

ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DONDURMA KARIŞIMLARININ PASTÖRİZASYONU AMACIYLA SÜREKLİ  
AKIŞ MİKRODALGA PROSES TASARIMI

Elif Nida ÇAKIR

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA  
2024

Her hakkı saklıdır

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DONDURMA KARIŞIMLARININ PASTÖRİZASYONU AMACIYLA SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA PROSES TASARIMI

Elif Nida ÇAKIR

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Gıda ürünlerinin üretiminden tüketimine kadar geçen süreçteki risk yönetimi tüketici sağlığını korumak amacıyla gıda güvenliği ve güvencesi için kritik bir alan oluşturmaktadır. Dondurma her yaş grubundan insanın dört mevsim tükettiği bir gıda ürünü olmakla birlikte mikrobiyolojik açıdan risk taşıyan bir ürün grubudur. Dondurma pastörizasyonu amacıyla endüstride kullanılan geleneksel yöntemlerde yaygın olarak ısı değiştiriciler kullanılmakta olup bu proseste fosil yakıt kullanımı ile karbon ayak izi de artmaktadır. Avrupa Birliği (AB) başta olmak üzere birçok ülke karbon ayak izini azaltmaya yönelik adımlar atmaya başlamıştır. Bu bağlamda bu tez çalışması kapsamında mikrodalga ısıtma yöntemi kullanılarak dondurma karışımlarının pastörizasyonu ile hem gıda güvenliğini arttırmak hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyecek bir prosesi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, dondurma karışım örneği laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde iki farklı hacimdeki kaplarda noktasal sıcaklık değerleri minimum 80 °C oluncaya kadar proses edilmiş ve buradan elde edilen verilerle Comsol Çoklufizik V5.6 yazılımı kullanılarak geliştirilen model doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki aşamada sistem etkinliğini belirlemek amacıyla (büyük hacimli kap kullanılarak) *Listeria monocytogenes* inoküle edilmiş dondurma karışımı örneklerine 200, 400, 600 ve 750 s süreyle mikrodalga ısıtma uygulanmış ve elde edilen mikrobiyal azalma belirlenmiştir. Prosesin ürün kalitesine etkisi renk analiz sonuçları ile değerlendirilmiş ve matematiksel model çalışması için dielektrik özellikler ve reolojik değişimler ayrıca deneysel olarak ölçülmüştür. Mikrobiyal yük, 600 s işlem sonrası 2,7 log azalmış ve 750 s uygulama sonrası tam inaktivasyon sağlanmıştır. Bu sonuçlar kapsamında son sıcaklık temel alınarak endüstriyel skalada sürekli akış mikrodalga sistem tasarımları gerçekleştirilmiş ve mikrodalga uygulamanın dondurma karışımları pastörizasyonunda uygulanabilir alternatif bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

**Aralık 2024, 77 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Dondurma, mikrodalga ısıtma, pastörizasyon, matematiksel modelleme ve tasarım, gıda güvenliği

## ABSTRACT

Master Thesis

### DESIGN OF A CONTINUOUS FLOW MICROWAVE PROCESS FOR PASTEURIZATION OF ICE CREAM MIXES

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Science  
Department of Food Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Risk management in food manufacturing to consumption is crucial for food safety, as millions of people suffer from food-borne illnesses annually according to the World Health Organization (WHO). As a widely consumed food product across all age groups, ice cream poses microbiological risks. Conventional pasteurization methods in the industry often rely on heat exchangers, which contribute to high carbon footprints due to fossil fuel use. Specifically the European Union and other countries have focused on reducing carbon emissions. This study explored microwave heating as an alternative pasteurization method for ice cream mixes to enhance food safety and environmental sustainability. A laboratory-scale microwave system was used to pasteurize ice cream in two different volume containers, achieving temperatures of 80 °C. The mathematical model developed (using Comsol Multiphysics v5.6) to determine the temperature changes during microwave processing of ice cream mixes was validated with the experimental data. Ice cream mix samples, inoculated with *Listeria monocytogenes*, were also processed for 200, 400, 600, and 750 s to determine the microbial reduction. A 2.7 log reduction in microbial load after 600 s and a complete inactivation after 750 s were obtained, and the achieved temperature data was further applied with the validated model to design an industrial-scale continuous flow microwave process. In addition, product quality was evaluated through color analysis, dielectric properties, and rheological changes were experimentally determined and used in the model development. The proposed industry-scale system designs offer a sustainable and efficient method for ice cream pasteurization.

**December 2024, 77 pages**

**Key Words:** Ice cream, microwave heating, pasteurization, mathematical modeling and design, food safety

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tez çalışmalarım başta olmak üzere, görev aldığım tüm proje ve çalışmalarda bilgisini ve desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Tez çalışmalarım boyunca dondurma karışımını sağlayarak tez çalışmalarımı yürütmemi sağlayan AROLEZ Gıda Sanayi ve Ticaret AŞ'ne ve firma ile iletişime geçmemde aracı olan Dr. Öğretim Üyesi Tuncay YILMAZ'a (Manisa Celal Bayar Üniversitesi Anabilim Dalı),

Modelleme çalışmalarında kullanılmak üzere dondurma karışımının reolojik ölçümünü yaparak çalışmalarına katkıda bulunan Prof. Dr. Behiç MERT'e (Ortadoğu Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı), tez çalışmamın önemli bir parçası olan mikrobiyoloji çalışmalarında bilgisi ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Aykut AYTAÇ'a (Hacettepe Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı), çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Muhammed Talha AKBULUT, Hüseyin TOPÇAM ve Ozan KARATAŞ başta olmak üzere CFπ ailesi içerisinde yer alan tüm çalışma arkadaşlarıma,

Hayatımın her aşamasında sonsuz desteklerini hissettiğim, verdiğim her kararda arkamda olan, bugünlere gelmemde de vesile olan sevgilim annem Aynur ÇAKIR, babam Sadık ÇAKIR ve biricik kardeşim İlker Yasin ÇAKIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi "Araştırma Üniversiteleri Destek – ADEP" projeleri kapsamında (Proje No: FBA-2023-2718) desteklenmiştir.

Elif Nida ÇAKIR  
Ankara, Aralık 2024

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

ETİK .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	iv
SİMGELER DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ .....	3
2.1 Gıda Güvenliği ve Güvencesi .....	3
2.2 Dondurma ve Dondurma Üretimi .....	12
2.2.1 Dondurma .....	12
2.2.2 Dondurma üretimi .....	13
2.3 Dielektrik Isıtma Yöntemleri .....	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	19
3.1 Materyal .....	20
3.1.1 Laboratuvar ölçekli (IFTECH) mikrodalga sistem .....	20
3.1.2 Dondurma karışımı .....	20
3.1.3 Dondurma örneklerinin inokülasyonunda kullanılan <i>Listeria</i> suşları ve besiyerleri .....	21
3.2 Yöntem .....	22
3.2.1 Isısal ve fiziksel özellikler .....	22
3.2.2 Matematiksel modelleme çalışmaları .....	26
3.2.3 Matematiksel model doğrulama çalışmaları .....	38
3.2.4 Mikrobiyal inaktivasyon çalışmaları .....	41
3.2.5 Proses uygulama çalışmaları .....	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	44
4.1 Isısal ve Fiziksel Özellikler .....	45
4.1.1 Dondurma karışımının dielektrik özellikleri .....	45
4.1.2 Dondurma karışımının reolojik özellikleri .....	46
4.1.3 Dondurma karışımının mikrodalga uygulama sonrası renk değişimi .....	47

<b>4.2 Matematiksel Model Doğrulama Çalışmaları .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.1 Dondurma karışımı sıcaklık değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.2 Mikrobiyal inaktivasyon etkinliğinin değerlendirilmesi.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3 Proses Uygulamaları .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3.1 Endüstriyel ölçekli sürekli akış mikrodalga sistem geliştirilmesi .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3.2 Dönmenin sıcaklık değişimi ve tekdüzeliğe etkisi .....</b>	<b>65</b>
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>77</b>



## SİMGELER DİZİNİ

$a^*$	Kırmızılık
$b^*$	Sarılık
$c$	Işık Hızı (m/s)
$c_p$	Isı Sığası (kJ/kg.K)
cm	Santimetre
$E$	Harmonik Elektrik Alan Gücü (V/m)
eV	Elektron Volt (Electric Vehicle)
F	Frekans
g	Gram
$g$	Yerçekimi ivmesi (m <sup>2</sup> /s)
h	Isı Transferi Katsayısı (W/m <sup>2</sup> .°C)
$H$	Harmonik Manyetik Alan Gücü (A/m)
K	Kelvin
k	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m.K)
kG	Kilogrey
L	Litre
$L^*$	Parlaklık
M	Akışkan Kıvam Katsayısı (Pa-s)
m	Metre
MHz	Mega Hertz
mL	Mililitre
mm	Milimetre
Mpa	Mega Pascal

N	Deneysel Veri Sayısı
r	Silindirin yarıçapı (m)
rpm	(1/s)
s	Saniye
t	Süre (s)
T <sub>i</sub>	Başlangıç Sıcaklığı (°C)
W	Watt
ρ	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
ε <sub>0</sub>	Serbest Alan Geçirgenliği (F/m)
κ'	Bağıl Dielektrik Sabiti (1)
κ''	Bağıl Dielektrik Kaybı (1)
μ <sub>0</sub>	Serbest Alan Geçirgenliği (H/m)
η	Görünür Viskozite (Pa.s)
λ	Dalga Boyu (m)
υ	Dönme hız değeri (m/s)
γ	Kayma Hızı (1/s)
°C	Derece Celcius
tanδ	Kayıp Tanjantı
ζ	Dönme frekansı (rpm)

## **Kısaltmalar**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CDC	ABD Hastalık Kontrol ve Korunma Merkezleri (Centers for Disease Control and Prevention)
FDA	Gıda ve İlaç İdaresi (Food and Drug Administration)
ISM	Endüstriyel, Bilimsel, Medikal (Industrial, Scientific and Medical)
MW	Mikrodalga
PTFE	Politetrafloroetilen (Teflon)
RF	Radyo Frekans
RMSE	Kök Ortalama Kare Hatası
TMAB	Toplam Mezofilik Aerobik Bakteri
UHT	Ultra Yüksek Isı (Ultra High Temperature)
UV	Ultraviyole
WHO	Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Endüstriyel dondurma üretimi .....	13
Şekil 2.2 Mikrodalga ısıtma ile ilişkili iyonik iletim (a) ve dipol rotasyon (b) mekanizmaları (Pratap-Singh vd. 2024) .....	14
Şekil 2.3 Elektromanyetik Spektrum (Yazar ve İçier 2013) .....	15
Şekil 2.4 Mikrodalga uygulama prensibinin ve malzeme etkisinin şematik diyagramı .....	16
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan mikrodalga sistem ve sistem içerisindeki ürünün konumu .....	20
Şekil 3.2 Dielektrik özelliklerin ölçümü için kullanılan network analizör cihazı .....	25
Şekil 3.3 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan mikrodalga sistem .....	26
Şekil 3.4 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan küçük (a) ve büyük 2 (b) kaba ait geometrik ölçüler .....	27
Şekil 3.5 Endüstriyel skala sistem tasarımı amacıyla kullanılan geometri -Sistem 1 geometrik ölçüleri .....	27
Şekil 3.6 Endüstriyel skala sistem tasarımı amacıyla kullanılan geometri -Sistem 2 geometrik ölçüleri .....	28
Şekil 3.7 Matematiksel model geliştirme çalışması için elektromanyetik alan, sıcaklık ve akış denklemlerinin eş zamanlı çözülmesi kapsamında uygulanan yaklaşım .....	30
Şekil 3.8 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan mikrodalga sistem içerisinde küçük hacimli kap kullanım durumunda ürün (a), kap (b) ve kavitede (c) oluşturulan ağ yapısı .....	33
Şekil 3.9 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan mikrodalga sistem içerisinde büyük hacimli kap kullanım durumunda ürün (a), kap (b) ve kavitede (c) oluşturulan ağ yapısı .....	34
Şekil 3.10 Endüstriyel sistem 1 (a) ve sistem 2 (b) için oluşturulan ağ yapısı .....	35
Şekil 3.11 Deneysel çalışmalarda kullanılan sıcaklık ölçüm sistemi ve fiber optik problemler .....	39
Şekil 3.12 Mikrodalga uygulama sürecinde sıcaklık ölçüm çalışmalarında kullanılan küçük (a) ve büyük (b) kapta gerçekleştirilen sıcaklık ölçüm noktaları ve kap boyutları (Ölçüm noktaları: CH1(1), CH2(2) ve CH3(3)) .....	39
Şekil 3.13 Deneysel çalışmalarda dondurma karışımlarının konulduğu kapların sistem içerisine uygun bir şekilde yerleştirilmesi amacıyla kullanılan yükseltici .....	40
Şekil 3.14 Problemleri sabitlemek için 3 boyutlu yazıcıda basılan sabitleyici aparat .....	40
Şekil 3.15 Mikrobiyel doğrulama amacıyla kullanılan teflon kaba dondurma karışımının alınması .....	42

Şekil 3.16 Sistem 2’de yer alan dönebilir mekanizma.....	43
Şekil 4.1 Dondurma karışımının viskozitesinin sıcaklık ve kayma hızına bağlı olarak değişimi .....	47
Şekil 4.2 Büyük kapta yapılan deneylerde proses öncesi (a) ve 750 s proses sonrası (b) ürün yüzey sıcaklık dağılımı .....	50
Şekil 4.3 Küçük kaptaki deneyler ve model sonuçlarının karşılaştırılması (a) Derin nokta (b) Merkez nokta .....	52
Şekil 4.4 Büyük kaptaki deneyler ve model sonuçlarının karşılaştırılması (a) Derin nokta (b) Merkez nokta ve (c) Yüzey nokta .....	53
Şekil 4.5 Küçük kap kullanılarak gerçekleştirilen mikrodalga ısıl işlem sürecinde kavite içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımının (V/m) xz-orta kesitinde gösterilmesi.....	54
Şekil 4.6 Küçük kap kullanılarak gerçekleştirilen mikrodalga ısıl işlem sürecinde ürün içerisindeki elektromanyetik alana ait kesit (V/m).....	55
Şekil 4.7 Mikrodalga prosesi sonu 190.s ’de küçük kapta hacimsel (a) ve xy-yz ve zx düzlemlerinde (b) sıcaklık dağılımı (°C).....	55
Şekil 4.8 Küçük kaptaki ürün içerisinde doğal konveksiyon sonucu oluşan akış profiline ait kesit (190.s) (m/s).....	56
Şekil 4.9 Büyük kapta 200.(b), 400. (c), 600. (d) ve 750. (e) s’de ürün ve kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı (a) (V/m).....	57
Şekil 4.10 Mikrodalga prosesi esnasında büyük kapta xy-yz ve zx düzlemlerinde sıcaklık dağılımı (200.s(b), 400.s (c), 600.s (d) ve 750.s (e)) (°C) .....	58
Şekil 4.11 Büyük kaptaki ürün içerisinde doğal konveksiyona bağlı olarak oluşan akış profili (200.s (b), 400.s (c), 600.s (d) ve 750.s (e)) (m/s).....	58
Şekil 4.12 Dondurma karışımında büyük kapta mikrodalga ısıl işlem sürecinde mikrobiyal yükünde meydana gelen azalma ve ürün hacimsel ortalama sıcaklık değişimi .....	60
Şekil 4.13 Endüstriyel skala sistem 1 geometrisi (a) ve simetri geometrisinde (b) sıcaklık dağılımı (°C) .....	61
Şekil 4.14 Endüstriyel skala sistem 1 geometrisi içerisinde sürekli akış sürecinde meydana gelen sıcaklık değişimi .....	61
Şekil 4.15 Endüstriyel skala sistem 1 geometrisi sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alana dağılımı xz orta kesiti (V/m).....	62
Şekil 4.16 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,6843 cm/s akış sonrası meydana gelen sıcaklık dağılımı .....	63
Şekil 4.17 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,9443 cm/s akış sonrası meydana gelen sıcaklık dağılımı .....	63
Şekil 4.18 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,6843 cm/s akış sonrası oluşan elektromanyetik alana ait kesit (V/m).....	64

Şekil 4.19 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,9443 cm/s akış sonrası meydana gelen elektromanyetik alana ait kesit (V/m).....	65
Şekil 4.20 Dönme etkisi olmadan 0,6843 ve 0,9443 cm/s giriş hızlarında elde edilen ürün sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi .....	67
Şekil 4.21 Endüstriyel sistem 2 içerisinde şekil 4.22 ve 4.23 için akış profilinin alındığı kesit.....	67
Şekil 4.22 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,6843 cm/s hızla meydana gelen akış profili (a 0 rpm, b 2,5 rpm, c 5 rpm ve d 10 rpm).....	68
Şekil 4.23 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0.9443 cm/s hızla meydana gelen akış profili (a 0 rpm, b 2,5 rpm, c 5 rpm ve d 10 rpm).....	69
Şekil 4.24 Endüstriyel sistem 2 içerisinde yatışkın koşullarda elde edilen sıcaklık dağılımı (a 0 rpm, b 2,5 rpm, c 5 rpm ve d 10 rpm).....	70



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 RF ve MW için ISM frekansları ve dalga boyları (Awuah vd.2014) .....	15
Çizelge 3.1 Dondurma karışımının kimyasal bileşimi .....	21
Çizelge 3.2 Dondurma karışımının termofiziksel özellikleri .....	22
Çizelge 3.3 Gıda bileşenlerinin sıcaklığa bağlı olarak termal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan empirik denklemler ( $-40 \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$ )(Choi ve Okos 1986) .....	23
Çizelge 3.4 Sıcaklığa bağlı termal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan genel empirik denklemler (Choi ve Okos 1986) .....	24
Çizelge 3.5 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan element sayıları .....	36
Çizelge 3.6 Başlangıç ve sınır koşulları .....	37
Çizelge 4.1 Dondurma karışımının 915 ve 2450 MHz frekans değerinde ölçülen dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi .....	45
Çizelge 4.2 Dondurma karışımının reolojik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi .....	46
Çizelge 4.3 Küçük kapta yapılan deneylere ait renk ölçüm sonuçları .....	48
Çizelge 4.4 Büyük kapta yapılan deneylere ait renk ölçüm sonuçları .....	48
Çizelge 4.5 Endüstriyel sistem 2’de akış ve dönüş hızına bağlı olarak sistemin yatışkın koşula geldiği durumda sistem çıkışı ortalama sıcaklık değerleri....	66

## 1. GİRİŞ

Gıda güvenliği ve güvencesi tüketici sağlığını korumak amacıyla gıda ürünlerinin üretim aşamasından tüketimine kadar geçen süreçteki risklerin yönetimi için kritik bir alan oluşturmaktadır. Gıda kaynaklı hastalıklar, dünya genelinde önemli sağlık sorunları arasında yer almakta ve bu durum toplum sağlığı üzerinde önemli bir risk oluşturmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), her yıl milyonlarca insanın gıda kaynaklı enfeksiyonlar sebebiyle hastalandığını bildirmektedir. Bu bağlamda gıdaların mikrobiyolojik güvenliği, insan sağlığını korumak ve genel gıda güvenliğini sağlama açısından hayati bir önem taşımaktadır.

Dondurma, yüksek besin değeri ve farklı tat seçenekleri ile çocuktan yetişkine kadar geniş bir tüketici profiline sahip olan ve dört mevsim tüketilen bir gıda ürünüdür. Dondurma içerdiği besin bileşenleri sebebiyle uygun hijyenik koşullar sağlanmadığı takdirde mikroorganizmaların üremesi için elverişli bir ortam sunmaktadır. Özellikle *Listeria monocytogenes* gibi patojen mikroorganizmalar, dondurma üretiminde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. *Listeria monocytogenes* gıda kaynaklı hastalıklara yol açabilen patojen bir bakteri olup özellikle risk grubu kabul edilen hamileler, yaşlılar ve bağışıklık sistemi zayıf bireylerde ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Geniş sıcaklık ve pH aralıklarında gelişimini sürdürebilen bu bakteri, özellikle soğuk ortamlarda hayatta kalabilme yeteneği ile dondurma gibi düşük sıcaklıklarda saklanan ürünlerde kontaminasyon riskini arttırmaktadır.

FDA'nın 24 Haziran 2024 tarihli duyurusuna göre, 13 farklı markaya ait dondurma ürünleri, *Listeria monocytogenes* şüphesi nedeniyle geri çağırılmıştır. Bu geri çağırma sırasında, söz konusu ürünlerle ilgili herhangi bir hastalık bildirimini olmamasına rağmen, potansiyel sağlık riskleri nedeniyle önlem alınmıştır (FDA 2024).

Dondurma üretiminde mikrobiyolojik kontrolü sağlamak amacıyla çeşitli ısıl işlemler uygulanmaktadır. En yaygın ve etkili yöntemlerden biri olan pastörizasyon işlemi, gıdaların belirli bir sıcaklığa ısıtılması ve zararlı mikroorganizmaların inaktive edilmesini

sağlayarak gıdaların mikrobiyolojik güvenliğini arttırmaktadır. Aynı zamanda raf ömrünü uzatmakta ve tat kalitesinin korunmasına yardımcı olmaktadır.

2050 yılına kadar ABD ve Avrupa Birliği dahil olmak üzere birçok ülke net sıfır sera gazı emisyonuna ulaşmayı hedeflemektedir. Gıda endüstrisinde kullanılan geleneksel ısıtma teknolojileri, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlarla çalışmaları için karbon emisyonlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu bağlamda, CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması için endüstriyel ısıtmanın elektrikleştirilmesi kritik bir adım olarak öne çıkmaktadır (Huang ve Zhai 2021, Zhou vd. 2023). Bu noktada, fosil yakıt kullanan ve yüksek CO<sub>2</sub> emisyonu üreten endüstriyel teknolojilerin yerine, mikrodalga gibi yenilikçi ve sürdürülebilir proseslerin uygulanması, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik önemli bir adım olacaktır. Mikrodalga ısıtma, daha düşük enerji tüketimi sağlarken aynı zamanda gıda ürünlerinin kalitesini de artırmakta, böylece çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, gıda endüstrisinde sürdürülebilir proseslerin benimsenmesi hem çevresel hedeflere ulaşmak hem de sektörün uzun vadeli başarısını güvence altına almak için kritik bir öneme sahiptir.

Çalışma kapsamında yerel bir dondurma firmasından alınan dondurma örneklerine *Listeria monocytogenes* inoküle edilerek mikrodalga ısıtma ile pastörizasyonu sağlanmıştır. Kalite parametresi olarak uygulanan prosesin renk üzerine etkisi incelenmiştir. Lab-ölçekli bir mikrodalga sistemde yapılan bu çalışma temelinde ürün sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirme çalışması gerçekleştirilmiş, model sonuçları deneysel sıcaklık değişim verileri kullanılarak doğrulanmış ve model kullanımı ile endüstriyel skalada sürekli akış mikrodalga sistemi tasarlanmıştır.

