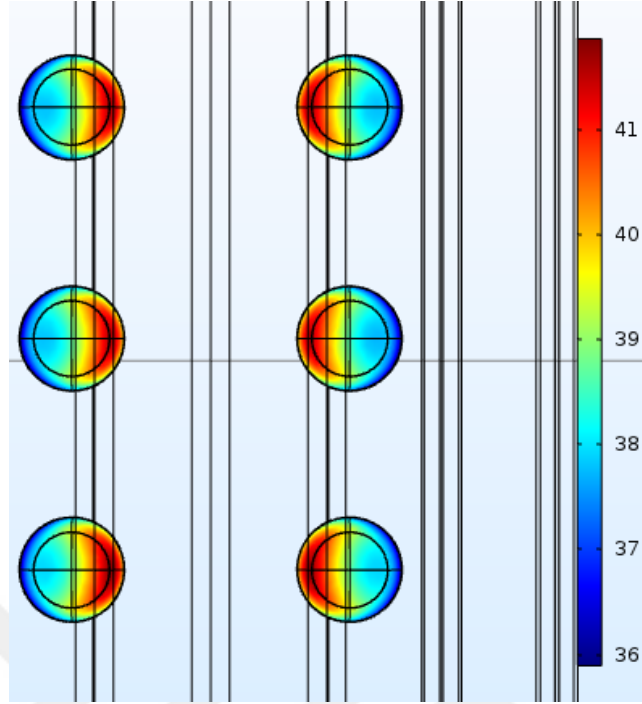
Şekil 4.16 Altı yumurtalı dizilişte radyo frekans uygulama sırasında prosesin 7200. s’de elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı



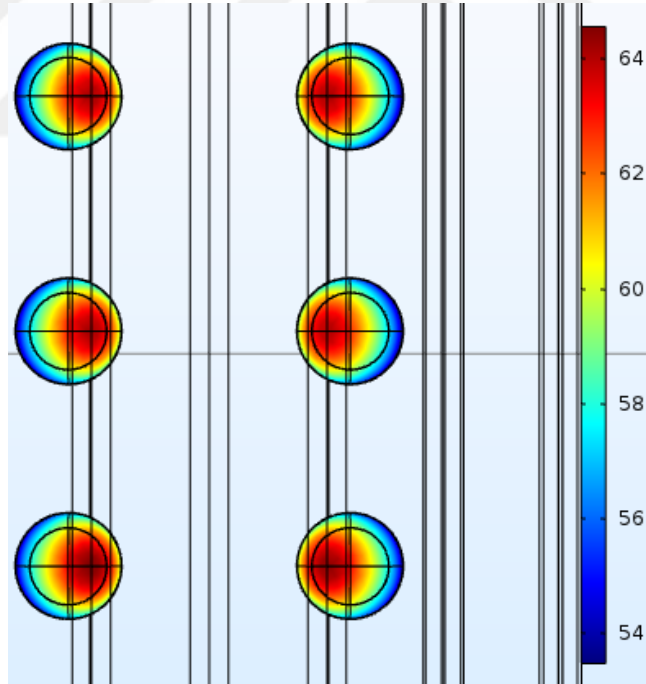
Şekil 4.17 Yumurta örneklerinin xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı

4.2.2 Radyo frekans uygulama için farklı potansiyel ve yumurta diziliş uygulamalarının ürün sıcaklık değişimine etkisi

Bu kapsamda iki simülasyon çalışması yapılmıştır. Birinci uygulamada yumurtalar arası uzaklık arttırılmıştır. Bu simülasyon çalışmasında Şekil 4.14’de gösterilen dizilime bağlı olarak yumurtalar arası uzaklık iki katına çıkartılmıştır. Bu yaklaşım ile elektromanyetik alanın yumurtalar arasında daha rahat salınım yapabilmesi ve yumurtalar arası (özellikle ortada yer alan yumurtalarda) meydana gelen sınırlı sıcaklık artışının önlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca proses süresini de kısaltabilmek amacıyla elektrot potansiyel değeri 7000 V olarak kullanılmıştır. Bu değer deneysel model validasyon çalışmalarında kullanılan değer iki katı olarak seçilmiş olup, kullanılan radyo frekans sisteminin üst güç seviyelerinde elde edilebilecek bir değerdir. Literatürde de düz elektrotlu bir radyo frekans sistemde tek yumurtanın kullanıldığı ve yumurta oryantasyonu ve yumurtaya uygulanan dönme hareketinin yumurta sıcaklık değişimine etkisini gösteren bir çalışmada da elektrot potansiyeli 7200 V olarak kullanılmıştır (Palazoğlu ve Miran 2019). 7000 V elektrot potansiyeli uygulanan simülasyon çalışmasında yumurtaların pastörizasyon için de gerekli olan istenilen sıcaklık değerine ($>60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 1800 s içerisinde ulaştığı belirlenmiş olup, yumurtaların orta kesiti (xy düzleminde) sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi Şekil 4.18 de gösterilmiştir. Bu şekilde gözlemlendiği üzere bütün yumurtalarda, yumurtalar arası mesafenin arttırılmasıyla, benzer bir sıcaklık artışı ve sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Şekil 4.19 yumurtaların hacimsel sıcaklık ortalama değişimini gösterirken, yumurtalarda sıcaklık artışının da birebir elde edildiği yine bu şekilde gözlenebilmektedir. Yumurta örneklerinin xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı ise Şekil 4.20’de gösterilmiş olup yumurtalar etrafında tekdüze bir elektrik alan elde edildiği bu şekilde net olarak gözlenmektedir.