Bu araştırma, mikrodalga ısıtma yöntemi ile dondurma ürünlerinin pastörizasyonunu ele alarak hem gıda güvenliğini artırmayı hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemeyi hedeflemektedir. Elde edilen verilerin, gıda sektöründe yenilikçi ve etkili çözümler geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1 Gıda Güvenliği ve Güvencesi

Ülkeler ve uluslararası kuruluşlar toplum sağlığı, ekonomi ve çevre ile doğrudan ilişkili olan tarımsal faaliyetler ve gıda üretimi konularında kritik faaliyetler yürütmektedir. Bu durum, yalnızca bireylerin sağlığını değil, aynı zamanda toplumların ekonomik sürdürülebilirliğini de etkileyen önemli bir meseledir. Küresel düzeyde, gıda güvenliği ve güvencesine yönelik yasal düzenlemeler, gıda üretim ve tüketim süreçlerinin sağlıklı ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu konular dikkate alınmadığında, gelecekte toplum için yeterli, güvenli ve sağlıklı gıdaya ulaşmak zorlaşacak, ayrıca gıda kaynaklı hastalıkların sıklığı artacaktır. FAO tarafından gıda güvencesi ‘bütün insanların, ihtiyaç duydukları temel gıdalara fiziksel ve ekonomik olarak erişebilmeleri’ gıda güvenliği ise ‘akut veya kronik olarak tüketici sağlığına zarar verebilecek tehlikelerin bütünü’ şeklinde ifade edilmiştir. Gıda güvenliği, gıdaların tarladan sofraya kadar geçen üretim, işleme, saklama, taşıma, dağıtım ve depolama gibi tüm sürecini kapsayan, bu süreç içerisinde sağlıklı durumu korunmuş gıdayı ortaya koymaktadır (Giray ve Soysal 2007; Erkmen 2010; Koç ve Uzman 2015).

Risk değerlendirmesi kapsamında gıdaların üretiminden tüketimine tüm süreç her aşamada değerlendirilmekte ve fiziksel, kimyasal ve biyolojik riskler tespit edilmektedir. Fiziksel tehlikeler gıdalarda bulunması istenmeyen cam kırıkları, böcekler, saç, tırnak, taş ve toprak gibi yabancı maddelerdir. Kimyasal tehlikeler bir amaçla dışarıdan eklenen gıda olmayan ve gıdalara çeşitli kaynaklardan karışan kimyasallardır. Örnek olarak deterjan kalıntıları, pestisitler ve diğer tarım ilaçları verilebilir. Biyolojik tehlikeler ise gıda bileşiminde yer alan zehirli maddeler (patateste solanin, bazı zehirli mantarlar gibi), gıdalara bulaşan mikroorganizmalar ve genetiği değiştirilmiş organizmalardır (GDO) (Giray ve Soysal 2007; Erkmen 2010; Koç ve Uzman 2015).

Gıda ürünleri birçok mikroorganizma grubunu içinde barındırabilmektedir. Bu mikroorganizmaların bir kısmı gıdalarda doğal olarak bulunken, bir kısmı ise gıda üretiminde kullanılmaktadır. Ancak, bir bölümü de gıdaların bozulmasına ve gıda

kaynaklı enfeksiyonlara yol açmaktadır. Gıdalarda meydana gelen bu mikrobiyolojik kontaminasyon ile gıda kaynaklı hastalıkların sayısı ise her geçen yıl artmaktadır. Gıda kaynaklı hastalıklar tüm canlılar için riski olup özellikle bağışıklık sistemi zayıf olan çocuklar, hamileler ve yaşlılar için daha büyük riskler oluşturmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından her yıl 600 milyon kadar kişinin kontamine gıdalar ile enfeksiyonlara yakalandığı ve bunların yaklaşık 420,000'inin yaşamını yitirdiğini bildirmiştir (Tutar vd. 2015; Sağlam ve Şeker 2016; Şireli ve Cengiz 2023).

Mikroorganizmaların bu bağlamda sorun yaratabilmesi için gıdanın mikroorganizma gelişimine elverişli olması, mikroorganizma sayısının hastalık oluşturacak düzeyde olması, nem, ısı, ortamdaki oksijen varlığı, pH vb. çevre koşullarının uygun hale gelmesi gerekmektedir (Giray ve Soysal 2007; Erkmn 2010; Koç ve Uzmay 2015).

Ambalajsız olarak satılan gıdalar oksijen ile temas ettiğinden ve uygun nem ve çevre koşulları sağlanamadığından tüketiciler için risk oluşturmaktadır. İşleyici ve arkadaşları (2015) da Van ilinde satılan ambalajlı ve ambalajsız dondurmaların mikrobiyolojik kalitesini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla içeriği farklı 50 adet dondurma analiz edilmiştir. Çalışma sonunda 5 örnekten *L. monocytogenes* izole edilmiştir. Patojen mikroorganizma riski ambalajsız satılan dondurmalarda daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Diğer taraftan aynı grup içerisindeki farklı içerikli dondurmalar arasında da koliform sayısı ve maya/küf sayısı açısından istatistiksel öneme sahip farklar tespit edilmiştir. Meyveli dondurmalarda pH değerinin düşük olmasına bağlı olarak mikroorganizma sayısı daha düşük saptanmıştır.

CDC 2020 verilerine göre gıda kaynaklı olarak en çok rapor edilen vakalar: *Campylobacter*, *Salmonella*, Shiga toksin üreticisi *Escherichia coli* (STEC), *Shigella*, *Yersinia*, *Cyclospora*, *Vibrio* ve *Listeria* ile ilişkilidir (Sağlam ve Şeker 2016; Şireli ve Cengiz 2023). Süt ve süt ürünlerinde ise en fazla görülen mikroorganizmalar; *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Brucella*, *Escherichia coli*, *Mycobacterium tuberculosis*, Hepatit A virüsü, *Listeria*, *Salmonella*, Poliovirus ve *Toxoplasma*'dır (Giray ve Soysal 2007; Erkmn 2010; Koç ve Uzmay 2015).

Uğuz ve Kireççi (2018) Kahramanmaraş ili ve çevre illerde satılan 50 adet dondurma örneğinin mikrobiyolojik kalitesi üzerine çalışmışlardır. Kahramanmaraş dondurması gibi bazı dondurmalar ve üreticileri sadece süt, şeker ve salep kullanarak üretim yapmakta olup, bu durum mikrobiyal kontaminasyona elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Aynı zamanda sıklıkla tüketildiği yaz mevsiminde sıcaklık artışına bağlı olarak da bakteri üretim hızı artmaktadır. Çalışmada, patojen bakteriler membran filtrasyon yöntemi kullanılarak izole edilmiş ve tanımlanmıştır. Çalışma neticesinde; 9 örnekte de koliform grup içerisinde yer alan *Escherichia coli*'nin tespit edildiği özellikle belirtilmiştir.

İstanbul içerisinde satışa sunulan dondurmaların yaklaşık %13' ünün Gıda Kodeksi Mikrobiyoloji Kriterler Tebliğine uymadıkları belirlenmiştir (Abdünnur 2016). Erzurum piyasasında çeşitli firmalardan toplanan 75 adet dondurma örneğinde analizler yapılmış ve ortalama değer olarak 4,45 log kob/g toplam aerobik mezofilik, 4,89 log kob/g psikrofil, 3,20 log kob/g *Enterococcus* ve 2,54 kob/g *Enterobacteriaceae* tespit edilmiştir. Her ne kadar patojen bakteri tespit edilmemiş olsa da mevcut mikrobiyolojik durum ısıtma işlem veya tedarik zincirinde yaşanan sorunlara dikkat çekmektedir (Cubukçi ve Aydemir Atasever 2018). 2022'de yapılan bir diğer çalışmada ise 10 adet mahalli, 10 adet endüstriyel üretim yapan firmadan numune alınmış ve sonuç olarak her ne kadar endüstriyel ürünler yeterli kaliteye sahip olsa da mahalli üreticilerden alınan örneklerin standart dışı olduğu ve gıda güvenliği açısından sakıncalı seviyede bakteriyel yüke sahip oldukları belirlenmiştir (Akar ve Özdemir 2022).

Konya ilinde yapılan bir çalışmada 150 dondurma örneğinin 6 tanesinde *S. aureus* tespit edilmiştir, bu durum hijyenik koşullardaki eksikliğe ve hammaddeye uygulanan yetersiz işleme bağlanabilmektedir (Gunes vd. 2022). Fethiye ve civarında açıkta satılan hazır bazı gıdalarda koliform bakteri sayısı belirlenmesine yönelik bir çalışmada paketli olmayan dondurmalarda ortalama 5,09 log kob/g, buzlaş ve kar şerbeti numunelerinde ortalama 1,81 log kob/mL bulunmuştur. Ayrıca dondurma örneklerinin yaklaşık %80'inde koliform tespit edilmiştir (Çiftçi ve Öncül 2021). Van ili içerisinde tüketilen dondurmaların % 13,3'ünde *E. coli* bulaşısı tespit edilmiştir. (İşleyici vd. 2016). Sade dondurmalarda bu oranın %8, meyveli dondurmalarda ise %5,3 olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, Kayseri'de yapılan bir araştırmada, incelenen dondurma örneklerinin

%24' ünün *Listeria* pozitif olduğu tespit edilmiştir. Adana ve Kahramanmaraş şehirlerinde satılan dondurmalar üzerinde yapılan incelemelerde ise %13,8 ile %17,2 arasında değişen oranlarda *Listeria monocytogenes* saptanmıştır. Aydın'da açıkta satılan sade dondurmaların bileşimini ve mikrobiyolojik kalitesini incelemek amacıyla yapılan bir çalışmada, toplam mezofilik aerobik bakteri (TMAB), toplam psikrofil aerobik bakteri, *Enterobacteriaceae*, koliform grubu bakteriler ve *Staphylococcus aureus* sayılarının ortalamaları sırasıyla 5, 16, 4, 27, 3, 56, 3,42 ve 0,56 log kob/g düzeyinde tespit edilmiştir. Analiz edilen örneklerin %20'sinde *Staphylococcus aureus*'a rastlanılmış olup %17' sinde *Listeria ivanovii* varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca dondurma üretim tesislerindeki makine ve aletler üzerinde *Listeria monocytogenes*'in biyofilm oluşturabildiklerine dair çalışmalar mevcuttur (Badayman 2018).

Yücel ve Çıtak (2000); Mayıs ve Ağustos 1998 tarihlerinde Ankara'nın değişik pastanelerinden temin edilmiş 30 farklı dondurma örneği üzerinde mikrobiyolojik analizler (TMAB, *Staphylococcus aureus*, koliform grubu bakteri, *Escherichia coli*, maya ve psikrofil bakteri sayımı) yapmışlardır. Araştırma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde örneklerin büyük çoğunluğunun mikrobiyolojik olarak standartları karşılamadığı tespit edilmiştir.

*Listeria* türü mikroorganizma enfeksiyonlarının büyük bir çoğunluğu süttten kaynaklanmaktadır. Çünkü, süt, bu mikroorganizmaları mide asidinin tahribatından koruyarak hastalıkların bulaşmasını ve yayılmasını kolaylaştırmaktadır (Gönülalan ve Gönülalan 2010). Ayrıca bu bakteriler gelişimlerini oldukça geniş bir sıcaklık ve pH aralığında, yüksek tuz konsantrasyonlarında, düşük oksijen seviyelerinde ve su aktivitelerinde canlılıklarını sürdürebilirler. Dondurma gibi soğuk koşullarda muhafaza edilen ürünlerde bu sebeplerden sıkça karşılaşılan bir mikroorganizmadır (Sağlam ve Şeker 2016; Bilgehan vd. 2021; Erol ve Taşçı 2021; Gönen 2021; Barel vd. 2023).

Gönülalan ve Gönülalan (2010); Kayseri ilinde açıkta satışa sunulan yarısı sade yarısı meyveli olmak üzere 50 adet dondurmada *Listeria monocytogenes* varlığını araştırmışlardır. Sade örneklerin 6 tanesinde meyveli örneklerin ise 3 tanesinde *Listeria* türleri ile kontaminasyon tespit edilmiştir.

Bir çalışmada pastörize koyun sütüne  $1,0 \times 10^6$  ve  $2,0 \times 10^6$  düzeylerinde *Listeria monocytogenes* suşu inoküle ederek yaptıkları üretimde  $-38$  ve  $-18$  °C'de 7.5 ay depolama sonrası %98 oranında *L. monocytogenes* eliminasyonu olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Başka bir çalışmada ise  $+4$  ve  $+21$  °C'de inkübasyona bırakılan dondurma türlerinde tür fark etmeksizin *L. monocytogenes* gelişiminin aynı düzeyde olduğunu görmüşlerdir (Gönülalan ve Gönülalan 2010).

*Listeria monocytogenes* *Listeriaceae* familyası içerisinde bulunan en patojen türdür. Neredeyse tüm gıdalardan izole edilebilen gram (+), fakültatif anaerob, katalaz (+), oksidaz (-), sporsuz, çubuk formda ve biyofilm oluşturabilen bir mikroorganizmadır.  $0-48$  °C arasında yaşamlarını sürdürebilip optimum üreme sıcaklıkları  $37$  °C'dir. *Listeria monocytogenes* gıda kaynaklı bir hastalık olan Listeriozis'in ana etkenidir. Listeriozis insanlarda hastaneye yatış, ölü doğum, düşük, sepsis ve ölüm olarak sonuçlanabilmektedir (Sağlam ve Şeker 2016; Bilgehan vd. 2021; Erol ve Taşçı 2021; Gönen 2021; Barel vd. 2023).

Gıda güvenliği temelde 4 prensibe dayanmaktadır (Koç ve Uzmay 2015):

- 1) Gıdalara sağlık açısından zararlı ve istenmeyen etkenlerin bulaşmasını önleme,
- 2) Bulaştığı takdirde bu etkenleri uzaklaştırma (eliminasyon),
- 3) Bu zararlıların çoğalıp yayılmasını durdurma (inhibisyon) ve
- 4) Bu zararlıların etkisiz hale getirilmesi.

Gıda güvenliğini sağlamak için uygulanan yöntemler, zararlı mikroorganizmaların kontrol altına alınmasında kritik bir öneme sahiptir. Özellikle *Listeria monocytogenes* gibi patojenlerin gıdalarda bulunma riski, bu yöntemlerin etkinliğini arttırmayı gerektirir. Bu bağlamda patojenlerin inhibisyonunda kullanılan yöntemler, gıda güvenliğinin sağlanmasında nemli rol oynamaktadır.

*Listeria monocytogenes* inhibisyonunda yüksek hidrostatik basınç uygulaması, ışınlama, mikrodalga uygulama ve ortama rekabetçi tür ilavesi gibi bazı teknikler kullanılmaktadır. Yüksek hidrostatik basınç uygulamaları ısı işlem uygulamadan gıdaların besinsel, duyuşsal ve fonksiyonel özelliklerini koruyarak raf ömürlerini uzattıklarından gıda

endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, suyun basınç kuvvetinden yararlanılarak gıdalara 100 MPa'ın üzerinde bir basınç uygulanmakta ve bu sayede patojenlerin eliminasyonu hedeflenmektedir. Burada yöntemin mikroorganizma üzerine etkisi uygulama süresine, basıncın gücüne ve mikroorganizmaların serotipine bağlı olarak değişmektedir. Artan basınç ve uygulama süresi inaktivasyon hızını da arttırmaktadır. Ayrıca yöntemin etkinliği açısından gıdanın içerdiği bileşenler de önem arz etmektedir. Bazı gıdalar yüksek şeker, protein ve yağ konsantrasyonları ve düşük su aktiviteleri ile yöntemin etkinliğini azaltırken, yüksek pH'ya sahip gıdalarda ise antimikrobiyal etkinlik artmaktadır. Yüksek hidrostatik basınç uygulamaları, *Listeria monocytogenes* üzerinde hücre içi protein yapısını, pH dengesini ve hücre zarı geçirgenliğini bozarak inaktive edici etki göstermektedir. Işınlama gıdalarda çoğunlukla parazitler ve spor oluşturmeyen mikroorganizmaların eliminasyonunda kullanılmaktadır. Gama, alfa, x ve elektron ışınları gıda endüstrisinde en sık kullanılan ultraviyole (UV) ışınlardır. Bu ışınların, 254 nm dalga boyunda klor içeren antiseptik özellikteki kimyasal bileşiklerden daha efektif olduğu belirlenmiştir. Işınlamanın etkinliği ise absorbe edilen ışık miktarı, uygulanan doz, atmosfer ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Işınlama yönteminde hücre için DNA hasarı ile mikroorganizma inaktivasyonu sağlanmaktadır. WHO tarafından 10 kG'den fazla dozajda uygulanan ışınlamanın insanlar için toksik olduğu bildirilmiştir. Ayrıca yöntemin etkinliği pürüzlü yüzeylerde azalmaktadır. Yöntemin etkinliğini arttırmak için ultrason gibi diğer tekniklerle kombinasyonları da kullanılmaktadır. Bazı çalışmalarda rekabetçi bakteri türü olarak laktik asit gibi bakterilerin kullanıldığı da gözlenmektedir. Laktik asit bakterileri, metabolizma için ihtiyaç duydukları besin maddelerine karşı girdikleri rekabet ile çeşitli patojen ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların gelişimine ve üremelerine karşı inhibe edici etki göstermektedir. *L. Monocytogenes* ile laktik asit bakterileri arasında bu etkiyi gözlemek için Amezcua ve Brashears (2002) vakum paketlerinde frankfurter sosis ve jambona inokülasyon yapmışlardır. Çalışma sonucunda frankfurter sosilerde 3,25 log evrelik bir azalış gözlerken jambonlarda bir değişiklik gözlemlenmemişlerdir (Gönen 2021). Mikrodalga uygulamaları ise geleneksel yöntemlerden kısa proses süresi ve ısı işlem homojenliği bakımından daha avantajlı bir uygulamadır. Yöntemin patojen mikroorganizmalar üzerinde etkisi hızlı bir yıkım, hücre içi transferin bozulması ve bazı sentez reaksiyonları

üzerindeki olumsuz etkisinden gelmektedir. *Listeria monocytogenes* üzerinde de etkili olduğunu gösteren bazı çalışmalar bulunmaktadır (Sung ve Kang 2014; Gönen 2021).

Süt ve bazı süt ürünlerinde raf ömrünü uzatmak ve stabilitesini arttırmak amacıyla çoğunlukla ultra yüksek sıcaklık (UHT) ve pastörizasyon gibi ısı işlemleri uygulanmaktadır. UHT; 135-150 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda kısa süreli ısı işlemleridir. Pastörizasyon ise patojenik mikroorganizmaların inhibisyonu için kullanılan 100 °C'nin altındaki ısı işlemleri tanımlanmaktadır. Isıl işlemlerden sonra ürünlerdeki kontaminasyonları engellemek için aseptik koşullar altında ürünler paketlenmelidir. (Baysan 2024).

Son yıllarda tüketicilerin de bilinçlenmesiyle beraber az işlem görmüş ürünlere yönelim artmıştır. Bu durum ise farklı teknolojilerin kullanımını öne çıkarmıştır. Yüksek hidrostatik basınç, ultrasonik işlem, vurgulu elektrik alan ve ultraviyole ışık uygulaması ısı olmayan yenilikçi yöntemlerdir. Yüksek hidrostatik basınç ya da diğer adıyla yüksek basınçlı işleme yönteminde esnek torbalar içerisindeki bir kaptaki yüksek basınç ile gıda ürünü basınca maruz bırakılmaktadır. Bu yöntem gıda kaynaklı patojenleri etkisiz hale getirirken gıdaların besinsel ve duyu değerlerinde de istenmeyen değişikliklere de sebep olmamaktadır. Cruz ve arkadaşları (2007) hidrostatik basınç uygulaması ile soya sütünü sterilize ettikleri çalışmalarında 200 ve 300 MPa'da çalışmışlardır. Bu basınç değerlerinde toplam mezofilik aerobik bakteri sayısı (TMAB) ve spor sayısındaki değişiklikleri değerlendirmişlerdir. Artan basınçla TMAB sayısındaki azalış artmaktadır. Çalışma sonunda 300 MPa – 75 °C'de işlem gören soya sütleri UHT işlemi ile kıyaslanmış ve sterilite yönünden birbirleri yerine kullanılabilir olduğu gözlenmiştir (Baysan 2024).

Ultrasonik işlem teknolojisi son yıllarda kullanılmaya başlanan yeni bir teknolojidir. Ultrasonik uygulamalarda mikroorganizmaların hücre zarının delinmesiyle birlikte hücre matriksinin dışarı çıkar ve serbest radikal oluşumu gözlenmektedir. Bu kapsamda mikroorganizmalar etkinliğini yitirirler. Ultrasonik işlemlerde mikrobiyal inaktivasyon kaviteasyon kuvveti ile değişmektedir. Yöntemin ısı ve basınç ile kombinasyonlarının mikroorganizma sporları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Ultrasonik işlemin badem

sütünde *Listeria monocytogenes* türleri üzerinde gecikme fazı meydana getirdiğini gösteren çalışmalar literatürde mevcuttur (Baysan 2024).

Mikroorganizmaların hücre duvarlarına uyguladıkları kısa elektrik darbeleri ile vurgulu elektrik alan mikroorganizma inaktivasyonunu sağlamaktadırlar. İşlemin etkinliği mikroorganizma türü, işlem süresi, elektrik alan yoğunluğu ve uygulanan güce bağlıdır. Yöntem tek başına bir sterilizasyon sağlayamasa da ısıl işlemler ile kombine edildiğinde sterilizasyon potansiyeli olduğu bazı çalışmalarda gösterilmiştir (Baysan 2024).

Ultraviyole (UV) ışık uygulamaları termal olmayan bir yöntemdir. Dört farklı spektrumda uygulanabilirler. Bunlar;

100-200 nm (Vakum-UV)

200-280 nm (UV-C),

280-315 nm (UV-B),

315-400 nm (UV-A)'dir (Baysan 2024).

Gıdaların mikrobiyal dekontaminasyonu için en etkili olan aralık UV-C'dir. Ancak işlemin küf sporları üzerinde yeterince etkili olmadığı gözlenmiştir. Termal pastörizasyon yöntemleri ile kıyaslandığında UV-C reaktördeki pastörizasyonun hedeflenen sonuçları elde edemediği gözlenmiştir. Ancak *Escherichia coli* ve *Bacillus cereus* sporları üzerinde etkili şekilde kullanılabildiği görülmüştür (Baysan 2024).

Dondurma gibi kıvamlı bir ürünlerdeki ısıl işlem uygulamalarında sıyrılmalı veya yüzey kazıyıcı "scraped surface" ısı değiştiriciler genel olarak tercih edilmekle beraber plakalı ısı değiştiriciler de kullanılabilmektedir (Bylund ve Systems 2015). Konvansiyonel olarak uygulanan ısı değiştirici sistemler ağırlıklı olarak fosil yakıt kullanımına bağlı düzenekler içermektedir. Bu durum karbon ayak izi bakımından da sürdürülebilir üretim açısından sakınca oluşturmaktadır. Ayrıca ısıtma sürecinde aracı akışkanın buhar veya sıcak su olmasına bağlı olarak dondurma karışımında kontrolsüz veya tekdüze ısınmanın oluşturulamamasına bağlı kalite kaybı ve riskler oluşabilmekte ve ekstra maliyet getirmektedir. Konvansiyonel yöntemlerin getirdiği bu dezavantajlardan kaynaklı olarak endüstriyel işletmeler yenilikçi yöntemlere yönelmektedir. Bu kapsamda yenilikçi ısı

işlem teknolojileri arasında yer alan dielektrik ısıtma prensibiyle çalışan mikrodalga (MW) ve radyofrekans (RF) uygulamaları göze çarpmaktadır.

Karacabey ve arkadaşları (1989); dondurma karışımının ısıtma işlemi sonucunda fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerindeki değişimi belirlemek için 3 farklı koşulda (68 °C’de 30 dk, 80 °C’de 25 s ve 90 °C’ye kadar ısıtıp soğutma) çalışmışlardır. Bu işlemler sonucunda dondurma karışımlarının titrasyon asitliği, protein stabilitesi ve viskozitesi etkilenmemiş olup TMAB sayısında tüm koşullarda azalma gözlenmiştir. Patojen stafilocok ve patojen olmayan stafilocok sayılarında en fazla azalma 90 °C’ye ısıtıp soğutma uygulamasında tespit edilmiş olup tüm koşullarda koliform bakteri varlığına rastlanmamıştır.

Dondurma karışımları ısıtma işlemi maruz bırakıldığında lipaz enziminin inaktive olmasıyla da acılaşıma engellenmekte, karışımın dövülme niteliği ve yapısal kalitesi ise artmaktadır (Karacabey vd. 1989). Bu nedenle uygulanacak olan ısıtma işlemi etkinliğinin kontrol edilebilmesi proses tasarım ve optimizasyonu açısından önemli bir noktadır.

Erol (2021) yılında badem, soya ve yulaf sütünün pastörizasyonunda mikrodalga ısıtma yöntemini kullandığı çalışmada bu yöntemi geleneksel ısıtma yöntemleriyle kıyaslamıştır. Tüm vegan süt ürünlerinde 38 s 360 W güç uygulamasında mikrodalga uygulaması sonucu *Salmonella Enteritidis*’de 5 log’dan fazla azalma gözlemlenmiştir.

Her ne kadar dondurma karışımlarında ısıtma işlemi uygulamaları özellikle ısı değiştirici sistemler kullanılarak uygulanıyor olsa da dondurma temelli gıda güvenliği vakaları özellikleri son yıllarda gözlenmeye devam etmektedir. Haziran 2022’de dondurma tüketimi sonrası Amerika’da yer alan 11 farklı eyalette 28 vaka ve 1 ölüm bildirilmiş olup ürünler toplatılmıştır (CDC 2022). Çok yakın bir süreçte Ağustos 2023’te dondurma tüketimi sonrası *Listeria* şüphesiyle Brooklyn, New York’da 2 kişi hastaneye başvurmuştur (FDA 2023). Haziran 2024’te de çeşitli markalara ait dondurmalar rapor edilen bir hastalık olmamasına rağmen muhtemel *Listeria* şüphesiyle geri çağırılmıştır (FDA 2024).

## 2.2 Dondurma ve Dondurma Üretimi

### 2.2.1 Dondurma

Dondurma, tarihi çok eskiye dayanan, toplumun her kesiminden insanlar, özellikle bağışıklık sistemi yetişkinlere oranla daha güçsüz olan çocuklar tarafından sevilerek tüketilen yağ, yağsız süt kuru maddesi, şeker, emülgatör, stabilizer ve tercihe bağlı olarak tat ve renk için kullanılan çeşitli maddelerden oluşan bir karışımdır. İşlenmesi ile fizikokimyasal yapıya sahip, besleyiciliği yüksek bir süt ürünü haline gelmektedir. Tüketimi her geçen yıl artan dondurma; protein, kalsiyum, vitamin D, vitamin A ve riboflavin açısından zengin bir üründür. İçeriği itibari ile ise bütün mikroorganizmaların gelişimi açısından uygun bir ortam oluşturmaktadır (Güven vd. 2010; İşleyici vd. 2015; Uğuz ve Kireççi 2018; Yücel ve Çıtak 2000; Kiper vd. 2022).

Türk Standartları Enstitüsü, dondurmayı; krema, süt ürünleri, içme suyu, yumurta, sakaroz ve çeşitli katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılıp pastörize edilmesiyle elde edilen bir ürün olarak tanımlamaktadır (Beşir vd., 2019). Türk Gıda Kodeksi Dondurma Tebliği'ne (2005) göre dondurma, pastörize edilmiş karışımın uygun tekniklerle işlenip dondurulması sonucu, yumuşak ya da sertleştirilmiş formda tüketime sunulan bir üründür. Dondurma karışımı ise süt ve süt ürünleri, su, şeker ve izin verilen katkı maddeleri ile gerektiğinde salep, yumurta, aroma ve çeşni maddeleri içeren, henüz dondurulmamış karışım ürünü olarak ifade edilmektedir (İşleyici vd., 2015).

Dondurma üretimi ülkemizde geleneksel ve endüstriyel olarak yapılabilmektedir. Küçük işletmeler daha ilkel yöntemlerle geleneksel üretim yapmaktadır. Bu ürünler genellikle yaz aylarında yoğun olarak üretilmekte ve kısa sürede tüketime sunulmaktadır. Endüstriyel üretim ise modern işletmelerde ve hijyenik şartlar altında tüm yıla yayılarak gerçekleştirilmektedir (İşleyici vd. 2015).

## 2.2.2 Dondurma üretimi

Dondurma üretiminde ilk aşama karışımın reçetesinin oluşturulmasıdır. Reçete içerisinde belirtilen madde ve miktarlarda hammaddeler bir araya getirildikten sonra karıştırılır. Karışım homojen bir hale getirildikten sonra pastörizasyon işlemi uygulanarak süt ve diğer hammaddelerden kaynaklı gelişebilecek kontaminasyon riskinin önlenmesi amacıyla karışım pastörize edilir. Pastörizasyon sıcaklığı değişim göstermekle birlikte genellikle 70-90 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır. Daha sonra hızlı ve soğutma yapılarak 24 saat 2-5 °C arasında olgunlaştırma için bekletilmekte; hava ile karışım yapılan ürünler dondurulmakta ve ambalajlara dolum yapılmaktadır. Endüstriyel dondurma üretimi akış şeması şekil 2.1 'de detaylı olarak gösterilmiştir.

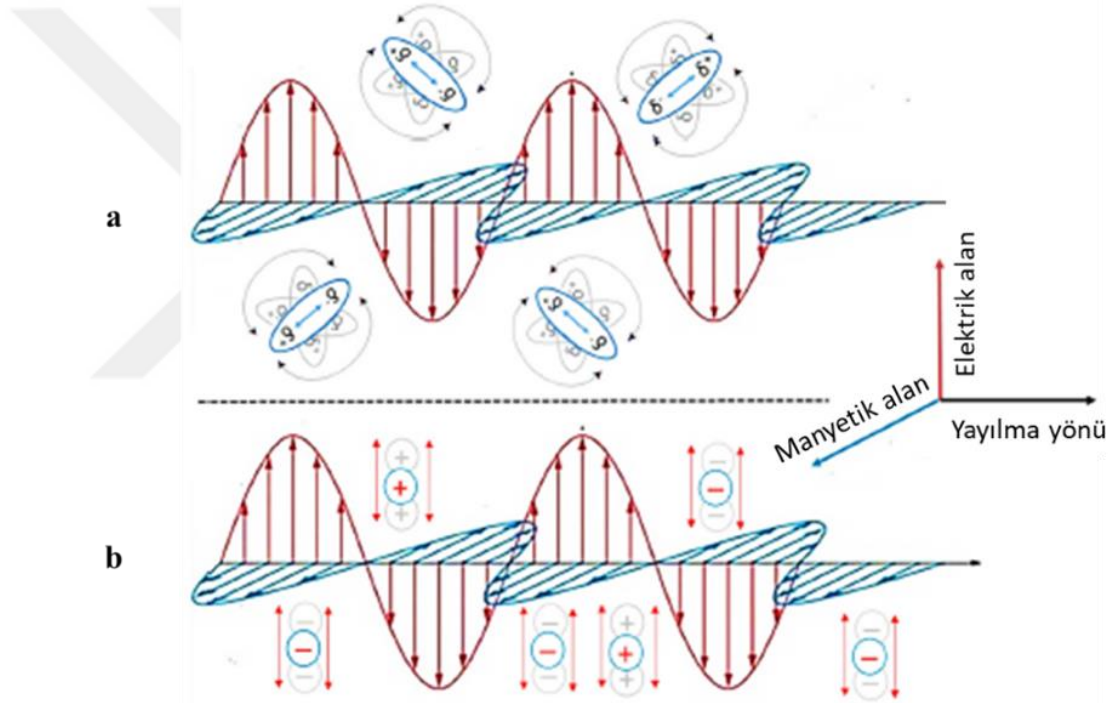


Şekil 2.1 Endüstriyel dondurma üretimi

## 2.3 Dielektrik Isıtma Yöntemleri

Radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW), dielektrik ısıtma uygulamaları olup, salınım hareketi yapan ve birbirine dik yönlerde ilerleyen manyetik ile elektrik alan etkisine bağlı bir mekanizma ile üründe sıcaklık artışı sağlamaktadırlar. Elektrik alan ve manyetik alan oluşumu ile iyonik iletim ve dipol rotasyon mekanizması şekil 2.2'de verilmiştir. Bu elektromanyetik dalgalar tarafından aktarılan enerji mekanizması ise radyasyon olarak tanımlanmaktadır. Elektromanyetik radyasyon 16 m dalga boyundan kısa kozmik ışınlar ve 10 km'nin üzerinde olan elektromanyetik dalgaları kapsayan geniş bir aralığa sahiptir. Elektromanyetik radyasyon, kendi içerisinde iyonize ve iyonize olmayan olarak iki gruba ayrılmaktadır. İyonize radyasyon; gama ve X ışınları ile birlikte alfa, beta ve nötron parçacıklarından oluşmaktadır. İyonize radyasyonun kanserojenik yan etkileri

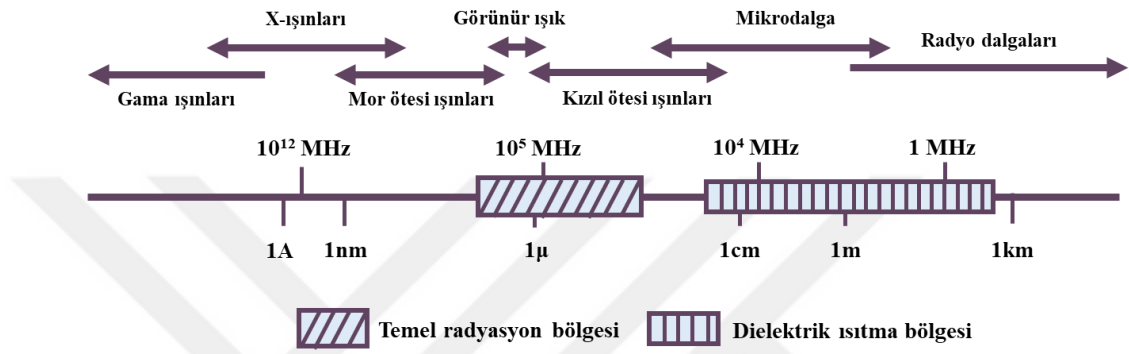
bulunmaktadır. Bu sebeple iyonize olmayan radyasyon sıklıkla tercih edilmektedir. Mikrodalgalar ve radyo dalgaları biyolojik olarak önemli atomları iyonize hale getirmek için gereken ( $<10$  eV) enerjiyi sağlamadığından ötürü iyonize olmayan radyasyon grubuna girmektedir. Mikrodalga ve radyofrekans radyasyonunun absorpsiyonu ile meydana gelecek en olası etki ısıtmadır. Mikrodalga ve radyofrekans dalgalarının etkili olduğu alan elektromanyetik spektrumda dielektrik bölge olarak adlandırılmaktadır. Bu dalgalar ile yapılan ısıtma işlemlerine ise dielektrik ısıtma denmektedir. Temel radyasyon bölgesi ve dielektrik ısıtma bölgesi şekil 2.3'te yer alan elektromanyetik spektrumda verilmiştir.



Şekil 2.2 Mikrodalga ısıtmayla ilişkili iyonik iletim (a) ve dipol rotasyon (b) mekanizmaları (Pratap-Singh vd. 2024)

Dielektrik ısıtmada ürün içerisinde hacimsel olarak oluşan ısı enerjisi elektromanyetik alan ile gıdalardaki dipolar ve iyonik yükler arasındaki etkileşim ile sağlanmaktadır (Yazar ve İçier 2013, Dag vd. 2022). Bu duruma ek olarak polar bileşiklerin salınımı da hacimsel ısı oluşumuna katkı sağlamaktadır. Elektrik alana bağlı olarak iyon iletimi ve dipolar rotasyon oluşumu şekil 2.4'te şematik olarak verilmiştir. RF dalgaları 1 ile 300 MHz aralığında, MW ise 300 ile 3000 MHz frekans aralığında (Marra vd. 2007) olup RF

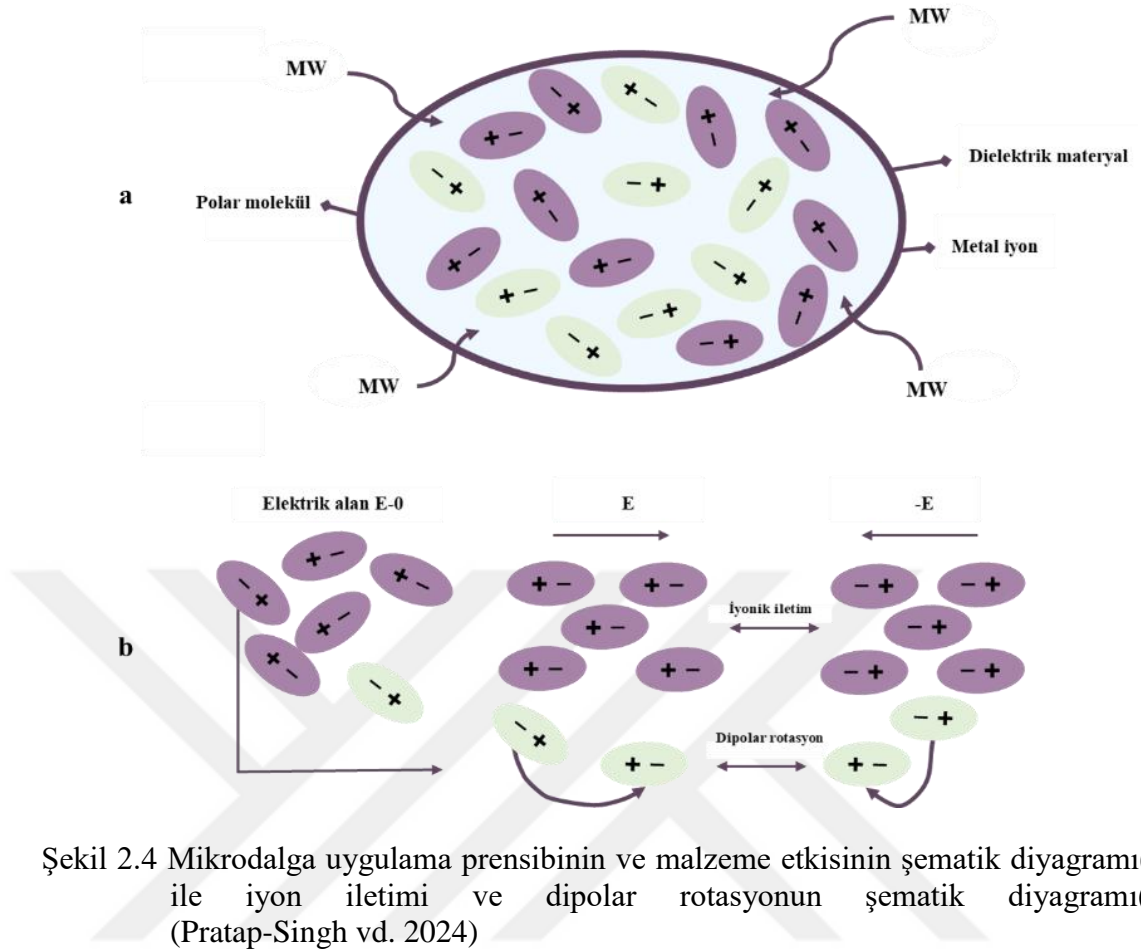
uygulamada 13.56, 27.12 ve 40.68 MHz; MW uygulamasında ise 915 MHz ve 2450 MHz frekansta çalışan sistemler kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Bu iki yöntemin temel farkı uygulanan frekansa bağlı olarak uygulanan dalga boyu ve ürün (frekansına da bağlı olarak değişen) dielektrik özelliklerine bağlı olarak penetrasyon derinliğindeki değişimdir (Uyar 2014; Altın 2017; Chandrasekaran vd. 2012, Yazar ve İçier 2013, Mello vd. 2014, Zhou vd. 2023).



Şekil 2.3 Elektromanyetik Spektrum (Yazar ve İçier 2013)

Çizelge 2.1 RF ve MW için ISM frekansları ve dalga boyları (Awuah vd.2014)

	Radyo frekans			Mikrodalga	
	13.56	27.12	40.68	915	2450
Frekans (MHz)	13.56	27.12	40.68	915	2450
(m)	22	11	7.4	0.33	0.12



Şekil 2.4 Mikrodalga uygulama prensibinin ve malzeme etkisinin şematik diyagramı(a) ile iyon iletimi ve dipolar rotasyonun şematik diyagramı(b) (Pratap-Singh vd. 2024)

Mikrodalga ısıtmada mikrodalga içerisine konulan ürün mikrodalga enerjisini absorbe eder ve onu ısıya dönüştürür. Isıtma, kimyasal bağ sebebiyle kalıcı polarize olan moleküllerin dipolar polarizasyonundan kaynaklanmaktadır ve yüksek frekanslı elektrik alan varlığında moleküller hizalanır. Buradaki hizalanma saniyede bir milyon kez tekrarlanır ve bu sayede moleküller iç sürtünmeye bağlı hacimsel ısınmaya sebep olur. Dielektrik özellikler, penetrasyon derinliği, frekans değeri, çalışma modu (tek veya çok modlu), mikrodalga kavitesi, fırın içerisindeki yerleşim ve ürün geometrisi mikrodalga ısıtma ve ısı dağılımını etkileyen faktörlerdir. Büyük hacimlerde ürün hacmi mikrodalga enerjisini dışarıdan içeriye emerken daha küçük boyutlarda içeriden dışarıya doğru bir ısınma gerçekleşmektedir (Chandrasekaran vd. 2012, Kalinke vd. 2022).

Mikrodalga ile etkileşimlerine göre malzemeler üçe ayrılırlar (Chandrasekaran vd. 2012, Mello vd.2014):

- 1- Mikrodalğanın nüfuz etmediği ve yansıtıldığı opak veya elektrik iletkenleri,

- 2- Mikrodalgaların ne yansıtıldığı ne de emildiği, çok az zayıflayarak malzemeden iletildiği düşük dielektrik kayıplı veya şeffaf malzemeler ve
- 3- Dielektrik kayıp faktörünün değerine bağlı olarak mikrodalga enerjisini belirli bir oranda emen ve ısıya dönüştüren emiciler veya yüksek dielektrik kayıplı malzemeler.

**Dielektrik özellikler:** Mikrodalgalardan kaynaklanan ısıtmanın etkisini değerlendirebilmek için dielektrik özelliklerin bilinmesi önemlidir. Gıdaların dielektrik özellikleri bileşimi, sıcaklığı ve frekansına bağlı değişkenlik göstermektedir. Bir dielektrik materyalin mikrodalgayı emme ve enerji depolama yeteneği  $\epsilon^*$  ile gösterilen karmaşık geçirgenlik değeri ile verilir.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

Burada  $\epsilon'$  ile gösterilen dielektrik sabiti materyalin enerji depolama yeteneğini,  $\epsilon''$  ile gösterilen dielektrik kaybı ise materyalin enerjisi ısıya dönüştürme yeteneğini ifade eder. Dielektrik kaybının dielektrik sabitine oranı ise kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) olarak adlandırılmaktadır.

$$\tan\delta = \frac{\kappa''}{\kappa'} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2)$$

$\kappa''$  ve  $\kappa'$  sırasıyla bağıl dielektrik sabiti ve bağıl dielektrik kaybıdır.

$$\kappa' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad \text{ve} \quad \kappa'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad (3)$$

**Penetrasyon derinliği:** Mikrodalgaların materyal ile etkileşimini ölçmek için penetrasyon derinliğinden yararlanılmaktadır. Penetrasyon derinliği gücün yüzeydeki derinliğinden  $e^{-1}$  'e düştüğü malzemenin yüzeyinden uzaklığı ifade etmektedir.

$$D_p = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{2\pi f} \left( \frac{2}{\mu\mu_0\epsilon_0\kappa'} \right)^{1/2} \left[ \left( (1 + \tan^2\delta)^{1/2} - 1 \right) \right]^{-1/2} \quad (4)$$

$c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$  ve  $\mu' = 1$  için denklem tekrar yazılırsa;

$$D_p = \frac{c}{\sqrt{2}\pi f \left[ \kappa' \left\{ \sqrt{1 + (\kappa''/\kappa')^2} - 1 \right\} \right]^{1/2}} \quad (5)$$

$\alpha$  azalma faktörünü,  $c$  ışık hızını,  $f$  frekansı,  $\mu'$  manyetik geçirgenliği,  $\varepsilon_0$  serbest alan geçirgenliğini ( $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m) ve  $\mu_0$  ise serbest alan geçirgenliğini ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m) temsil etmektedir.

Daha büyük dalga boyları ve azalan frekans ile birlikte penetrasyon derinliği artmaktadır. 100 MHz'in altında kalan frekanslarda, penetrasyon derinliği "m" mertebesinde olup bu durum kayıp faktörleri aşırı yüksek olmadığı müddetçe mikrodalga enerjisinin penetrasyon derinliği açısından sorun teşkil etmektedir. Ancak mikrodalgaya yakın frekanslarda penetrasyon derinliği materyalin boyutundan küçük olup mikrodalga ısıtma ile ısınabilmektedir. Aynı şekilde penetrasyon derinliği materyalden daha küçük olduğunda ise sınırlı penetrasyon kaynaklı tekdüze olmayan bir ısıtma gerçekleşecektir (Chandrasekaran vd. 2012).