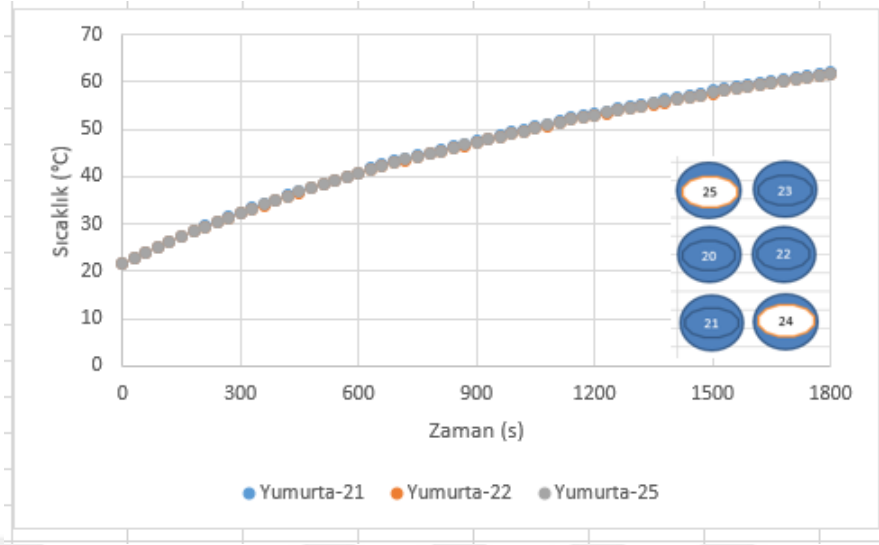
(a) 600 s



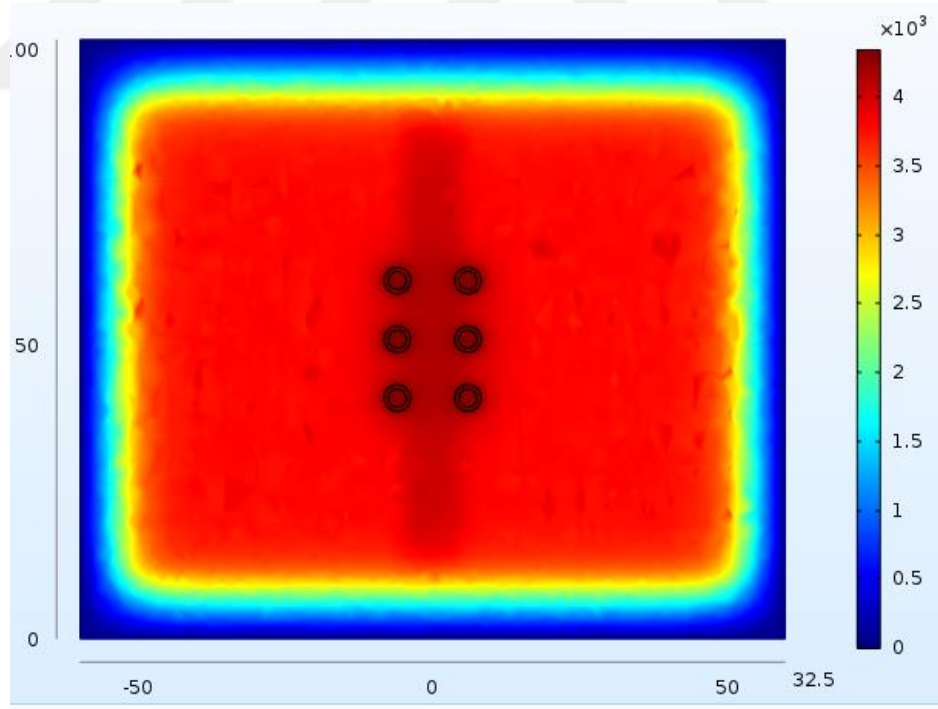
(b) 1800 s

Şekil 4.18 7000 V potansiyel uygulama ve farklı dizilimde planlanan yumurtaların orta kesiti (xy düzleminde) sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi

(a) 600 s, (b) 1800 s

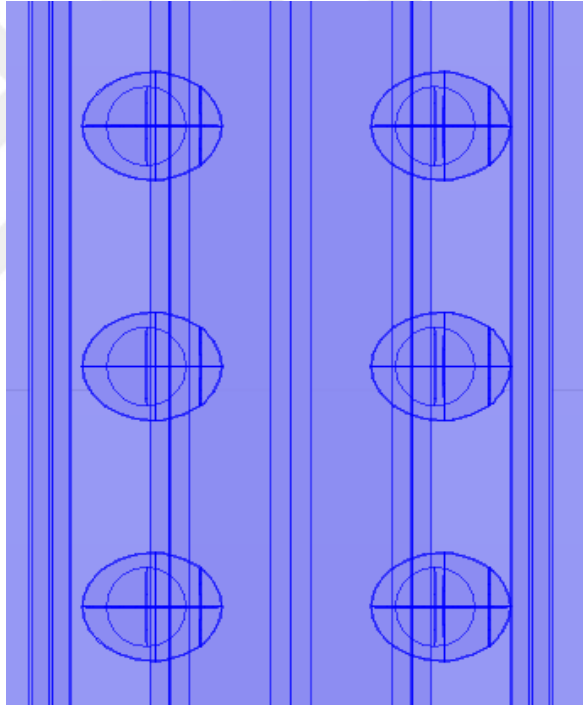
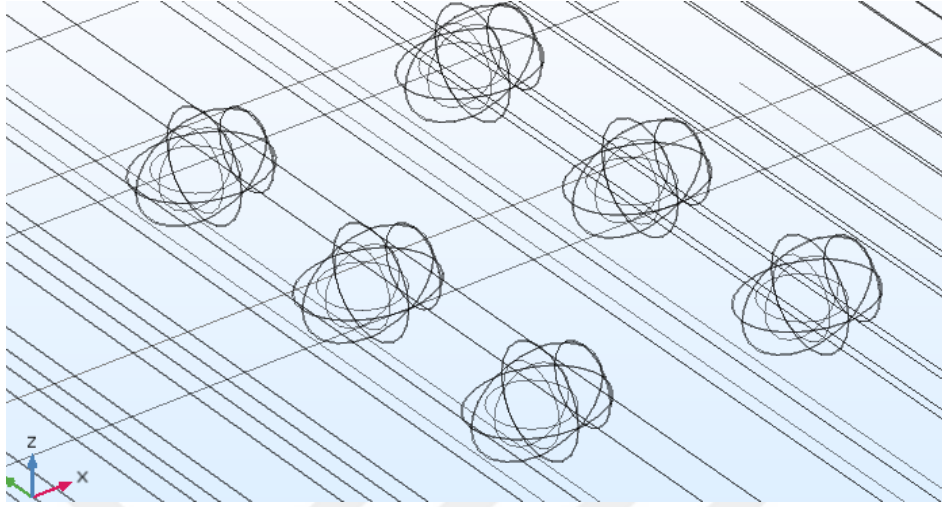


Şekil 4.19 7000 V potansiyel ve farklı dizilim uygulaması sonucunda elde edilen, yumurtaların hacimsel sıcaklık ortalama değişimi

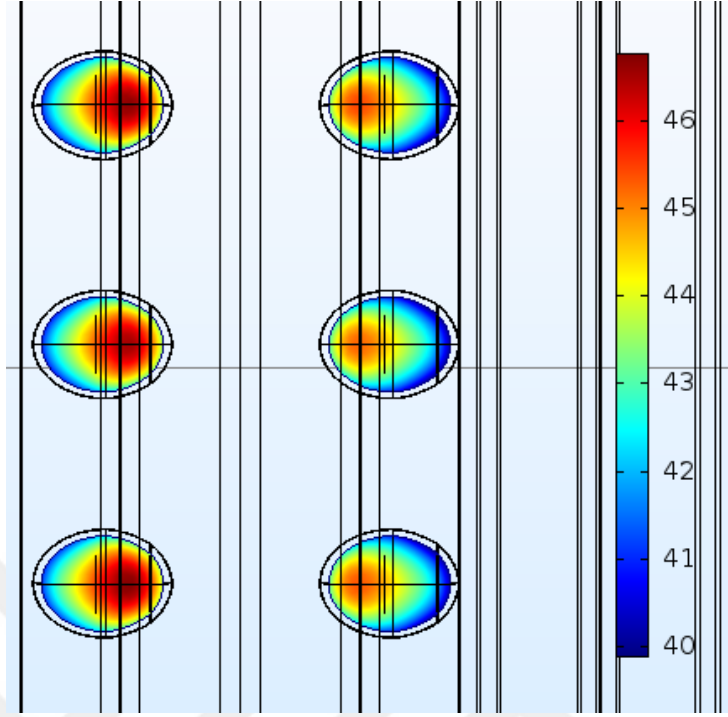


Şekil 4.20 7000 V potansiyel ve farklı dizilim uygulaması sonucunda sistem xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı

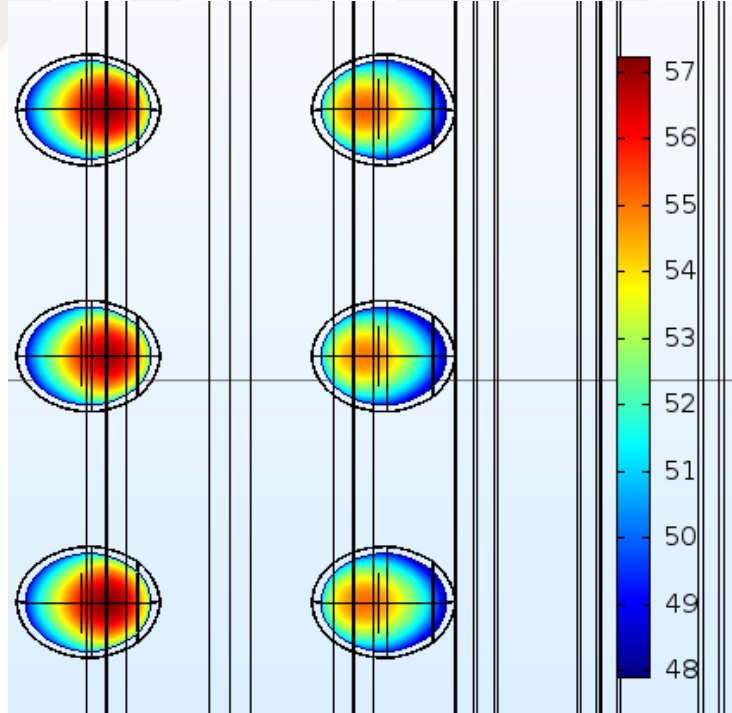
İkinci simülasyon çalışmasında ise yine Şekil 4.14’de gösterilen dizilime bağlı olarak, elektromanyetik alanın yumurtalar arasında daha rahat salınım yapabilmesi amacıyla, yumurtalar arası uzaklık iki katına çıkartılmıştır. Ek olarak, yine 7000 V uygulanan bu simülasyonda yumurtalar 90° yatay olarak döndürülerek sistem içerisinde ve yumurtalar arasında farklı bir elektriksel alan elde edilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım ile yumurtalar arası (özellikle ortada yer alan yumurtalarda) meydana gelen sınırlı sıcaklık artışının önlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca proses süresini de kısaltabilmek amacıyla elektrot potansiyel değeri 7000 V olarak kullanılmıştır. Bu dizilim Şekil 4.21’de gösterilirken yumurta içerisi sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu şekilde de gözlemlendiği üzere bütün yumurtalarda, yumurtalar arası mesafenin arttırılmasıyla, yine bir önceki duruma göre, yumurtalar içerisinde benzer bir sıcaklık artışı ve sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Ancak, yeni dizilimle sağ ve sol düzlemdeki yumurtalar arasındaki simetri kısmen elde edilememiştir. Bu durum, radyo frekans sistem içerisinde potansiyel uygulanan elektrot grubunun ortasında yer alan dikdörtgen elemente göre yumurtaların merkez simetri eksenine eş olmayan uzaklıkta olmalarıyla açıklanabilir. Bu durum da Şekil 4.21’de gösterilmiştir (yumurta numaraları Şekil 4.14 ie aynı sıralamada kullanılmıştır). Çapraz elektrotlu sistemlerde, kavite içerisindeki simetrinin önemi Bedane vd. (2018) tarafından detaylı olarak açıklanmış ve sistem içi elektrik alan dağılımının alt dörtgen elektrot merkezinde en yoğun olduğu deneysel verilerle gösterilmiştir. Şekil 4.23 yumurtaların hacimsel sıcaklık ortalama değişimini gösterirken, yumurtalarda ki sıcaklık artışının da benzer olarak elde edildiği yine bu şekilde gözlenebilmektedir. Bu durum radyo frekans sistem içerisinde yumurtaların dizilimi ve oryantasyonlarının önemini göstermekte olup, yumurtaların yatay olarak sıralanmaları durumunda proses süresinin, dikey dizilime göre, uzadığı da belirlenmiştir. Yumurta örneklerinin xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı ise Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Yumurtaların yatay (90°C) döndürülmüş dizilimleri ve alt dörtgen elektrota göre oryantasyonları



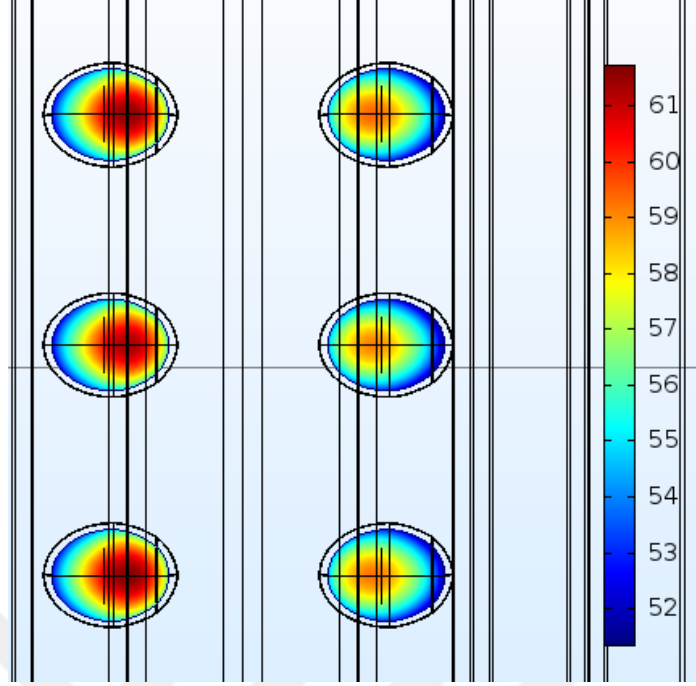
(a) 1800 s



(b) 3600 s

Şekil 4.22 7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde planlanan yumurtaların orta kesiti (xy düzleminde) sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi

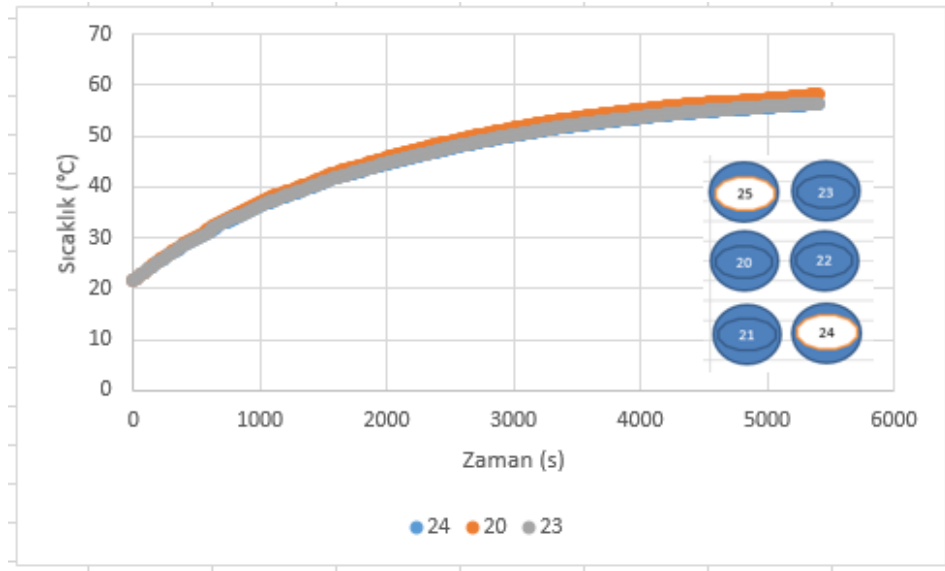
(a) 180 s, (b) 3600 s, (c) 5400 s



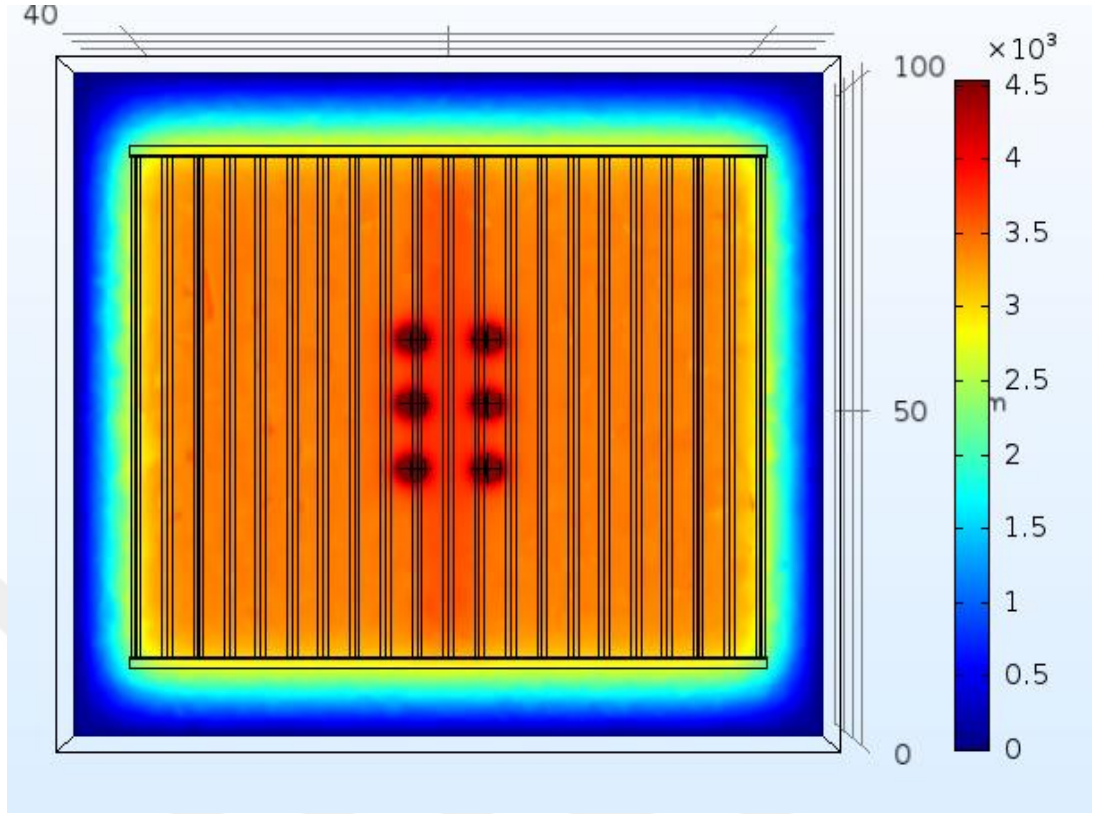
(c) 5400 s

Şekil 4.22 7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde planlanan yumurtaların orta kesiti (xy düzleminde) sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi (devam)

(a) 180 s, (b) 3600 s, (c) 5400 s



Şekil 4.23 7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde planlanan yumurtaların hacimsel sıcaklık ortalama değişimi