Gıda işleme yöntemi olarak önerilen yenilikçi elektriksel yöntemlerden olan mikrodalga uygulaması ile;

- Hem ürün sıcaklık dağılımı kapsamında, tekdüze ısıtma hem de arzu edilen sıcaklıkların tam bir kontrolle gerçekleştirilmesi mümkün olabilecektir.
- Ayrıca bu sayede fosil yakıt kullanımı yerine temiz enerjiye geçiş sağlanması da işletmelerin karbon ayak izini azaltması noktasında da önemli avantaj sağlama potansiyeline sahip bir temel oluşturacaktır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Dondurma üretim sürecinde dondurma karışımının mikrobiyal yükünün azaltılması ve güvenli bir seviyeye indirilmesi gereklidir. Bu hususta yenilikçi ısıtma işlem teknolojileri arasında yer alan mikrodalga uygulamanın hedef sıcaklığa hızlı ulaşılması ve enerji sarfiyatının azaltılması açısından önemli bir avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında da dondurma karışımının mikrodalga sistemde pastörizasyonu, proses sırasında üründe meydana gelen değişimlerin belirlenmesi, mikrodalga uygulama sürecinde üründe meydana gelen sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirilmesi, bu modelin deneysel sıcaklık değişim verileri kullanılarak doğrulanması ve doğrulanan model kullanılarak endüstriyel boyutlarda bir sürekli akış mikrodalga sistem tasarlanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda çalışma kapsamında ısıtma işlem uygulamanın etkinliği, ürün reolojisi ve ısıtma işlem sonrası renk ölçümleri ile ısıtma işlem uygulama sırasında meydana gelen sıcak değişimleri belirlenmiş ve uygulamanın etkinliği mikrobiyal çalışmalarla desteklenmiştir.

İlk olarak dondurma karışımı laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde farklı sürelerde proses edilmiş, proses sonucunda ürünün mikrobiyolojik, reolojik ve duyu kalitesi üzerinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Proses sürecinde üründe meydana gelen sıcaklık değişimleri fiber optik prob ve bir veri toplayıcı ile kayıt altına alınmıştır. Ayrıca proses sonunda ürün yüzeyinde oluşan sıcaklık profili de bir termal kamera ile kaydedilmiştir. Daha sonra Comsol Multiphysics V5.6 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) Çoklu fizik yazılımı kullanılarak, mikrodalga uygulama sırasında ürün sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiş ve bu model deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulanan modelin kullanılması ile de endüstriye yönelik sürekli akış sistem tasarımları gerçekleştirilmiştir.

### 3.1 Materyal

#### 3.1.1 Laboratuvar ölçekli (IFTECH) mikrodalga sistem

IFTECH Ar-Ge ve Danışmanlık A.Ş. (Ankara, Türkiye) tarafından üretilen laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistem kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sistem içerisinde 11,9 cm yarıçap ve 2,23 cm yüksekliğe sahip teflon (PTFE) dönebilen bir silindir ve bu silindir üzerinde 2 cm yüksekliğinde bir yükseltici mevcuttur. Şekil 3.1’de gösterilen lab-ölçekli bu sistem; kavite, dalga kılavuzu ve magnetron (mikrodalga kaynağı) olmak üzere 3 temel mekanizmayı içermektedir. Mikrodalga sistemde elektromanyetik alanın oluştuğu kavite ölçüleri 43,4 cm, 43,8 cm ve 28,8 cm olup; sistem 700 W güç (1000×0,70) ile 2450 MHz frekansta çalışmaktadır. Dondurma örnekleri bu mikrodalga sistem içerisinde 2 farklı kap (Şekil 3.4) kullanılarak ısıl işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan mikrodalga sistem ve sistem içerisindeki ürünün konumu

#### 3.1.2 Dondurma karışımı

Arolez Gıda San. ve Tic. A.Ş. (Ankara) firmasının ana üretim hattından pastörizasyon öncesi temin edilmiş dondurma karışımı soğuk zincir bozulmadan proses edilinceye kadar buzdolabında ( $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ )’de 1 gün süreyle muhafaza edilmiştir. Ürünün kimyasal bileşimi çizelge 3.1’de verilmiştir. Dondurma karışımı içerisinde yer alan gam arabik, guar gum ve karragenan gibi kıvam arttırıcı maddelerin ürünün viskozitesi ve yapısal özelliklerinde

zamana bağlı değişikliğe sebep olacağı göz önüne alınarak standart bir ürün kullanımı açısından üründe yapılan tüm işlemler eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 Dondurma karışımının kimyasal bileşimi

Bileşen	Bileşim (g /100g ürün)
Nem	60
Kuru Madde	40
Karbonhidrat	32.3
Yağ	4
Protein	3.7

### 3.1.3 Dondurma örneklerinin inokülasyonunda kullanılan *Listeria* suşları ve besiyerleri

*Listeria monocytogenes* inaktivasyonunun belirlenmesi için *Listeria monocytogenes* 1/2c ATCC 7644 suşu kullanılmıştır. Bir stok kültürden 10 mL Tryptic Soy Broth'a (Merck, Darmstadt, Almanya) 0,1 mL aktararak inoküle edilmiş ve ardından 37 °C'de 18 saat inkübe edilmiştir. Ardından bu kültürden 0,1 mL alınıp tekrar 10 mL Tryptic Soy Broth'a inokülasyon yapılmış ve 37°C' de 18 saat süreyle tekrar inkübasyona bırakılmıştır. Hazırlanan bu kültür proses öncesi dondurma örneklerine inoküle edilmiştir. Mikrodalga ısıl işlem uygulamasından sonraki mikrobiyolojik analizlerde Maximum Recovery Diluent (Merck, darmstadt, Almanya) çözeltisi (0,95 g/100 mL, w/v) ile homojenizasyon sağlanmış ve uygun ondalık seyreltiler hazırlanmıştır. Sayım için ise *Listeria* Seçici Agar Bazı kullanılmıştır.

## 3.2 Yöntem

### 3.2.1 Isısal ve fiziksel özellikler

**Termofiziksel özellikler:** Dondurma karışımının kimyasal bileşiminden yararlanılarak Choi ve Okos (1986) tarafından geliştirilen denklikler kullanılmış olup termofiziksel özellikler olan ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Çizelge 3.3 ve 3.4'te bu hesaplamalarda kullanılan denklikler verilmiştir.

Çizelge 3.2 Dondurma karışımının termofiziksel özellikleri

Sıcaklık (°C)	Isıl İletkenlik K. k (W/m-K)	Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül Isı Sığası $c_p$ (J/kg-K)
4	0,428	1200,5	3134
10	0,436	1199,5	3138
20	0,450	1197,5	3146
30	0,463	1195,0	3154
40	0,474	1192,1	3163
50	0,485	1188,7	3173
60	0,494	1184,9	3183
70	0,502	1180,6	3193
80	0,509	1175,9	3205
90	0,515	1170,7	3217

Çizelge 3.3 Gıda bileşenlerinin sıcaklığa bağlı olarak termal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan empirik denklikler ( $-40 \leq T \leq 150^\circ\text{C}$ )(Choi ve Okos 1986)

Termal Özellik	Bileşen	Empirik Denklik
Isıl iletkenlik katsayısı - k (W//m-K)	Protein	$k = 1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3}T - 2,7178 \times 10^{-6}T^2$
	Yağ	$k = 1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-4}T - 1,7749 \times 10^{-7}T^2$
	Karbonhidrat	$k = 2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3}T - 4,3312 \times 10^{-6}T^2$
	Lif	$k = 1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3}T - 3,1683 \times 10^{-6}T^2$
	Kül	$k = 3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3}T - 2,9069 \times 10^{-6}T^2$
Isıl yayınım katsayısı - $\alpha$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Protein	$\alpha = 6,8714 \times 10^{-8} + 4,7578 \times 10^{-10}T - 1,4646 \times 10^{-12}T^2$
	Yağ	$\alpha = 9,8777 \times 10^{-8} - 1,2569 \times 10^{-11}T - 3,8286 \times 10^{-14}T^2$
	Karbonhidrat	$\alpha = 8,0842 \times 10^{-8} + 5,3052 \times 10^{-10}T - 2,3218 \times 10^{-12}T^2$
	Lif	$\alpha = 7,3976 \times 10^{-8} + 5,1902 \times 10^{-10}T - 2,2202 \times 10^{-12}T^2$
	Kül	$\alpha = 1,2461 \times 10^{-7} + 3,7321 \times 10^{-10}T - 1,2244 \times 10^{-12}T^2$
Yoğunluk - $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Protein	$\rho = 1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1}T$
	Yağ	$\rho = 9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1}T$
	Karbonhidrat	$\rho = 1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1}T$
	Lif	$\rho = 1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1}T$
	Kül	$\rho = 2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1}T$
Özgül ısı kapasitesi $c_p$ ( $\text{kJ}/\text{kg-K}$ )	Protein	$c_p = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}T - 1,3129 \times 10^{-6}T^2$
	Yağ	$c_p = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}T - 4,8008 \times 10^{-6}T^2$
	Karbonhidrat	$c_p = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3}T - 5,9399 \times 10^{-6}T^2$
	Lif	$c_p = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3}T - 4,6509 \times 10^{-6}T^2$
	Kül	$c_p = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}T - 3,6817 \times 10^{-6}T^2$

Çizelge 3.3, üründeki bileşenlerin (protein, yağ, karbonhidrat, lif ve kül) termal özelliklerini, özellikle ısı iletkenlik katsayısı, ısı yayılım katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu termal özellikler, her bir bileşenin sıcaklıkla ilişkili olarak farklı davranışlar sergileyen empirik denklemleriyle belirlenmiştir. Çizelge 4.4 ise, bu termal özelliklerin hesaplanmasında kullanılan genel formülasyonları sunmaktadır. Söz konusu denklemler, karışımın bileşenlerinin sıcaklıkla değişen termal özelliklerini ve bu bileşenlerin karışımdaki oranlarına bağlı olarak karışımın toplam termal özelliklerini hesaplamaya olanak tanımaktadır. Bu sayede, karışımın termal davranışı, bileşenlerin sıcaklığa bağlı özellikleri ve karışımdaki bileşen oranları göz önünde bulundurularak daha doğru bir şekilde modellenebilmektedir.

Çizelge 3.4 Sıcaklığa bağlı termal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan genel empirik denklemler (Choi ve Okos 1986)

Termal Özellik	Empirik Denklik
Isıl iletkenlik katsayısı – k (W//m-K)	$\sum_{i=1}^n k_i Y_i$ $Y_i = \frac{X_i / \rho_i}{\sum_{i=1}^n X_i / \rho_i}$
Isıl yayılım katsayısı – $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i$
Yoğunluk – $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sum_{i=1}^n \rho_i X_i$
Özgül ısı kapasitesi- $c_p$ (kJ/kg-K)	$\sum_{i=1}^n c_{pi} X_i$

Burada  $X_i$  i-inci bileşenin ağırlık kesrini, n gıdadaki toplam bileşen sayısını  $Y_i$  ise i-inci bileşenin hacim kesrini ifade etmektedir.

**Dielektrik özellikler:** Dielektrik özellikler 4-80 °C sıcaklık aralığında network analizörü (Şekil 3.2 - Agilent Technologies ES061B ENA Series Network Analyzer, USA ) kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Bu amaçla mikrodalga frekans aralığı olan 915 ve 2450 MHz kullanılmıştır. Network analizöre açık uçlu eşmerkezli prob (Agilent Technologies, 85070E, ABD) bağlanarak ölçümler yapılmış olup 3 tekerrür olarak tamamlanmıştır (Şekil 3.2). Detaylı yöntem Topçam vd. (2020) tarafından verilmiştir.



Şekil 3.2 Dielektrik özelliklerin ölçümü için kullanılan network analizör cihazı

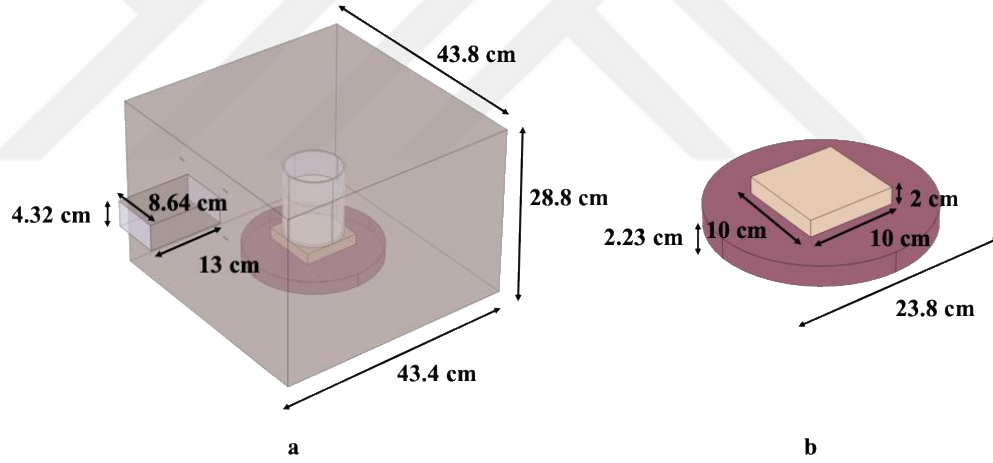
**Reolojik özellikler:** Dondurma karışımının sıcaklığa bağlı olarak reolojik özelliklerindeki değişim ise 4 – 80 °C’de Malvern Kinexus Pro Rheometer sistemi kullanılarak ve 1-100 s<sup>-1</sup> kayma hızı aralığında (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, İngiltere) ölçülmüştür. İlgili ekipman paralel plakalı olup sıcaklık kontrollü olarak çalışmaktadır. Ölçümler için 10 mL dondurma örneği kullanılmış ve hedef sıcaklıklara ulaşan örneklerin ölçümü kesme hızının bir fonksiyonu olarak gerçekleştirilmiştir.

**Renk ölçümü:** Renk ölçümleri her iki deneysel çalışma için de (her iki kaba ait) Konica Minolta (Japonya) renk ölçüm cihazında (L\*, a\*, b\*) yapılmıştır. Proses edilen örnekler hızlıca soğutulmuş, ölçümler 3 tekerrür olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tek yönlü ANOVA ile renk değerleri, Tukey testi uygulanarak anlamlılık düzeyi p<0,05’te analiz

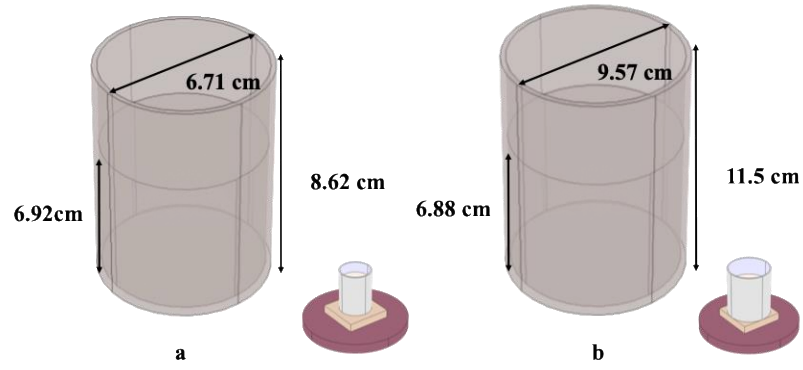
edilmiştir. Burada büyük kapta yapılan deneylerde en uzun proses süresi göz önüne alınmış ve sadece 750 s'lik proseslerin sonucunda renk ölçümü yapılmıştır.

### 3.2.2 Matematiksel modelleme çalışmaları

**Sistem geometrisinin hazırlanması:** Matematiksel modelleme çalışmaları Comsol V5.6 Çoklufizik (Comsol AB, Stocholm, Sweden) programı kullanılarak yapılmıştır. Mikrodalga ısıl işlem uygulama kapsamında kullanılan pilot ölçekli mikrodalga sisteme (Şekil 3.1) ait kavite ölçüleri  $43,4 \times 43,8 \times 28,8$  cm, dalga kılavuzu ölçüleri ise  $13,00 \times 8,64 \times 4,32$  cm'dir. Sistem geometrik özellikleri şekil 3.3'te verilmiştir. Sistem içerisinde ürün şekil 3.3b'de verilen silindir tabak ve üzerinde yer alan yükseltici üzerinde konumlandırılmıştır. Şekil 3.4'te ise sistemde çizilen kap ve ürün geometrisi gösterilmiştir.

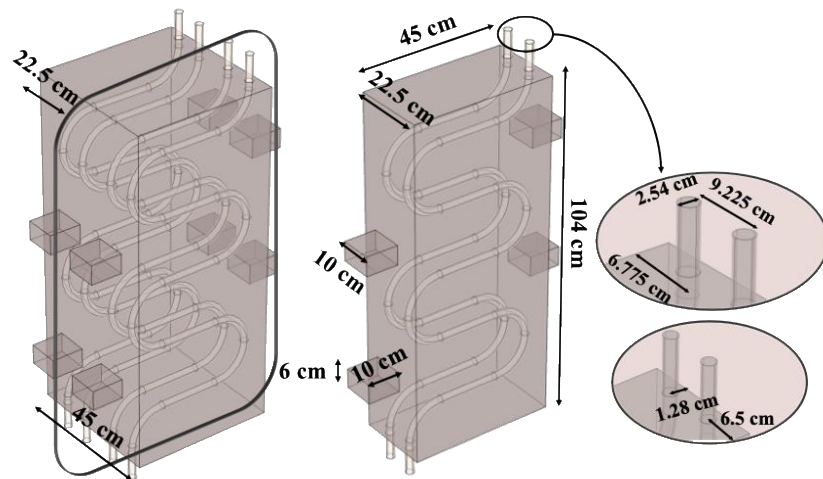


Şekil 3.3 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan mikrodalga sistem (a) ve sistem içerisinde bulunan döner tabak (b) geometrisi

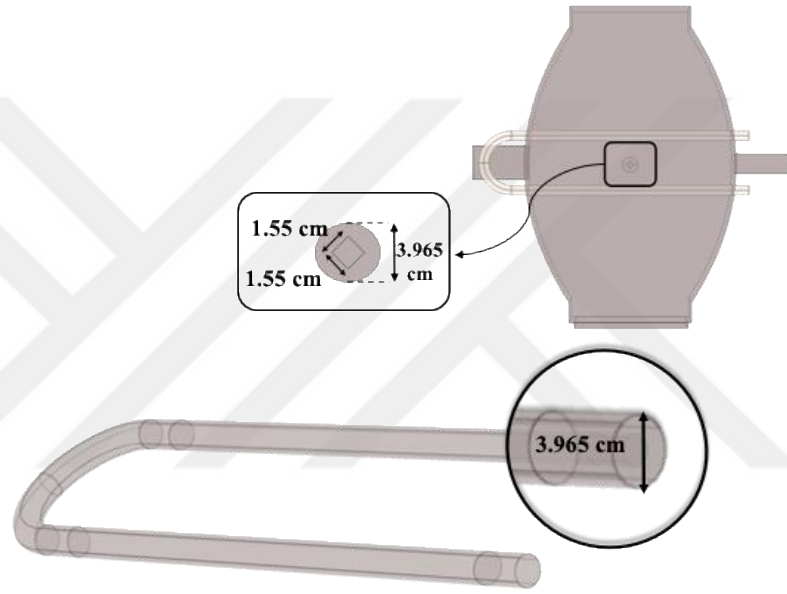
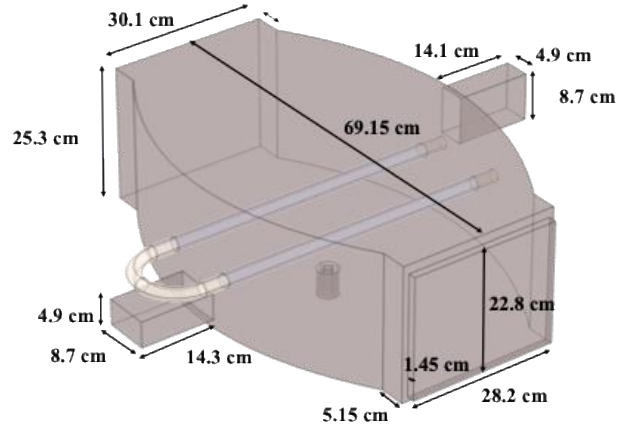


Şekil 3.4 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan küçük (a) ve büyük 2 (b) kaba ait geometrik ölçüler

Matematiksel model geliştirme doğrulama çalışmalarının devamında, deneysel çalışmalar ile elde edilen sıcaklık değişimlerine bağlı olarak 2 farklı endüstriyel sürekli akış mikrodalga sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem 1, 8 magnetron ve 4 akış borusundan oluşmaktadır. Boruların konumları modelleme çalışmaları ile tekdüze bir ısınma sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Sistem 2 ise U şeklinde bir akış borusu ve 2 adet magnetrona sahiptir. Ürün giriş kolu rotasyon mekanizmasına sahiptir. Modelleme çalışmalarında boru duvarlarına 0, 2.5, 5 ve 10 rpm dönme hızları tanımlanmıştır. Sistem tasarım çalışmaları kapsamında borunun rotasyon hızının sıcaklık değişimi üzerine etkisi ayrıca incelenmiştir. Şekil 3.5 ve 3.6'da sırasıyla sistem 1 ve sistem 2'ye ait sistem geometrileri yer almaktadır.



Şekil 3.5 Endüstriyel skala sistem tasarımı amacıyla kullanılan geometri - Sistem 1 geometrik ölçüleri



Şekil 3.6 Endüstriyel skala sistem tasarımı amacıyla kullanılan geometri - Sistem 2 geometrik ölçüleri

**Matematiksel model çalışmalarında kullanılan denklıklar:** Mikrodalga uygulaması ile ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık değişimi ve sistem içerisi elektromanyetik alan dağılımını belirlenmesi için çözülen eşitlikler aşağıda özetlenmiştir:

$$\text{Maxwell - Ampere's law: } \nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\text{Faraday's law: } \nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial(\mu \mathbf{H})}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\text{Gauss's law: } \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Gauss's magnetic law: } \nabla \cdot (\mu \mathbf{H}) = 0 \quad (3.4)$$

Bu denklilerde  $\mathbf{E}$  değeri zamana bağlı harmonik elektrik alan gücünü (V/m),  $\mathbf{H}$  değeri bağlı harmonik manyetik alan gücünü (A/m) göstermektedir. Elektrik alan ( $\mathbf{E}: [\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_0(x, y, z)e^{-i\omega t}]$ ) ve manyetik alan ( $\mathbf{H}: [\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}_0(x, y, z)e^{-i\omega t}]$ ) yoğunluk değişimleri zamana bağlı harmonik fonksiyonlar olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda harmonik Maxwell denklikleri Helmholtz denkliğine indirgenebilmekte olup, kavite içi elektromanyetik alan dağılımının belirlenmesi için Helmholtz denklemi çözülmüştür:

$$\nabla x \mu^{-1} (\nabla x \mathbf{E}) + (i\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_r) \mathbf{E} = 0 \quad (3.5)$$

Bu denklikte  $\epsilon_r$  bağıl permitivite değerini,  $\mu$  bağıl geçirgenlik değerini,  $\omega$  açılal dalga frekansı değerini (2 f, rad/s) ve  $\sigma$  elektriksel iletkenlik katsayısı değerini göstermektedir (S/m). Kompleks permitivite değeri formülü  $\epsilon_r = \epsilon' - i\epsilon''$  ile verilmekte olup, burada dielektrik sabiti ve ise dielektrik kayıp faktörü değerini göstermektedir (Zhang ve Datta 2003; Li ve ark. 2017; Wang ve ark. 2017).

Ürün içi sıcaklık dağılımının hesaplanmasında enerji denkliği kullanılmıştır:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3.6)$$

Bu denklikte  $\rho$  ürün yoğunluğunu (kg/m<sup>3</sup>),  $T$  sıcaklığı (K),  $\mathbf{u}$  hız vektörünü (m/s),  $k$  ısı iletkenlik katsayısını (W/m-K),  $Q$  mikrodalga enerji absorpsiyonuna bağlı hacimsel ısı oluşum (W/m<sup>3</sup>) ve  $c_p$  ürün özgül ısı değerini (J/kg-K) değerini göstermektedir.

Ürün içerisindeki mikrodalga absorpsiyonuna bağlı ısı üretim değeri eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (3.7)$$

$\varepsilon_0$  serbest uzay permitivite değeri ( $8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m)'ni göstermektedir. Ürün içi hız profile değişiminin belirlenmesi için Navier–Stokes ve süreklilik denklikleri çözülmüştür:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \quad (3.8)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (3.9)$$

Bu denklikler Comsol çoklu fizik programının ‘Heat Transfer in Fluids’, ‘Electromagnetic Waves, Frequency Domain’ ve ‘Laminar Flow’ modüllerinin eş zamanlı kullanılmasıyla çözülmüş olup bu kapsamda kullanılmış olan yaklaşım şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Matematiksel model geliştirme çalışması için elektromanyetik alan, sıcaklık ve akış denkliklerinin eş zamanlı çözülmesi kapsamında uygulanan yaklaşım (Topcam vd. 2020)

Dönmenin ürünündeki sıcaklık dağılımının tekdüzeliği üzerine etkisini değerlendirmek amacıyla sınır koşulu olarak boru yüzeyine dönme hızı radyal yönde uygulanmıştır.

Modelleme çalışmalarında kullanılan yazılımda yer alan koordinat sistemi, kartezyenden silindirik koordinat düzlemine çevrilerek eşitlik 3. 10'da verilen hız değeri dönme yüzeyine uygulanmıştır.

$$v = 2. \pi . \zeta . r \quad (3.9)$$

Buradaki eşitlikte r dönen silindirin yarıçapını,  $\zeta$  ise rpm cinsinden dönme frekansını ifade etmektedir.

**Modelleme çalışmalarında kullanılan çözümleviciler:** Laboratuvar ölçekli sistemlerin matematiksel modelleme çalışmalarının gerçekleştirilmesinde zamana bağlı (transient) analizler proses süresi dikkate alınmış, endüstriyel sistemlerin modelleme çalışmalarında ise analizler yataşkın (steady-state) koşullarda yürütülmüştür. Comsol Çoklufizik yazılımı, sonlu elemanlar yöntemine dayalı (finite element) problemlerin çözümünde, lineer denklemler için hem direkt hem de yinelemeli olmak üzere iki farklı algoritma kullanmaktadır. Direkt yöntemler arasında yer alan SPOOLES (SParse Object-Oriented Linear Equations Solver), MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver) ve PARDISO (Parallel Sparse Direct Solver), LU ayrıştırmasına ve özellikle Cholesky faktörizasyonuna dayanmaktadır. Çalışma içerisinde MUMPS ile elektromanyetik alan çözümü, PARDISO ile ise ısı ve momentum transfer çözümleri yapılmıştır. Uygun ağ yapısı ve iyi oluşturulan çözüm yöntemleri ile bu üç yöntemin kullanılması arasında önemli bir görülmemektedir. Ancak burada donanımsal yük ve çalışma hızı önemli bir değişkenlik göstermektedir. SPOOLES en yavaş çözüm yöntemi iken PARDISO en hızlı yöntemdir. Ancak direkt çözüm yöntemlerinin yüksek RAM ihtiyacına karşılık SPOOLES yöntemi en az RAM ihtiyacı olan yöntemdir. MUMPS ve PARDISO ise çekirdek dışını da kullanarak ihtiyaç halinde harici disk alanını da kullanabilmektedir. Yapılan ön çalışmalar kapsamında belirtilen yöntemlerin kullanımı tercih edilmiştir. Tüm modelleme çalışmaları boyunca HP-Z640 model 96 GB RAM ve 2x2.10 GHz işlemci hızındaki iş istasyonu kullanılmıştır.

**Ağ yapıları:** Ağ yapısının oluşturulması sonlu element çözümlerinin önemli bir parçasıdır. Oluşturulan ağ yapıları sistemi küçük parçalar bölerek çözümlmeyi

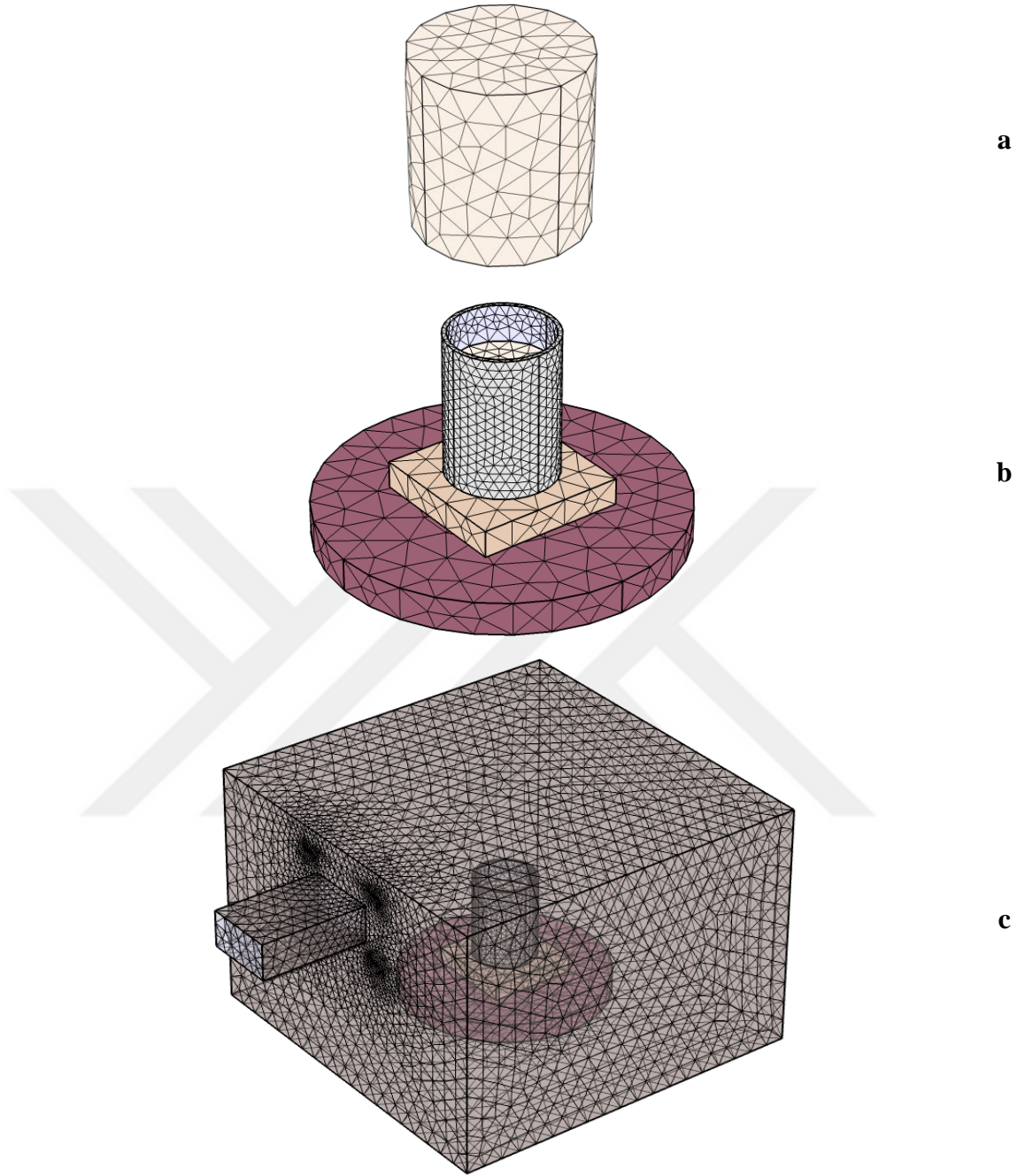
kolaylaştırmanın yanısıra hatalı çözümlerlerin hangi alanda yapıldığı konusunda da bilgi vermektedir.

Elektromanyetik alan çözümlerinde ağ yapısının elektromanyetik alan fiziğini çözümlenmesi değerlendirilirken Nyquist kriterinden yararlanılmaktadır (Eşitlik 3.10):

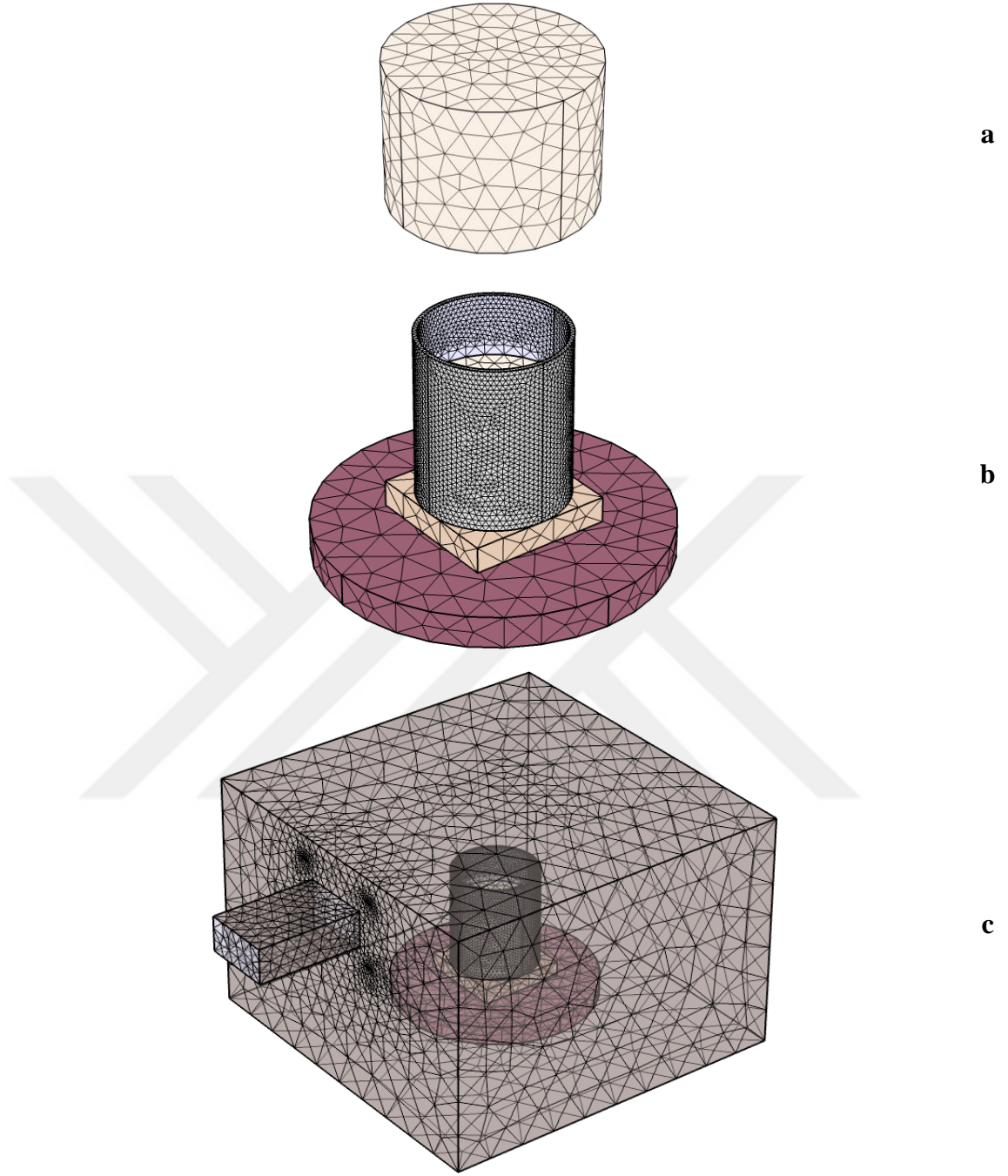
$$S_{max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\mu'\epsilon'}} \quad (3.10)$$

Eşitlikte yer alan  $\mu'$  bağıl geçirgenlik değerini,  $c$  ışık hızını (m/s),  $f$  frekansı (Hz),  $\epsilon'$  ise dielektrik sabitini ve  $\lambda$  ise dalga boyunu (m) ifade etmektedir. Nyquist kriterine göre, bir ağ yapısının maksimum eleman boyutu, ışık hızının ( $3 \times 10^8$  m/s) frekans ile bağıl geçirgenlik ve dielektrik sabite oranından veya sistemdeki dalga boyunun yarısından daha küçük olmalıdır.

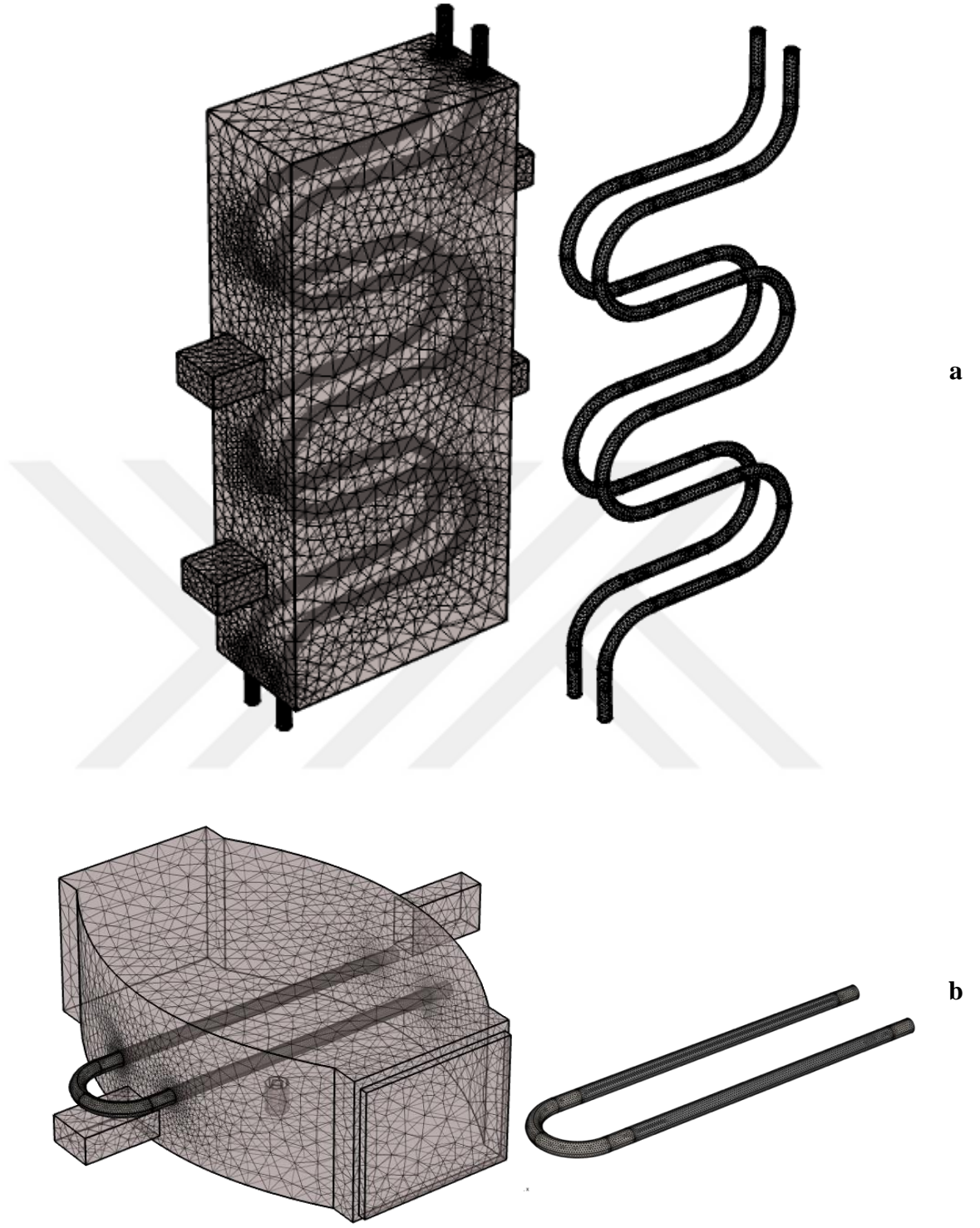
Şekil 3.8 ve 3.9'da küçük kap ve büyük kap için sırasıyla matematiksel model çalışmalarında kullanılan sistemlerin ağ yapıları; şekil 3.10'da endüstriyel sistemlerin ağ yapıları verilmiştir. Çizelge 3.4'te ise kullanılan ağı oluşturan elementlerin sayıları verilmiştir.



Şekil 3.8 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan mikrodalga sistem içerisinde küçük hacimli kap kullanım durumunda ürün (a), kap (b) ve kavitede (c) oluşturulan ağ yapısı



Şekil 3.9 Deneysel ve matematiksel model geliştirme çalışmalarında kullanılan mikrodalga sistem içerisinde büyük hacimli kap kullanım durumunda ürün (a), kap (b) ve kavitede (c) oluşturulan ağ yapısı



Şekil 3.10 Endüstriyel sistem 1 (a) ve sistem 2 (b) için oluşturulan ağ yapısı

Çizelge 3.5 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan element sayıları

Matematiksel Modeller	Ağ Yapılarının Fiziksel Özellikleri	
Pilot ölçekli sistem Küçük kap	Dörtgensel element	163733
	Üçgensel element	10391
	Köşe element sayısı	726
	Tepe element	92
	Element sayısı	163733
	Hacmi (mm <sup>3</sup> )	5,523x10 <sup>7</sup>
Pilot ölçekli sistem Büyük kap	Dörtgensel element	188855
	Üçgensel element	14350
	Köşe element sayısı	830
	Tepe element	88
	Element sayısı	18855
	Hacmi (mm <sup>3</sup> )	5,523x10 <sup>7</sup>
Endüstriyel sistem - 1	Dörtgensel element	697259
	Üçgensel element	53330
	Köşe element sayısı	5454
	Tepe element	203
	Element sayısı	697259
	Hacmi (cm <sup>3</sup> )	107900
Endüstriyel sistem - 2	Dörtgensel element	598812
	Üçgensel element	27274
	Köşe element sayısı	2145
	Tepe element	92
	Element sayısı	598812
	Hacmi (cm <sup>3</sup> )	88310

Kullanılan sistemlerin modellemesinde kullanılan ağ yapısından yola çıkarak ağ boyutu aşağıda yer alan eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$Ağ\ Boyutu = \sqrt[3]{\frac{Ağ\ hacmi}{Element\ sayısı}} \quad (3.11)$$

Çizelge 3.5'te başlangıç ve sınır koşulları kullanılan tüm sistemler için detaylı olarak verilmiştir. Hacimsel ve noktasal doğrulama ile dönme etkisi, materyal ve metot içerisinde yer alan matematiksel model geliştirme çalışmaları (Bölüm 3.2.3 ve proses uygulama çalışmalarında (Bölüm 3.2.5) detaylı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 3.6 Başlangıç ve sınır koşulları

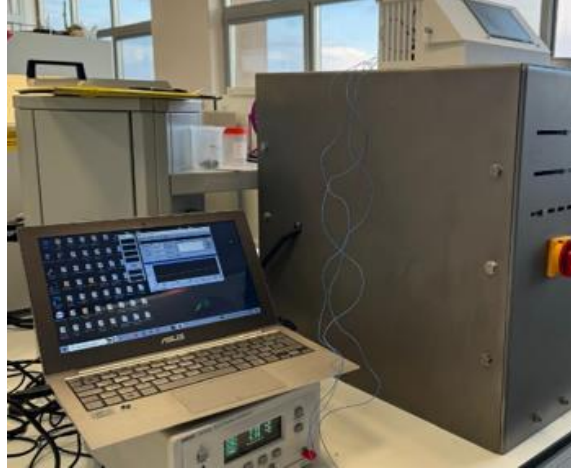
Sistem	Çalışma	Isı transfer modülü	Akışkanlar dinamiği modülü	Elektromanyetik dalga modülü
Pilot ölçekli mikrodalga Küçük kap	Hacimsel doğrulama	h=10 W/m <sup>2</sup> K T <sub>i</sub> = 9,03 °C	u <sub>0</sub> = 0m/s v <sub>0</sub> = 0m/s w <sub>0</sub> = 0m/s	P <sub>0</sub> = 700W
	Noktasal doğrulama			
Pilot ölçekli mikrodalga Büyük kap	Hacimsel doğrulama	h=10 W/m <sup>2</sup> K T <sub>i</sub> = 9,03°C	u <sub>0</sub> =0 m/s v <sub>0</sub> =0 m/s w <sub>0</sub> = 0 m/s	P <sub>0</sub> = 700 W
	Noktasal doğrulama			
Sistem 1	Hacimsel doğrulama	h=10 W/m <sup>2</sup> K T <sub>i</sub> = 20 °C	u <sub>0</sub> = 0 m/s v <sub>0</sub> =0,02125m/s w <sub>0</sub> = 0 m/s	P <sub>0</sub> = 1671,3 W
	Noktasal doğrulama			
Sistem 2	Hacimsel doğrulama	h=10 W/m <sup>2</sup> K T <sub>i</sub> =12,36 °C	u <sub>0</sub> =0 m/s v <sub>0</sub> =0,006843 m/s w <sub>0</sub> = 0 m/s	P <sub>0</sub> =700 W
	Dönme etkisi		u <sub>0</sub> = 0 rpm 2,5 rpm 5 rpm 10 rpm	
				u <sub>0</sub> = 0 rpm 2,5 rpm 5 rpm 10 rpm

### 3.2.3 Matematiksel model doğrulama çalışmaları

**Dondurma karışımının mikrodalga uygulama süresince sıcaklık değişiminin belirlenmesi:** Mikrodalga uygulama kapsamında şekil 3.1’de gösterilen ve 2450 MHz frekansta çalışan mikrodalga sistem kullanılmıştır. Bu sistem farklı güç seviyelerinde çalışabilir olup deneysel çalışmalar sırasında %100- sürekli güç kullanımı opsiyonu uygulanmıştır.