Şekil 4.24 7000 V potansiyel uygulama ve 90° yatay konumda farklı dizilimde sistem xy düzlemi orta kesitinde elde edilen elektrik potansiyel dağılımı

5. SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda kabuklu bütün yumurtalarda pastörizasyon işlemi amacıyla radyo frekans ve mikrodalga uygulamanın, ürün sıcaklık artışı temelinde uygun olduğu belirlenmiş ve aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Her iki uygulamada da ürün içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklık bölgeleri arasında önemli bir fark olduğu gözlenmiştir. Meydana gelen bu sıcaklık farkının mikrodalga uygulama sırasında kullanılan güç değeri ve güç döngüsüne göre değiştiği belirlenmiştir. Yüksek güç uygulamalarında (350 W) maksimum –minimum sıcaklık bölgeleri arasındaki fark, düşük güç uygulamalarına göre daha fazladır. Bu durum düşük güç uygulamasındaki güç döngüsündeki “dur” sürecinin uzun olması ve bu süreçte ürün içerisindeki sıcaklık dağılımının dengeye ulaşması ile açıklanabilmektedir. Farklı güç uygulamalarında yumurta sarısı ile beyazı arasında meydana gelen sıcaklık farkı ise, maksimum – minimum sıcaklık bölgeleri arasındaki farka göre daha düşük olmuştur.
- Ürüne hareket (örneğin rotasyonel ya da dikey dönme hareketi) uygulaması ile belirtilen sıcaklık farklarının azalacağı da proses tasarım ve inovasyonu açısından önemli bir nokta olarak göze çarpmaktadır.
- Mikrodalga uygulamada, kullanılan sistem kavite boyutlarından dolayı tek yumurta örneği ile çalışmış olup düşük güç ve döngü kullanımında elde edilen veri ışığında, deneysel olarak doğrulanmış modelin kullanılması ile endüstriyel sistem tasarım ve optimizasyon çalışmalarının yapılması ile endüstriyel ortaklı farklı çalışmaların yapılması mümkün olacaktır.
- Radyo frekans uygulamalarda (deneysel doğrulama çalışmalarında) kullanılan düşük potansiyel değerine (3500 V) bağlı olarak proses süresi (≈ 2 saat), endüstriyel bir uygulama da tercih edilmeyecek kadar uzun sürmüştür. Ancak bu çalışmalar temelinde hem radyo frekans uygulama potansiyelinin ve sistem içerisindeki yumurtaların diziliş ve birbirlerine göre konumlarının ürün sıcaklık artışı ve ürün içi sıcaklık tekdüzeliği kapsamında önemli bir faktör olduğu bu

alışmalar kapsamında belirlenmiştir. Yumurtaların dizilişı ve birbirlerine göre olan konumları elektromanyetik alan dağılımını da önemli şekilde etkilemiştir.

- Proses süresini kısaltmak amacıyla kullanılan elektrot potansiyel değerinin artırılması (7000 V) proses süresini önemli olarak kısaltmış ve ürün pastörizasyonu için gerekli sıcaklık değelerine (≈ 60 °C) 30 dk gibi bir sürede ulaşılmıştır.
- Radyo frekans uygulama sırasında yumurta oryantasyonunun (dik ve yatay diziliş) da ürün sıcaklık değışiminde önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda endüstriyel bir sistemde, konveyör bant sistemde ürün hareketinin sağlandığı proses koşullarında yumurtaların dik durması önemli bir proses parametresidir.
- Sonuç olarak, mikrodalga ve radyo frekans uygulamalarda yumurta içerisinde tekdüze sıcaklık dağılımının sağlanabilmesi amacıyla tasarım ve optimizasyon çalışmalarının endüstriyel uygulamaya hitap edecek şekilde gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2008. Türk Gıda Kodeksi Yumurta ve Yumurta Ürünleri Tebliği, Tarım “ve Köy işleri Bakanlığı. Tebliğ No: 2007/54.
- Anonymous, 2019. The 2017 European Union report on pesticide residues in food. EFSA Journal, 17(6). doi:10.2903/j.efsa.2019.5743
- Altın, O., Marra, F. Erdoğan, F. 2022. Computational study for natural convection effects on temperature during batch and continuous industrial scale radio frequency tempering/thawing. Journal of Food Engineering, 312, 110743.
- Alvarez, I., Niemira, B.A., Fan, X. ve Sommers, C.H. 2007. Modeling the irradiation followed by heat inactivation of Salmonella inoculated in liquid whole egg. Journal of Food Science, 72, 145-152.
- Atılğan, M.R., Unluturk, S. 2008. Rheological Properties of Liquid Egg Products (LEPS). International Journal of Food Properties, 11, 296-308.
- Bedane, T.F., Altın, O., Erol, B., Marra, F., Erdoğan, F. 2018. Thawing of frozen food products in a staggered through-field electrode radio frequency system: A case study for frozen chicken breast meat with effects on drip loss and texture. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 50, 139-147.
- Birla, S.L., Wang, S., Tang, J., Hallman, G. 2004. Improving heating uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control. Postharvest Biology and Technology, 33(2), 205-217.
- Bobuş Alkaya, G., Erdoğan, F., Halkman, K., Ekiz, I. 2016. Surface decontamination of whole-shell eggs using far-infrared radiation. Food and Bioproducts Processing, 98, 275-282.
- Cevoli, C., Fabbri, A., Pasquali, F., Berardinelli, A. ve Guarnieri, A. 2010. Hot air treatment, in natural convection conditions, for egg surface decontamination. Journal of Agricultural Engineering, 41(4), 23-27.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S.ve Basak, T. 2013. Microwave food processing – a review, Food Research International.
- Çakmak, H., Tavman, Ş. 2011. Radyo Frekans Sistemi ve Gıda Sanayiindeki Uygulamaları. GIDA, 36(6), 383-390.
- Davidson, 2015. Davidson’s safest choice pasteurized Shell eggs. Web Sitesi: <http://www.safeeggs.com/foodservice/benefits/regulatory-compliance> Erişim Tarihi: 23.06.2021