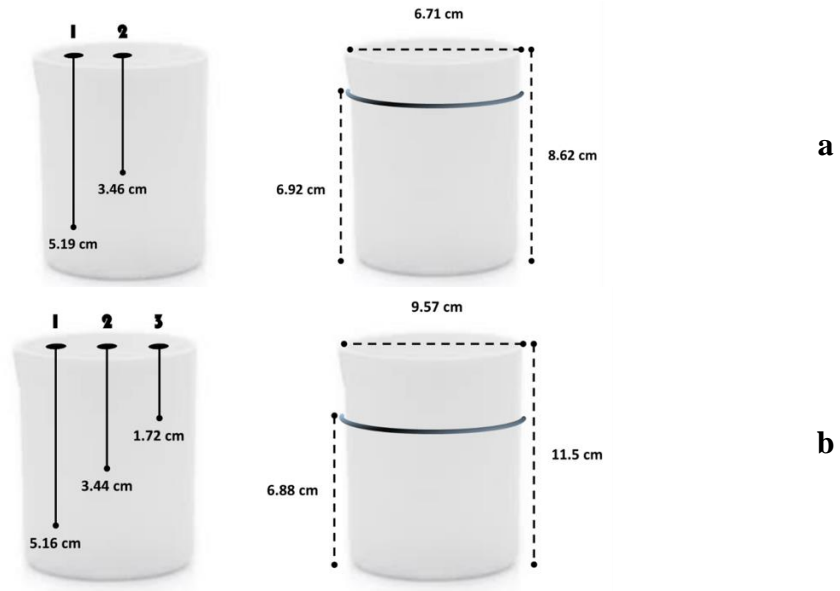
Pastörizasyon, endüstriyel üretimde genel olarak 69-70 °C’ de 30 dk ya da 80 °C’ de 15-20 s’ de yapılmaktadır. Ayrıca bazı çeşit dondurmaların üretiminde 100–150 °C’lik yüksek sıcaklıklarda kısa süreli ısı işleme maruz bırakılarak UHT yöntemiyle de sterilizasyon uygulanabilmektedir. Ancak yüksek sıcaklıkta işlem hem ek maliyet oluşturmakta hem de üründe istenmeyen tat ve kokuya sebep olabilmektedir. Özellikle küçük kapasiteli işletmeler 69-70 °C de ısı işlem uygulamakta olup; bu uygulama kapsamında mikrobiyal risklerin elimine edilemeyeceği de son yıllarda ortaya çıkan dondurma kaynaklı enfeksiyonlardan anlaşılmaktadır (Neha et al., 2018). Bu nedenle deneysel çalışmalarda 80 °C son ürün sıcaklığı hedef alınarak mikrodalga uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu değerler mikrobiyal inaktivasyon çalışmaları ile de doğrulanmıştır.

Bu kapsamda mikrobiyal doğrulama deneyleri ve matematiksel model doğrulama çalışmaları olmak üzere iki farklı deneysel çalışma uygulanmıştır. Mikrodalga uygulama sürecinde ürün sıcaklık değişimleri veri toplama sistemi Fiso-UMI (FISO, Quebec, QC, Canada) ve fiber optik problar aracılığıyla yapılmış (Şekil 3.11) ve sıcaklık değişim sonuçları matematiksel modelleri doğrulamak amacıyla kullanılmıştır.

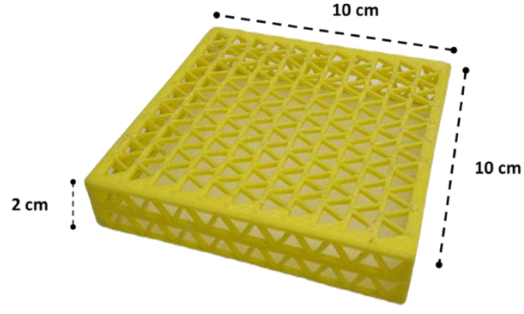


Şekil 3.11 Deneysel çalışmalarda kullanılan sıcaklık ölçüm sistemi ve fiberoptik prob lar

Doğrulama çalışmaları aynı malzemeden üretilen 2 farklı silindirik kap kullanılarak (Şekil 3.4) yapılmıştır. Kullanılan kaplar mikrodalgaya geçirgen olan teflon (PTFE) malzemeden üretilmiş olup (Topcam 2018); kapların boyutları ve sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar şekil 3.12’de verilmiştir. Her iki kap için de uygulanan deneylerde 2 cm yüksekliğinde polipropilen (PP) bir yükseltici kullanılmıştır. Kullanılan yükseltici ise ölçüleriyle birlikte şekil 3.13 ’de gösterilmektedir.

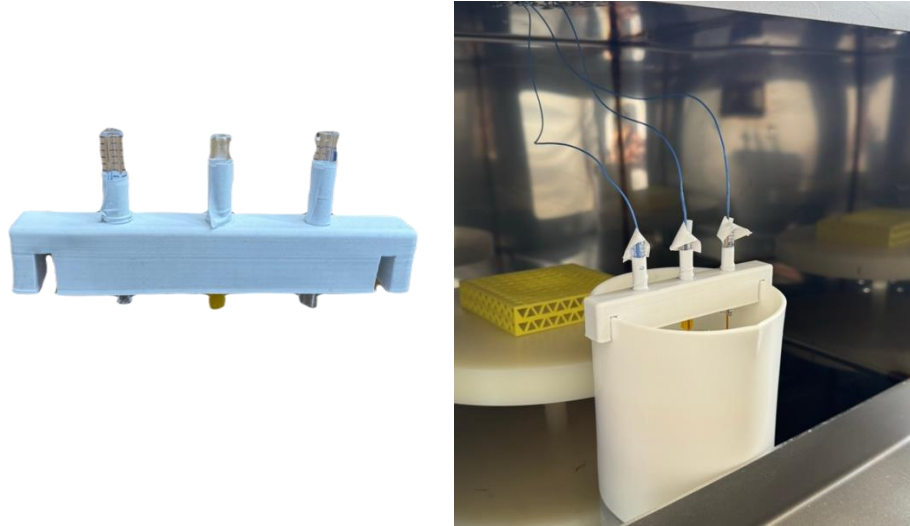


Şekil 3.12 Mikrodalga uygulama sürecinde sıcaklık ölçüm çalışmalarında kullanılan küçük (a) ve büyük (b) kaptaki gerçekleştirilen sıcaklık ölçüm noktaları ve kap boyutları (Ölçüm noktaları: CH1(1), CH2(2) ve CH3(3))



Şekil 3.13 Deneysel çalışmalarda dondurma karışımlarının konulduğu kapların sistem içerisine uygun bir şekilde yerleştirilmesi amacıyla kullanılan yükseltici

Mikrodalga uygulama deneysel çalışmalarının hemen öncesinde buzdolabından çıkarılan örnekler homojen hale gelinceye kadar 1 dakika süreyle karıştırılmış ve deney kabına aktarılmıştır. Deney kapları şekil 3.12’de belirtilen seviyelere kadar doldurulmuş; mikrodalga uygulama öncesi ürünün farklı bölgelerinde farklı yüksekliklere yerleştirilen fiber optik prob lar ile proses sürecinde zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Problar kap için özel olarak tasarlanan ve 3 boyutlu yazıcıda basılan özel bir sistem ile ürün içerisindeki konumları sabitletilmiş (Şekil 3.14) olup; sistem içerisinde problemlerin ve ürünün konumlandırılması şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.14 Problemleri sabitlemek için 3 boyutlu yazıcıda basılan sabitleyici aparat

Matematiksel model doğrulama çalışmaları için dondurma örnekleri şekil 3.12’de verilen her iki kaba da ürün seviyesi küçük ve büyük kaplar için sırasıyla 6,92 cm ve 6,88 cm olacak şekilde doldurulmuş ve mikrodalga uygulama gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.4 Mikrobiyal inaktivasyon çalışmaları

**Dondurma karışımının inokülasyonu:** Pastörizasyon sonrası *Listeria monocytogenes* inaktivasyonunun belirlenmesi için 2 tekerrür olacak şekilde mikrobiyal doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada *Listeria monocytogenes* 1/2c ATCC 7644 suşu kullanılmıştır. Bu suş ile elde edilen kültürden ( $8,88 \pm 0,03$  log CFU/g başlangıç mikroorganizma sayısı) 4 mL, 2500 mL dondurma karışımına aktarılmış ve homojen karışım sağlanmıştır. İnoküle edilen dondurma karışımı mikrodalgaya geçirgen olan teflon malzemedden yapılmış 11,5 cm yüksekliğinde 9,57 cm çapında bir kap (Şekil 3.15) içerisine her proses için  $530 \pm 23$  g örnek olacak şekilde aktarılmıştır. Mikrodalga sistemde tam güç seviyesinde (%100) 200, 400, 600 ve 750 s sürelerde proses edilmiştir. Uygulanan bu süreler geliştirilen ve (sonuçlar bölümünde açıklanan) deneysel sıcaklık değişim verileri kullanılarak doğrulanan matematiksel model ile istenilen sıcaklık değerlerine ulaşabilmek amacıyla hesaplanmıştır. Mikrodalga uygulama sonrası numuneler buzdolabında hızla soğutulmuş ve mikrobiyolojik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, mikrodalga işlemine tabi tutulmamış dondurma örneği de kontrol olarak dahil edilmiş ve başlangıç mikroorganizma sayısını belirleyebilmek amacıyla mikrobiyolojik analize tabi tutulmuştur. Mikrobiyolojik analizler kapsamında dondurma örneklerinden her biri 25 g olan numuneler, 225 mL steril Maximum Recovery Diluent (Merck, Darmstadt, Almanya) çözeltisi (0,95 g/100 mL, w/v) ile karıştırılmış ve bir Stomacher (Stomacher 400) kullanılarak 2 dakika süreyle homojenize olması sağlanmıştır (Seward Laboratuvarı, Birleşik Krallık). Elde edilen süspansiyonun uygun ondalık seyreltileri, steril Maksimum Geri Kazanım Seyreltici çözeltisi (0,95 g/100 mL, a/h) kullanılarak hazırlanmış ve *Listeria monocytogenes* sayımı, Kromojenik Listeria Seçici Ek (ISO) SR0226E ve Kromojenik Listeria Diferansiyel Ek SR0228E ile Ottaviani ve Agosti'ye (ISO 11290) (Merck, Darmstadt, Almanya) göre Listeria Seçici Agar Bazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla petrilere inokülasyon için yayma metodu

kullanılmış; kültürler daha sonra 37°C'de 24 saat süreyle inkübe edilerek tipik koloni sayımı gerçekleştirilmiştir.



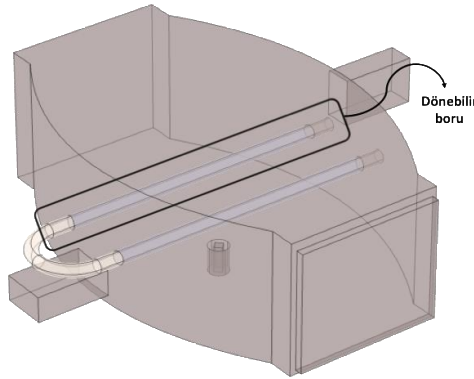
Şekil 3.15 Mikrobiyal doğrulama amacıyla kullanılan teflon kaba dondurma karışımının alınması

**Pastörizasyon amacıyla inoküle edilmiş dondurma örneklerine mikrodalga ısıtma uygulanması:** Dondurma karışımının mikrodalga uygulama esnasındaki sıcaklık değişimini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılarak *Listeria monocytogenes* inoküle edilen dondurma örneklerine mikrodalga ısıtma prosesi uygulanmıştır. Burada deneysel çalışmalar esnasında meydana gelecek bir kontaminasyonu önlemek amacıyla şekil 3.12’de verilmiş olan büyük kap kullanılmıştır. Yine fiber optik problemlerin kontaminasyonunu engellenmesi ve ürünlerin hızlıca soğutulabilmesi amacıyla sıcaklık ölçümü alınmamıştır. Daha önce sıcaklık değişiminin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar baz alınarak proses süresi belirlenmiştir. Isıtmanın farklı aşamalarındaki mikrobiyal azalmayı gözlemleyebilmek adına dondurma örnekleri 200, 400, 600 ve 750 s sürelerle 2 tekerrür olacak şekilde proses edilmiştir.

### 3.2.5 Proses uygulama çalışmaları

**Endüstriyel ölçekli sürekli akış mikrodalga sistem tasarım çalışmaları:** Deneysel çalışmalar sonucu doğrulanan matematiksel modeldeki başlangıç ve sınır koşulları kullanılarak endüstriyel sistem geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan pilot ölçekli sistemde görülen ve özellikle ürün yüksek Newtonumsu olmayan viskozitesine bağlı olan ürün sıcaklığı tekdüzelik problemi ve endüstriyel ölçekteki ürün hacmi göz önüne alınarak endüstriyel sürekli akış mikrodalga sistem tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Burada 2 farklı sistem üzerinde çalışılmıştır. 1. Sistem 4 akış borusundan ve 8 magnetrondan oluşan bir sistemdir. 2. Sistem ise U şeklinde tek bir akış borusu ve 2 adet magnetrondan oluşmakta olup ürün giriş kolu rotasyon özelliğine sahiptir. Şekil 3.5 ve 3.6’da sistem geometrileri ve ölçüleri verilmiştir.

**Dönme etkisi:** Mikrodalga sistemlerde özellikle sıvı ürünlerde dönme hareketinin ürüne direkt olarak aktarılması ve buna bağlı gerçekleşen karışma işlemi ile ürün sıcaklık değişiminin daha homojen olması ve proses süresi üzerine azaltıcı bir etki elde edilebilmektedir (Topcam 2018). Proses süresini kısaltmaya yönelik olarak endüstriyel sistem 2’de dönmenin etkisi incelenmiştir. Model çalışmalarında dönüş hızı giriş borusunun duvarlarına verilmiştir. Kullanılan hız formülü başlangıç ve sınır koşullarında belirtilmiştir. Sistemde rotasyona sahip olan giriş borusu (Şekil 3.16’da gösterilmiştir.) döndürülerek farklı akış hızları (0,6843 cm/s – 0,9443 cm/s) ve farklı dönüş hızlarında (0, 2,5, 5 ve 10 rpm) ısınma üzerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.16 Sistem 2’de yer alan dönebilir mekanizma

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Akışkan - sıvı ürünlerin endüstriyel proseslerinde ısı işlem amacıyla genellikle kondüksiyon ve konveksiyona dayalı akış sistemleri – ısı değiştiriciler tercih edilmektedir. Bu sistemlerin kullanımına dayalı en büyük problemlerden biri ısıya maruz kalan yüzeylerde sıcaklığın aşırı yükselmesine bağlı olarak fazla ısınan bölgelerde ürünlerin fazla proses edilmesi, yüzeylerde yüksek sıcaklık sonucu protein denatürasyonu meydana gelmesi ve ısı transfer yüzeyinde meydana gelen kirlenmeler – yapışmalar dolayısı ile ısı işlem verimliliğinin düşmesidir. Bu aşırı ısınan bölgelerde ürün duyuşal özelliklerinin değışmesi ile üründe istenmeyen tat ve koku da oluşabilmektedir. Yenilikçi yöntemler olarak mikrodalga ve radyo frekans uygulamanın sıvı ürünlerde kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Mikrodalga ısıtma yöntemi diğer geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve hacimsel bir ısınma ortamı sağlamaktadır. Uygulanan frekansa bağlı olarak radyo frekans uygulamaya göre daha hızlı bir ısı işlem meydana gelirken, elektromanyetik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülme mekanizmasına bağlı olarak da sıvı ürünlerde kullanım açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Ancak mikrodalga sistemler ürün içerisinde her ne kadar hızlı ve hacimsel bir ısınmaya sebep olsa da elektromanyetik alan dağılımının etkisiyle tekdüze olmayan düzensiz bir sıcaklık profili ortaya çıkarmaktadır. Mikrodalga'nın bu özellikleri de göze alınarak yeni sistem tasarımlarına yönelik bazı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Mikrodalga ısıtma proseslerinde sistem içerisindeki elektrik alan dağılımının belirlenmesi, ürünün sistem içerisindeki konumunun belirlenmesi ve prosesin sabit bir tabla veya döner bir tabla üzerinde gerçekleştirilmesi tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde etmek için önem arz etmektedir. Ancak çoğunlukla mikrodalga ısıtma proseslerinde optimum koşullar belirlenirken deneme-yanılma yolu tercih edilmekte olup bu da zaman maliyet açısından kayıplara yol açmaktadır.

Bu çalışma kapsamında pilot ölçekli bir sistem kullanılarak matematiksel model geliştirme çalışmaları yapılmış ve deneysel doğrulamaları da tamamlanmıştır. Prosesin etkinliği ürün içerisine *Listeria monocytogenes* inokülasyonu yapılarak mikrobiyal inaktivasyona bağlı olarak değerlendirilmiştir. Aynı zamanda kalite parametrelerinden biri olan renk değışimlerinin değerlendirilmesi için son üründe renk ölçümü de

yapılmıştır. Daha sonra endüstriyel ölçekli sürekli akış mikrodalga sistem tasarım çalışmaları yapılmıştır. Her iki sistemde de ürün içerisinde tekdüze bir sıcaklık profilinin elde edilmesi hedeflenmiş ve çalışmalar bu doğrultuda tamamlanmıştır.

#### 4.1 Isısal ve Fiziksel Özellikler

##### 4.1.1 Dondurma karışımının dielektrik özellikleri

Mikrodalgaların ısıtma etkisi değerlendirilirken dielektrik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Dielektrik özellikler, gıdaların bileşimi, sıcaklığı ve mikrodalganın frekansına bağlı olarak değişmektedir. Burada gerek ürünün mikrodalgada ısıtılabilirliği gerekse modelleme çalışmalarında deney doğrulamaları için kullanılmak üzere dielektrik özellikler ölçülmüştür. Dondurma karışımının dielektrik özelliklerinin sıcaklık ile değişimi çizelge 4.1’de verilmiştir. Dielektrik değerler 3 tekerrür ve 3 paralel olarak ölçülmüş olup sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 Dondurma karışımının 915 ve 2450 MHz frekans değerinde ölçülen dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Sıcaklık (°C)	915 MHz frekans		2450 MHz	
	Dielektrik sabiti ( $\epsilon_1$ )	Dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon_2$ )	Dielektrik sabiti ( $\epsilon_1$ )	Dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon_2$ )
4	63,82 ± 0,91	19,48 ± 0,45	51,60 ± 1,04	24,00 ± 0,23
9	83,91 ± 0,00	5,90 ± 0,00	81,27 ± 0,01	15,28 ± 0,01
20	80,53 ± 0,14	3,91 ± 0,03	79,18 ± 0,12	10,58 ± 0,02
40	47,99 ± 4,05	11,32 ± 1,26	44,25 ± 3,49	11,55 ± 1,48
60	43,53 ± 2,71	12,54 ± 0,55	40,24 ± 2,50	10,89 ± 0,76
80	61,10 ± 0,04	0,67 ± 0,02	61,13 ± 0,03	2,41 ± 0,01

#### 4.1.2 Dondurma karışımının reolojik özellikleri

Dondurma karışımının sıcaklık ve kesme hızına bağlı olarak viskozitesinin değişimi 4 °C ile 80 °C aralığındaki sıcaklıklarda 1-100 s<sup>-1</sup> kayma hızı aralığında görünür viskozite (Pa.s) olarak Malvern Kinexus Pro Rheometer (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, İngiltere) ile ölçülmüştür. İlgili ekipman paralel plakalı olup sıcaklık kontrollü olarak çalışmaktadır. Ölçümler için 10g'lık dondurma örneği kullanılmış ve hedef sıcaklıklara ulaşan örneklerin ölçümü sağlanmıştır.

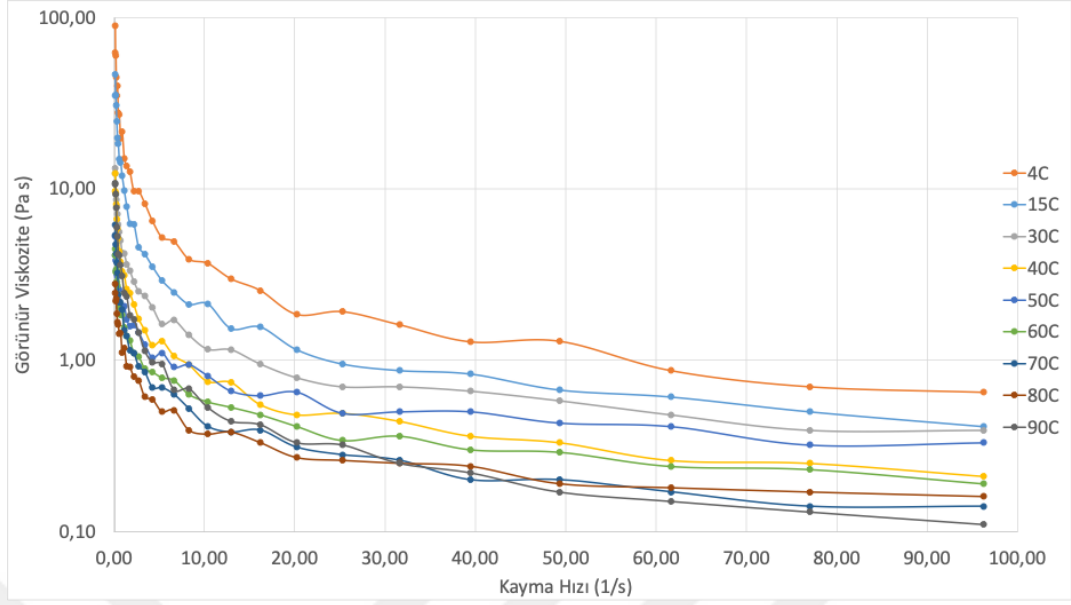
Reolojik özellikler incelendiğinde dondurma karışımının shear thinning (Pseudoplastik) ( $n < 1$ ) özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Newtonumsu (Newtonyen) olmayan akışlarda viskozite değişiminin kuvvet yasası (Power Law) yaklaşımına dayandığı düşünülmektedir (Topcam 2018). Eşitlik 4.1'de viskozite değerinin belirlenmesinde kullanılan denklik verilmiştir:

$$\eta = M(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.2'de pseudoplastik davranışa ait sıcaklığa bağlı konsistens indeksi ve reolojik katsayısı, şekil 4.1'de ise viskozite değerlerinin kayma hızına bağlı değişimi verilmiştir.

Çizelge 4.2 Dondurma karışımının reolojik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık (°C)	M (Pa-s)	N
4	16,13 ± 3,34	0,32 ± 0,03
15	9,07 ± 1,68	0,33 ± 0,04
30	3,85 ± 0,42	0,46 ± 0,03
40	3,47 ± 0,31	0,41 ± 0,01
50	1,98 ± 0,09	0,56 ± 0,04
60	1,59 ± 0,11	0,55 ± 0,01
70	1,62 ± 0,12	0,48 ± 0,05
80	1,09 ± 0,06	0,61 ± 0,08



Şekil 4.1 Dondurma karışımının viskozitesinin sıcaklık ve kayma hızına bağlı olarak değişimi

#### 4.1.3 Dondurma karışımının mikrodalga uygulama sonrası renk değişimi

Sade dondurmalar tüketicinin alışagelmiş olduğu bir renge sahiptir. Ancak yanlış veya uzun süre uygulanan ısıl işlem prosesleri sonrası renkte değişiklikler gözlenebilmektedir. Bu proseslerin renk üzerinde meydana getirdikleri değişiklikler tüketici tarafından olumlu karşılanmamaktadır. Bu nedenle ısıl işlem prosesleri sonrası renk üzerinde olumsuz değişikliklerin en aza indirgenmesi önemlidir. Bu çalışma kapsamında dondurma karışımlarının ısıl işlem sonrası renk değişiklikleri belirlenmiştir. Proses öncesi ve sonrası Hunter kolorimetre sistem ile yapılan ölçümler  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  renk değerleri üzerinden hesaplanmıştır. Materyal ve metot bölümünde belirtilen her iki kap için de renk değişimleri belirlenmiştir. Burada renk ölçümleri en uzun proses süresi sonunda yapılmıştır. Mikrodalga ısıtma prosesinin renk değerleri üzerindeki etkisi istatistiksel olarak değerlendirilmiştir ( $p < 0.05$ ). Çizelge 4.3 ve 4.4 karşılaştırıldığında deneyler sonucunda küçük kaptaki renk değişimlerinin büyük kaptaki renk değişimlerine kıyasla çok daha minimal olduğu görülmektedir. Bu durum küçük kapta gerçekleşen kısa proses süresinin (190 s) sonucudur. Artan proses süresiyle birlikte renk değişimlerinin de artacağı söylenebilir. Büyük kaptaki renk değişimleri istatistiksel olarak anlamlı olsa ( $p < 0.05$ ) da görsel açıdan değerlendirildiğinde renk farkları olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.3 Küçük kapta yapılan deneylere ait renk ölçüm sonuçları

	<b>Kontrol</b>	<b>190 s Isıtılmış Dondurma Örneği</b>
<b><i>L*</i></b>	67,93 ± 0,58 <sup>a</sup>	68,24 ± 0,55 <sup>a</sup>
<b><i>a*</i></b>	-3,38 ± 0,38 <sup>a</sup>	-4,05 ± 0,12 <sup>b</sup>
<b><i>b*</i></b>	4,60 ± 0,91 <sup>a</sup>	4,94 ± 0,26 <sup>a</sup>

Çizelge 4.4 Büyük kapta yapılan deneylere ait renk ölçüm sonuçları

	<b>Kontrol</b>	<b>900 s Isıtılmış Dondurma Örneği</b>
<b><i>L*</i></b>	61,81 ± 0,25 <sup>b</sup>	64,52 ± 0,34 <sup>a</sup>
<b><i>a*</i></b>	-2,14 ± 0,11 <sup>a</sup>	-3,15 ± 0,07 <sup>b</sup>
<b><i>b*</i></b>	-3,40 ± 0,05 <sup>b</sup>	-1,44 ± 0,17 <sup>a</sup>
<b><i>C*</i></b>	4,01 ± 0,10 <sup>a</sup>	3,46 ± 0,11 <sup>b</sup>
<b><i>h*</i></b>	237,88 ± 0,090 <sup>a</sup>	204,43 ± 2,41 <sup>b</sup>

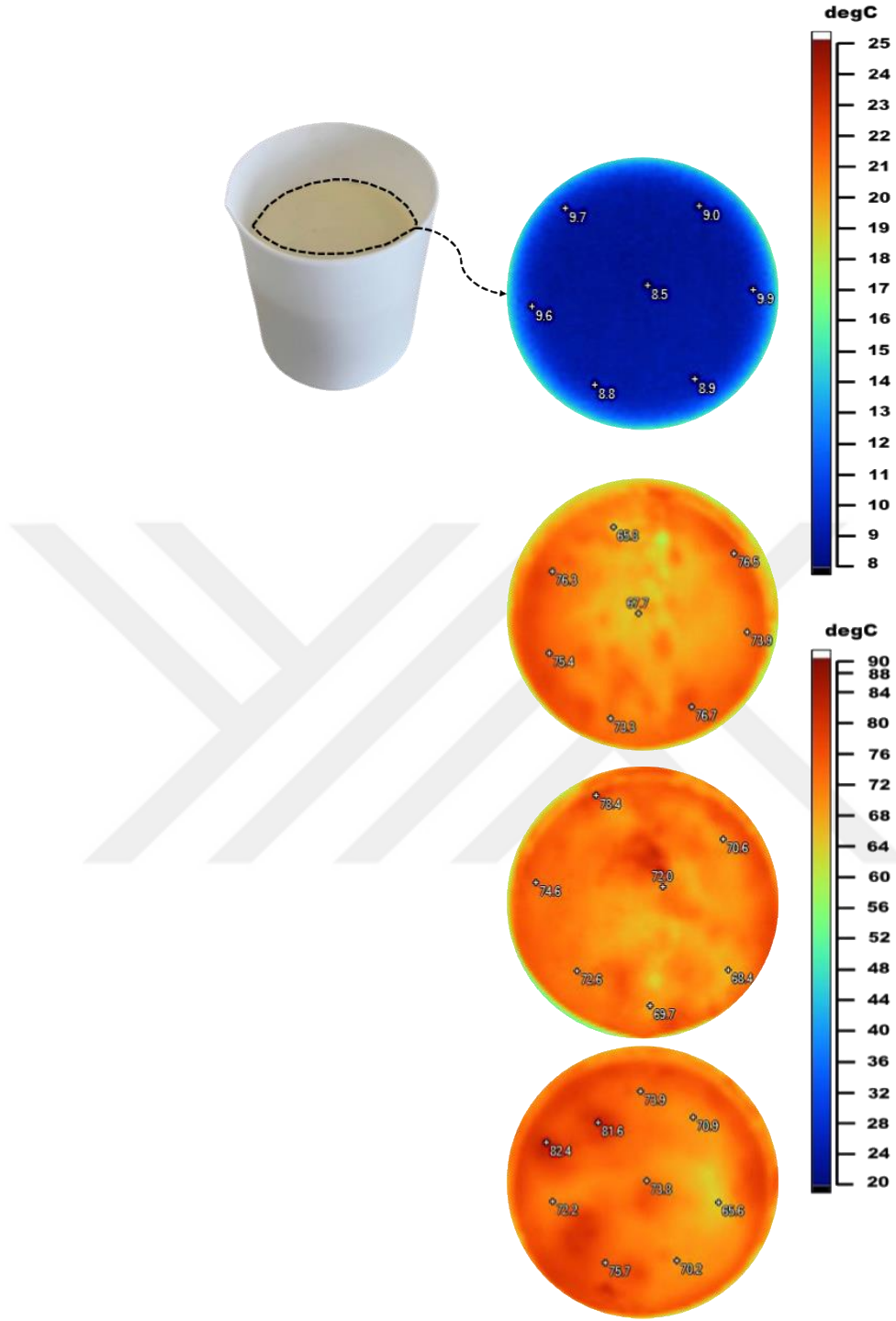
## 4.2 Matematiksel Model Doğrulama Çalışmaları

### 4.2.1 Dondurma karışımı sıcaklık değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları

Elektromanyetik alana geçirgen teflon (PTFE) malzemeden yapılmış ve materyal metot bölümünde boyutları detaylı olarak açıklanan 2 farklı kap (Şekil 3.4) ile 2450 MHz'de tam güç modunda (%100) çalışan pilot ölçekli bir mikrodalga sistem kullanılarak dondurma karışımlarına ısıl işlem uygulanmıştır. Küçük kap için yüksekliği 6,92 cm büyük kap için ise yüksekliği 6,88 cm oluncaya kadar ürün doldurulmuştur. Burada ürün dolumu yapılırken taşma riski göz önüne alınarak tepe boşluğu bırakılmıştır. Her iki kap içinde mikrodalga uygulama prosesi sırasında 1'er tanesi merkez olmak üzere 3 farklı noktadan fiber optik problar yardımıyla zamana bağlı sıcaklık ölçümü yapılmıştır (Sıcaklık ölçüm noktaları materyal ve metot bölümünde yer alan şekil 3.12'de verilmiştir).

Proses öncesi ve sonrası büyük kaptaki ürünün termal kamerayla görüntülenen yüzey sıcaklık dağılımları şekil 4.2’de verilirken; şekil 4.3 ve 4.4’te her iki durum için ürün sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Dondurma karışımları proses edilirken proses süresi endüstride de hedef pastörizasyon sıcaklığı olan 80 °C’ yi sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Küçük ve büyük kaptaki deney karşılaştırılmalarına bakıldığında her kap için kendi içerisinde paralellik olduğu görülmektedir. Burada ürün hacmindeki artışa da bağlı olarak büyük kapta hedeflenen sıcaklık için proses süresinin daha uzun olduğu görülmektedir. Zamana bağlı sıcaklık ölçümleri alınırken yerleştirilen ısı problemlerinin sabit kalması önem arz etmektedir. Özellikle büyük kaptaki deneyler arasındaki dalgalanmanın kaynağı ürün içerisindeki kaynamalara bağlı olarak fiber optik problemlerin uygulama sürecinde salınarak yer değiştirmeleridir. Her ne kadar sabitleyici aparat yardımıyla bu durum engellenmeye çalışılsa da tamamen önlenememiştir. Deneyler arasındaki başlangıç sıcaklık koşulları 8-11 °C arasında değişmektedir. Buradaki değişiklik ürünün deney düzeneğine yerleştirme aşamasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Proses sonrası her 3 deney için de ortalama yüzey sıcaklığı ~72 °C’dir. Deneylerin termal kamera görüntüleri ve zamana bağlı sıcaklık verileri incelendiğinde sistemin de stabil çalıştığı görülmektedir.

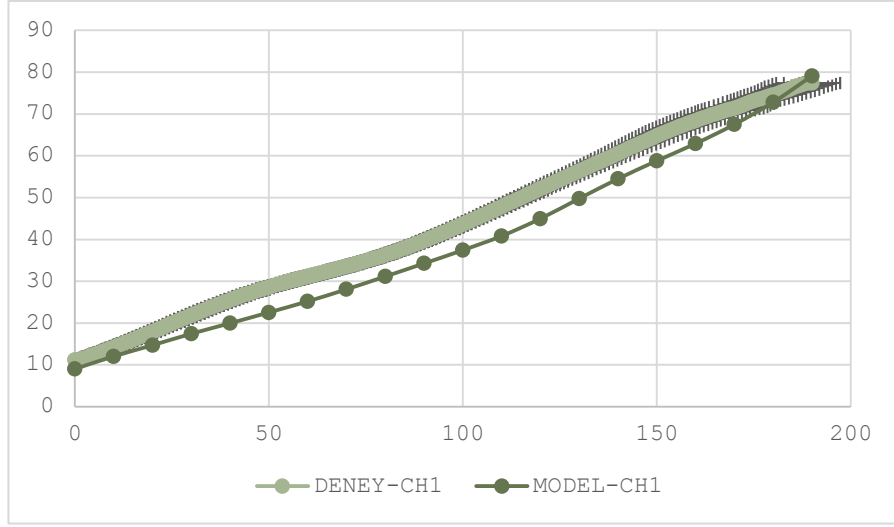


Şekil 4.2 Büyük kapta yapılan deneylerde proses öncesi (a) ve 750 s proses sonrası (b) ürün yüzey sıcaklık dağılımı

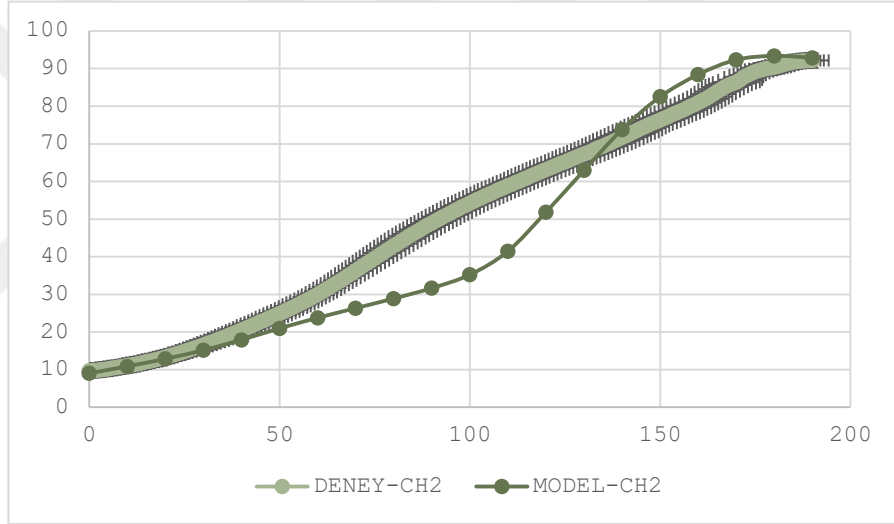
Şekil 4.5 ve 4.6’da küçük ve büyük kap için deney ve modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık değişimlerini karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla ‘root mean square error’ (RMSE) değerleri de ayrıca hesaplanmıştır (Scheerlinck vd. 2004):

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

Bu denklikte N; deneysel veri sayısını, T deneysel sonuçları, T sim ise matematiksel model çalışmasından elde edilen sıcaklık değişim verilerini göstermektedir. Yapılan simülasyonlar ile deney verileri karşılaştırıldığında RMSE değeri küçük kap için derin noktada (CH1) 7,39 iken merkez noktada (CH2) 10,59 olarak hesaplanmıştır. Büyük kapta ise derin (CH1), merkez (CH2) ve yüzey (CH3) nokta için sırasıyla 11,24, 8,10 ve 10,85 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, her ne kadar genel model deney yaklaşım sonuçlarından yüksek görünse de (<5 °C), ısı işlem uygulanan sistem reolojisi ve deney düzeneğindeki sıcaklık ölçümünde sapmaya yol açacak problemler düşünüldüğünde, kabul edilebilir düzeyde bir doğrulama çalışmasının gerçekleştirildiği düşünülmektedir.

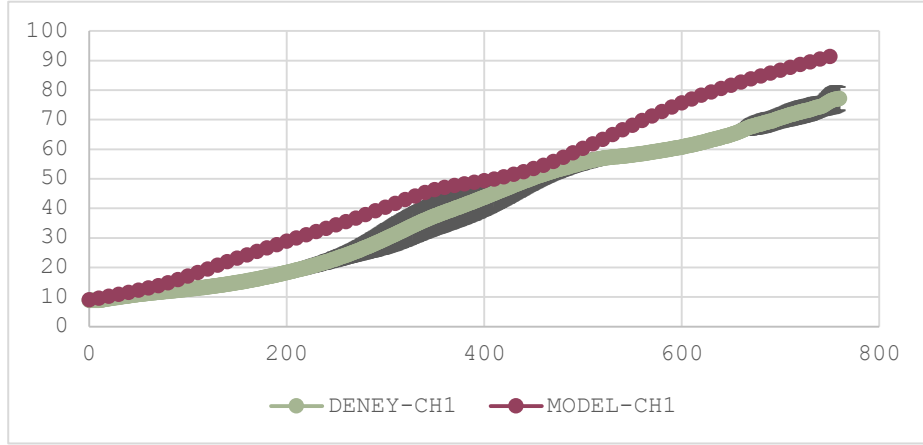


**a**

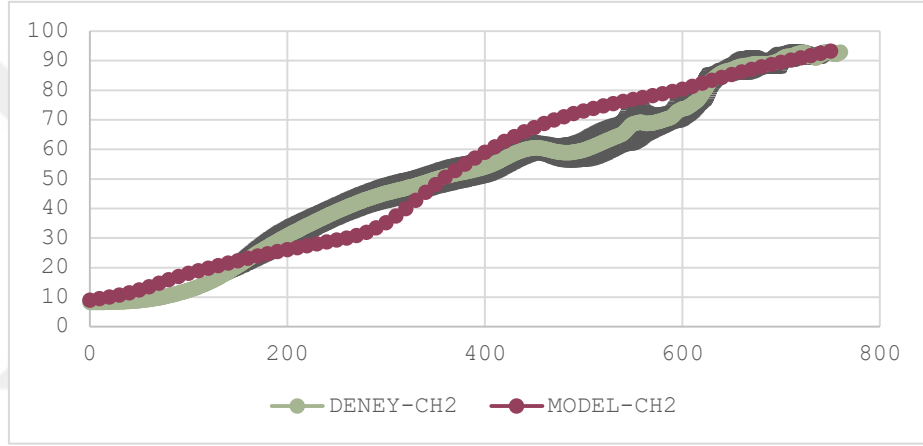


**b**

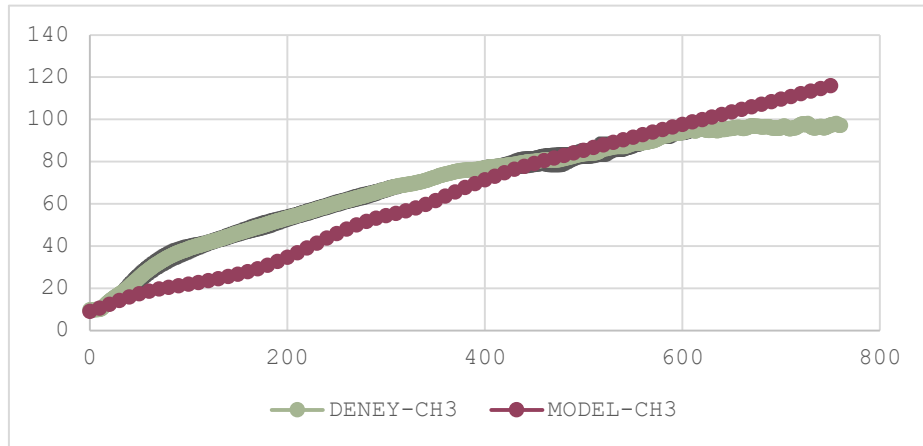
Şekil 4.3 Küçük kaptaki deneyler ve model sonuçlarının karşılaştırılması (a) Derin nokta  
(b) Merkez nokta



**a**



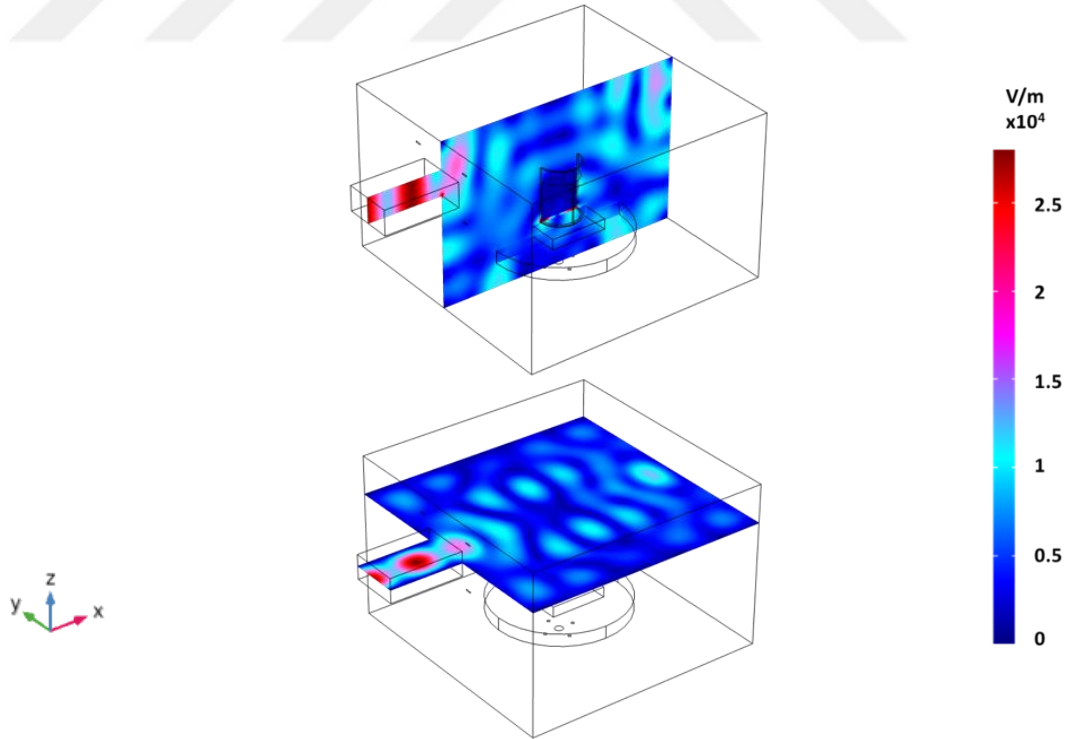
**b**



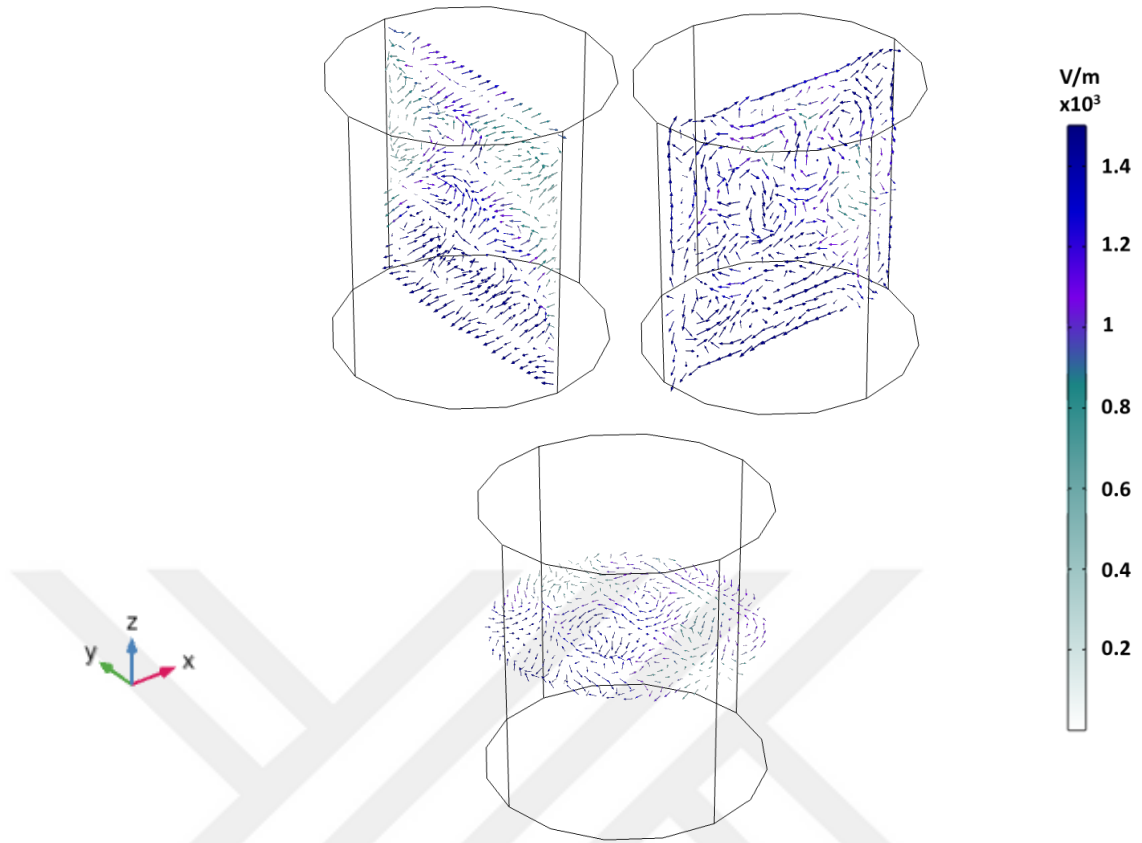
**c**

Şekil 4.4 Büyük kaptaki deneyler ve model sonuçlarının karşılaştırılması (a) Derin nokta (b) Merkez nokta ve (c) Yüzey nokta