- Dev, S.R.S., Raghavan, G.S.V., Gariepy, Y. 2008. Dielectric properties of egg components and microwave heating for in-shell pasteurization of eggs. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 207-214.
- Erdogdu, F., Altin, O., Marra, F. and Bedane, T.F. 2017. A computational study to design process conditions in industrial radio-frequency tempering/thawing process. *Journal of Food Engineering*, 213, 99-112.
- Erol, M. 1994. Ankara’da satılan yumurtaların *Salmonella* yönünden araştırılması. Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü. Yüksek lisans tezi. Ankara
- FDA. 2009. Prevention of *Salmonella* Enteritidis in shell eggs during production, storage, and transportation; final rule. 21 CFR Parts 16 and 118. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2009-07-09/pdf/E9-16119.pdf>. Date accessed: September 22, 2017.
- Fleischman, G.J. 2004. Microwave pasteurization of shell eggs. IFT Yıllık Toplantı. Las Vegas, USA: IFT.
- Froning, G.W., Peters., D., Muriana, P., Eskridge, K., Travnicek, D., Sumner, S.S. 2002. Uluslararası yumurta pastörizasyon kılavuzu. *AEB, IL*.
- Geveke, D.J., Bigley, A.B.W. ve Brunkhorst, C.D. 2017. Pasteurization of Shell eggs using radio frequency heating. *Journal of Food Engineering*, 193,53–57.
- Geveke, D.J., Gurtler, J.B., Jones, D.R. ve Bigley, A.B.W. 2016. Inactivation of *Salmonella* in shell eggs by hot water immersion and its effect on quality. *Journal of Food Science*, 81(3), 709-714.
- Heddleson, R.A. and Doores, S. 1993. Factors Affecting Microwave Heating of Foods and Microwave Induced Destruction of Foodborne Pathogens. *J Food Protect*, 57(11), 1025-1037.
- Hou, H., Singh, R.K., Muriana, P.M., Stadelman, W.J. 1996. Pasteurization of intact shell eggs. *Food Microbiology*, 13,93-101.
- Jiao, Y., Tang, J. ve Wang, S. 2014. A new strategy to improve heating uniformity of low moisture foods in radio frequency treatment for pathogen control. *Journal of Food Engineering*, 141,128–38
- Kannan, S., Dev, S.R.S., Gariepy, Y. ve Vijaya Raghavan, G.S. 2013. Effect of radio frequency heating on the dielectric and physical properties of eggs. *Prog. Electromagn. Res. B*, 51, 201-220.
- Keener, K.M. 2017. Shell egg pasteurization. In *Egg innovations and strategies for improvements* (pp. 165-175). Academic Press.

- Konak, Ü.İ., Certel, M., Helhel, S. 2009. Gıda sanayisinde mikrodalga uygulamaları. Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4(3), 20-31.
- Koplik, J. ve Banavar, J.R. 2006. Sıvı-sıvı ara yüzeyinde kayma, karışmazlık ve sınır koşulları. Fiziksel inceleme mektupları, 96 (4), 044505.
- Koray Palazoğlu, T., Miran, W. 2019. Computational investigation of the effect of orientation and rotation of shell egg on radio frequency heating rate and uniformity. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 58, 102238.
- Lakins, D.G., Alvarado, C.Z., Luna, A.M., O'keefe, S.F., Boyce, J.B., Thompson, L.D., Brashears, M.T., Brooks, J.C. Brashears, M.M. 2009. Comparison of quality attributes of shell eggs subjected to directional microwave technology. Poultry Science, 88 ,1257–1265.
- Lau, M.H. 2000. Microwave Pasteurization and Sterilization of Food Products. Ph.D. Dissertation, Washington State University, Washington, 167 pp.
- Lau, S.K., Thippareddi, H., Jones, D., Negahban, M. ve Subbiah, J. 2016. Challenges in radiofrequency pasteurization of shell eggs: coagulation rings. Journal of Food Science, 81,2492-2502.
- Lau, S.K., Thippareddi, H. ve Subbiah, J. 2017. Radiofrequency Heating forEnhancing Microbial Safety of Shell Eggs Immersed in Deionized Water. Journalof Food Science.
- Li, Y., Li, F., Tang, J., Zhang, R., Wang, Y., Koral, T. and Jiao, Y. 2018. Radio frequency tempering uniformity investigation of frozen beef with various shapes and sizes. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 48, 42–55.
- Lin, W. and Sawyer, C. 1988. Bacterial Survival and Thermal Responses of Beef Loaf after Microwave Processing. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 23 (3), 183-194.
- Marra, F., Lyng, J., Romano, V., McKenna, B. 2007. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model. Journal of Food Engineering, 79,998-1006.
- Marra, F., Zhang, L., Lyng, J.G., 2009. Radiofrequency treatment of foods: review of recent advances. Journal of Food Engineering, 91, 497- 508.
- Metaxas, A.C. 1991. Microwave heating. Power Engineering Journal, 5(5), 237-247.
- Nakamura, R., Fukano, T. ve Taniguchi, M. 1982. Heat-induced gelation of Hen'segg yolk low density lipoprotein (LDL) dispersion. Journal of Food Science, 47,1449–53.

- Okday, H.I. ve Heperkan, D. 2006. Evaluation of ISO method and VIDAS automated system for identifying *Listeria* and *Salmonella* in selected foods. *Journal of Rapid Methods & Automation in Microbiology*, 14(2), 133-145.
- Piyasena, P., Dussault, C., Koutchma, T., Ramaswamy, H.S. Awuah, G.B. 2003. Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 43(6), 587-606.
- Romano, V. ve Marra, F. 2008. A Numerical Analysis of Radio Frequency Heating of Regular Shaped Foodstuff. *Journal of Food Engineering*, 84, 449-457.
- Rose, B.E., Hill, W.E., Umholtz, R., Ransom, G.M. ve James, W.O. 2002. 1998'den 2000'e kadar Amerika Birleşik Devletleri'nde federal olarak denetlenen kuruluşlarda toplanan çiğ et ve kümes hayvanı ürünlerinde *Salmonella* testi. *Journal of food protection*, 65 (6), 937-947.
- Ryynanen, S. 1995. The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles. *Journal of Food Engineering*, 26(4), 409-429.
- Schlegel, W. 1992. Commercial Pasteurization and Sterilization of Food Products Using Microwave Technology. *Food Technol*, 46 (12), 62-63.
- Stadelman, W., Cotterill, O.J. 1986. *Egg Science and Technology*. 3rd ed.; İngiltere: Globe Book Services.
- Şakıyan, Ö., Meda, V., Şumnu, G. ve Şahin, S. 2006. Mikrodalga ve Kızılötesi-Mikrodalga Kombinasyonu ile Pisirilen Keki Dielektrik Özelliklerinin incelenmesi. Türkiye 9. Gıda Kongresi, 24-26 Mayıs, Bolu.
- Trujillo, F.J., Geveke, D.J. 2014. Nonthermal processing by radio frequency electric fields. In *Emerging technologies for food processing* (pp. 259-269). Academic Press.
- Topcam, H., Karatas, O., Erol, B., Erdogan, F. 2020. Effect of rotation on temperature uniformity of microwave processed low -high viscosity liquids: A computational study with experimental. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102306.
- Uğur, M., Nazlı, B. ve Bostan, K. 2001. *Gıda Hijyeni*. İstanbul: Teknik Yayınevi
- United States Patent Egg pasteurization Web Sitesi
<http://www.freepatentsonline.com/5266338.html> Erişim Tarihi : 16.05.2021
- Uslu, M.K., Certel, M. 2006. Dielektrik ısıtma ve gıda islemede kullanımı. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3, 61-69.
- Uygun Sarıbay, M. ve Köseoğlu, T. 2012. Işınlanmış Yumurta ve Yumurta Ürünlerinde Kalite Değişimleri. *Gıda ve Yem Bilimi - Teknolojisi Dergisi*, 12,41-48.

- Wang, S., Monzon, M., Johnson, J.A., Mitcham, E.J. ve Tang, J. 2007. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: I: heating uniformity and energy efficiency. *Postharvest Biol Technol*, 45, 240–6.
- Yang, Y., Geveke, D.J., Brunkhorst, C.D., Sites, J.E., Geveke, N.J., Tilman, E.D. 2019. Optimization of the radio frequency power, time and cooling water temperature for pasteurization of *Salmonella Typhimurium* in shell eggs. *Journal of Food Engineering*, 247, 130-135.
- Yang, Y., Geveke, D. J., Niemira, B.A. 2020. Quality of radio frequency pasteurized shell eggs during extended storage under normal and moderate abuse conditions. *Food Control*, 116, 107330.
- Yazar, G. Ve İçier, F. 2013 Radyo Frekans Isıtma Yöntemi ve Gıda İşlemede Kullanımı. *Akademik Gıda*, 11(2), 80-93.
- Zhang, W., Liu, F., Nindo, C. ve Tang, J. 2013. Physical properties of egg whites and whole eggs relevant to microwave pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 118, 62-69.
- Zhu, H., Li, D., Ma, J., Du, Z., Li, P., Li, S. and Wang, S. 2018. Radio frequency heating uniformity evaluation for mid-high moisture food treated with cylindrical electromagnetic wave conductors. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47, 56–70.