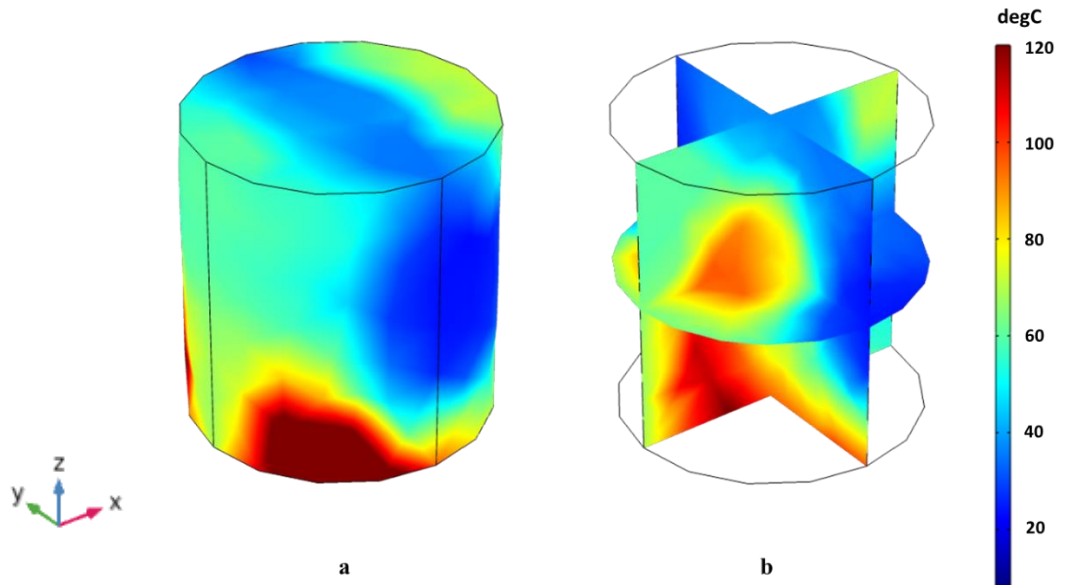
Şekil 4.5 ve 4.6’da ise mikrodalga sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı, şekil 4.7’de ise küçük kap için ürün içi sıcaklık dağılımı verilmiştir. Büyük kap için ise şekil 4.9’da elektromanyetik alan ve dağılımı ve şekil 4.10’da ürün içi sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Mikrodalga sistemler hacimsel ısıtma prensibi ile çalışıyor kabul edilmesine rağmen şekil 4.10’da da gözlemlendiği üzere ürün içerisinde önemli bir sıcaklık tekdüzelik problemi bulunmaktadır. Ürün içerisinde doğal konveksiyona bağlı olarak oluşan akış profili ise her iki durum için şekil 4.8 ve şekil 4.11’de gösterilmektedir. Özellikle dondurma karışımının yüksek viskozite özelliğine bağlı olarak ürün içerisinde doğal konveksiyona bağlı akış ve sıcaklık profilinin etkin bir şekilde oluşmaması tekdüze sıcaklık dağılımı elde edilememesinin önemli bir sebebidir. Tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı ile üründeki soğuk bölgeler mikrobiyolojik açıdan risk oluşturarak yetersiz bir pastörizasyona sebep olmaktadır. Bu nedenle tez çalışması kapsamında tasarım çalışmaları planlanan sürekli akış mikrodalga sistemlerinin kullanılması ile hem üründe yeterli karışımın sağlanması hem de buna bağlı olarak tekdüze yani homojen bir sıcaklık profilinin elde edilebilmesi mümkün olacaktır.



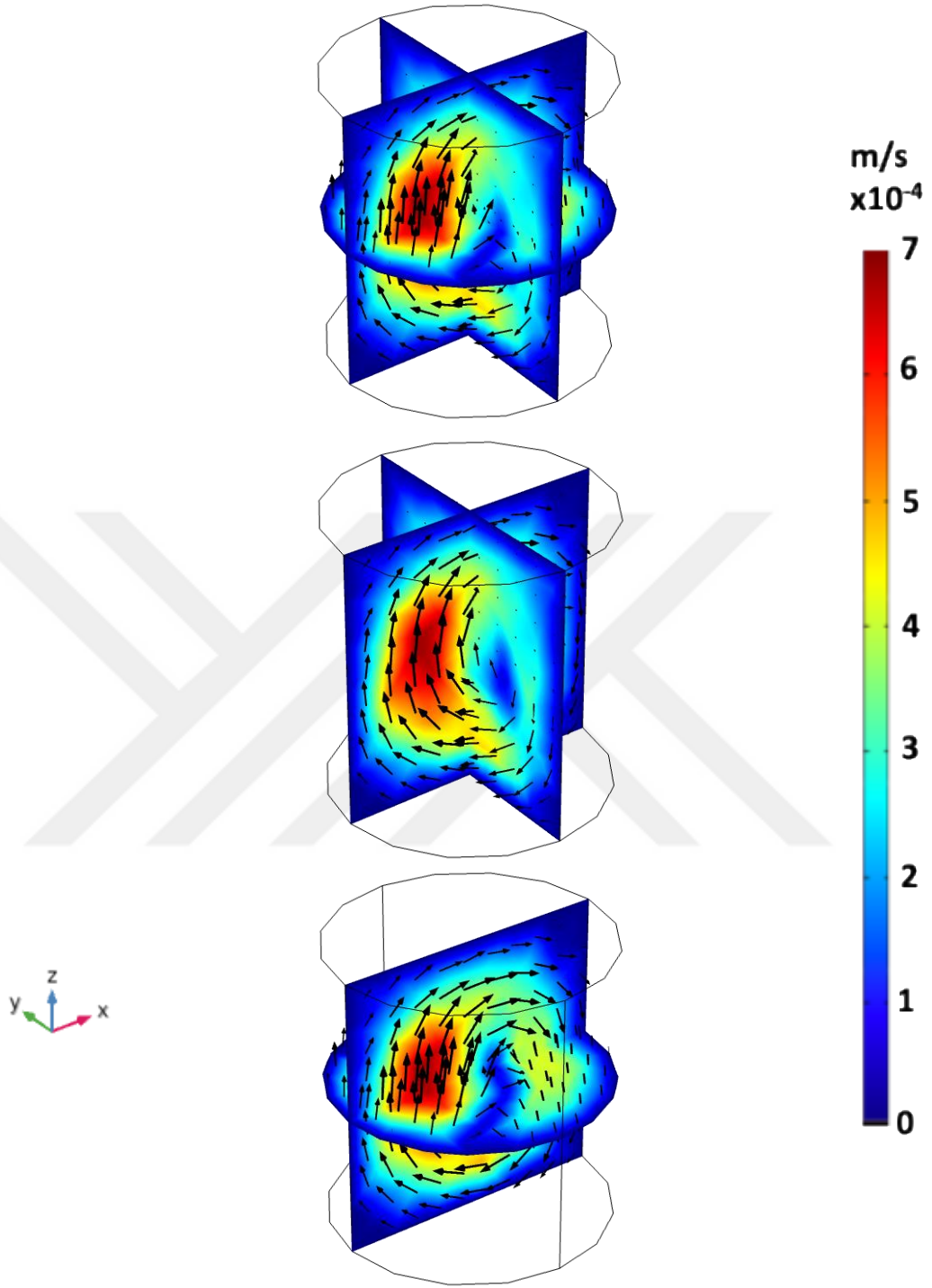
Şekil 4.5 Küçük kap kullanılarak gerçekleştirilen mikrodalga ısıl işlem sürecinde kavite içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımının (V/m) xz-orta kesitinde gösterilmesi



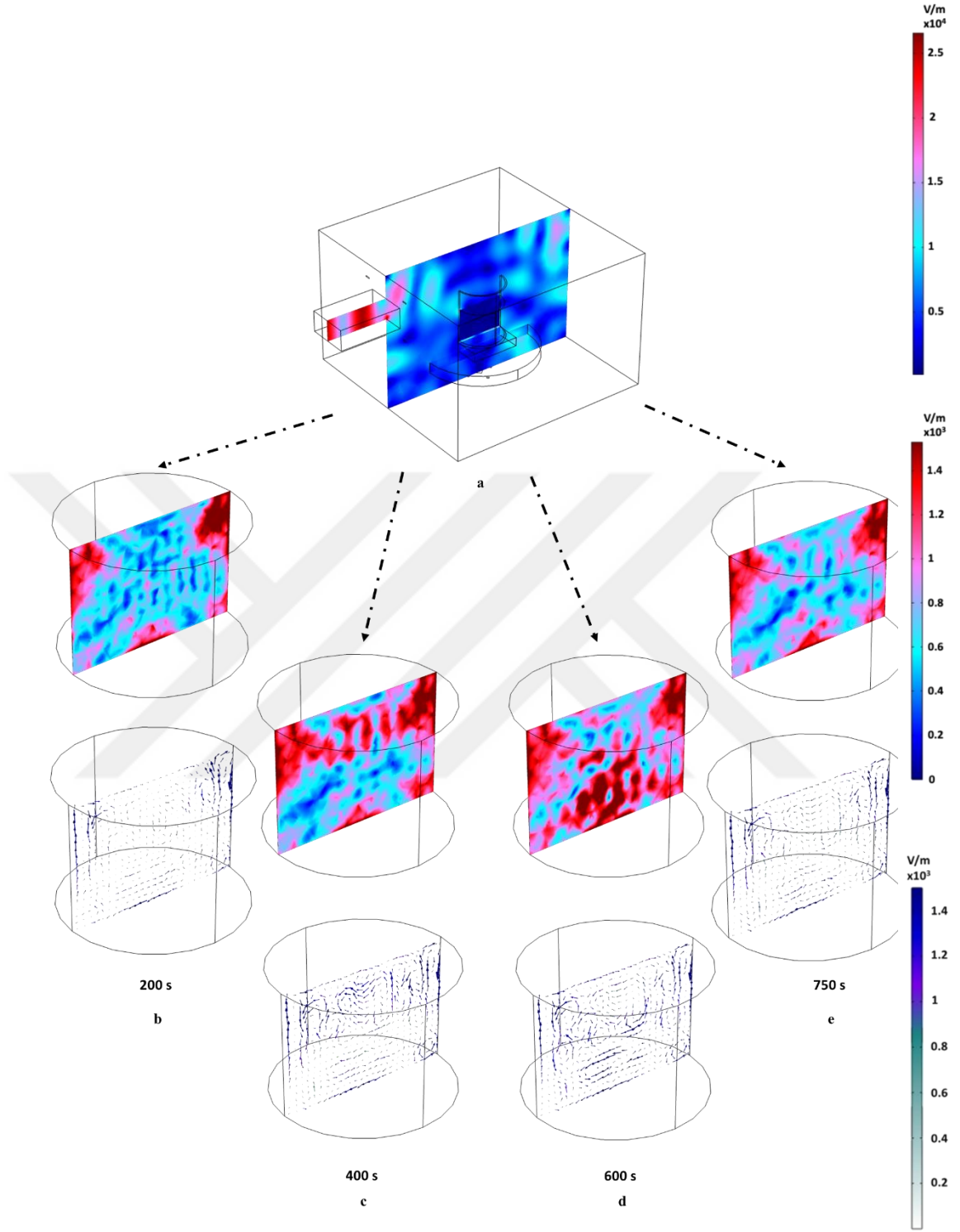
Şekil 4.6 Küçük kap kullanılarak gerçekleştirilen mikrodalga ısıtma işlem sürecinde ürün içerisindeki elektromanyetik alana ait kesit ( $V/m$ )



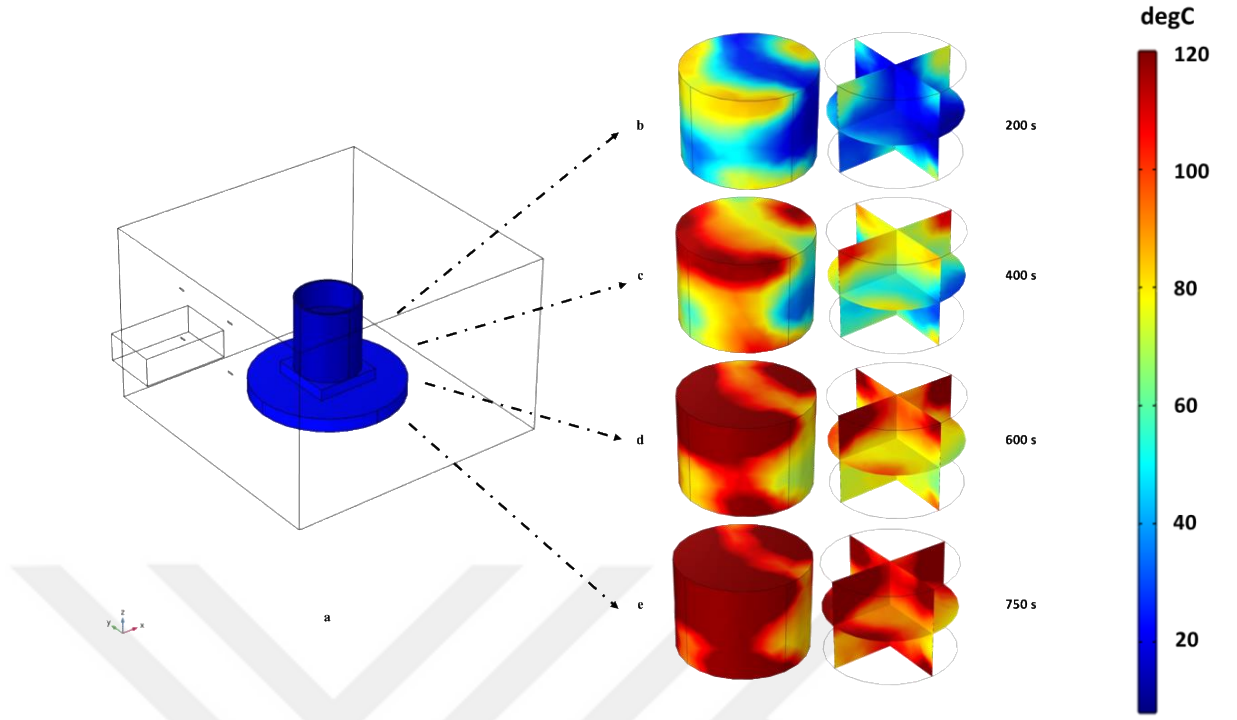
Şekil 4.7 Mikrodalga prosesi sonu 190.s 'de küçük kaptaki hacimsel (a) ve xy-yz ve zx düzlemlerinde (b) sıcaklık dağılımı ( $^{\circ}C$ )



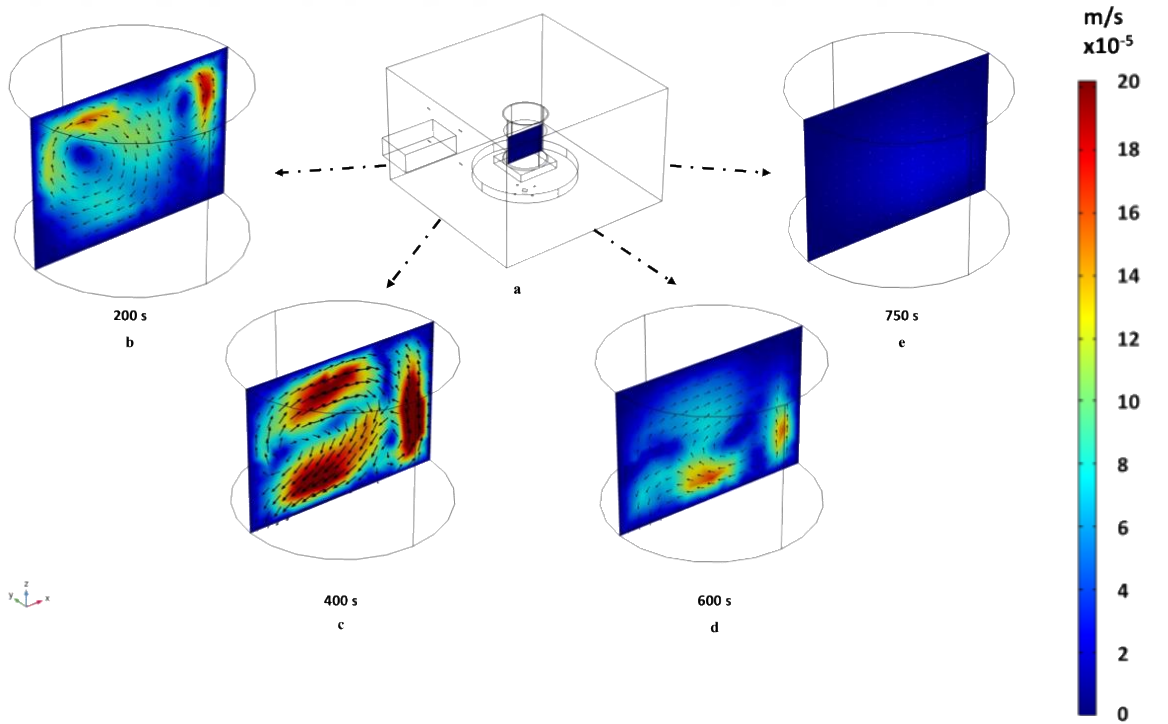
Şekil 4.8 Küçük kaptaki ürün içerisinde doğal konveksiyon sonucu oluşan akış profiline ait kesit (190.s) (m/s)



Şekil 4.9 Büyük kaptaki 200.(b), 400. (c), 600. (d) ve 750. (e) s'de ürün ve kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımını (a) (V/m)



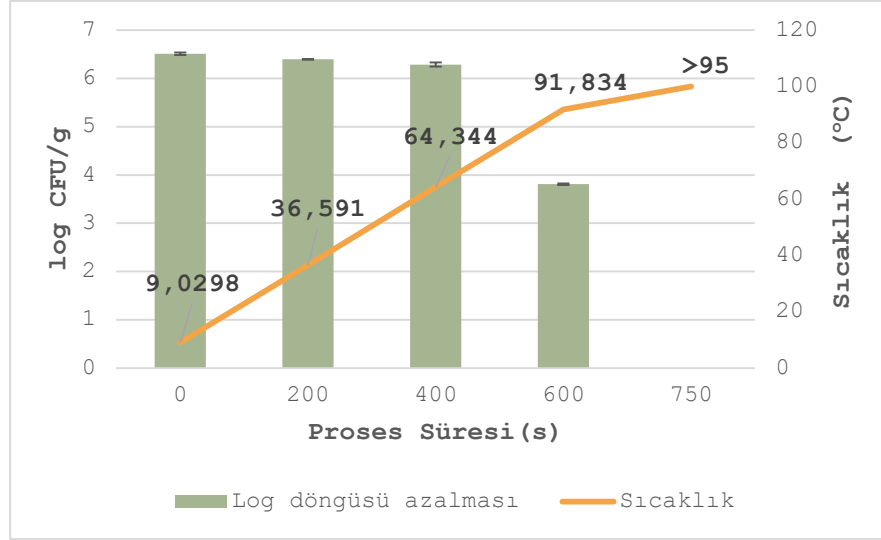
Şekil 4.10 Mikrodalga prosesi esnasında büyük kaptaki xy-yz ve zx düzlemlerinde sıcaklık dağılımı (200.s(b), 400.s (c), 600.s (d) ve 750.s (e)) (°C)



Şekil 4.11 Büyük kaptaki ürün içerisinde doğal konveksiyona bağlı olarak oluşan akış profili (200.s (b), 400.s (c), 600.s (d) ve 750.s (e)) (m/s)

#### 4.2.2 Mikrobiyal inaktivasyon etkinliğinin değerlendirilmesi

Pastörizasyon amacı ile dondurma karışımlarına uygulanan mikrodalga ısıtma prosesinde %100 güç modunda 750 s sonrası ürün sıcaklığı 3 noktadan alınan sıcaklık verilerinin hacimsel olarak 90 °C'ye ulaştığı görülmektedir. Doğrulanen matematiksel modelden elde edilen sonuçlar göze alınarak 4 farklı hacimsel sıcaklık değeri belirlenmiş ve buna göre proses süreleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında dondurma karışımlarına *Listeria monocytogenes* suşu inoküle edilmiş ve çalışma 2 tekerrür olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan karışık kültür çözeltilisine ait başlangıç yükü  $8,88 \pm 0,03$  log CFU/g'dır. İnokülasyon sonrası proses edilmemiş başlangıç koşulundaki dondurma karışımlarına ait yük ise  $6,51 \pm 0,03$  log CFU/g olarak belirlenmiştir. 200 ve 400 s'lik proseslerde sırasıyla ortalama 36,59 ve 64,34°C sıcaklıklara ulaşılmış olup mikrobiyal yük  $6,40 \pm 0,00$  ve  $6,29 \pm 0,04$  log CFU/g olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.12). Bu ısıl işlem süresinde anlamlı bir mikrobiyal azalma gözlenmemiştir. Bunun sebebi *Listeria*'nın inaktivasyonu için gereken sıcaklıklara ulaşılmamış olmasıdır. 600 s'lik proses sonucunda elde edilen ortalama sıcaklık 91,83 °C, mikrobiyal yük ise  $3,81 \pm 0,01$  log CFU/g olup toplamda 2,70 log azalma sağlanmıştır. Tam inaktivasyon ise 750 s'lik proses sonucunda hacimsel sıcaklığın 95 °C'yi geçmesinden sonra elde edilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar dondurma karışımının pastörizasyonu için mikrodalga sisteminin uygulanabilir alternatif bir yöntem olduğunu göstermektedir.

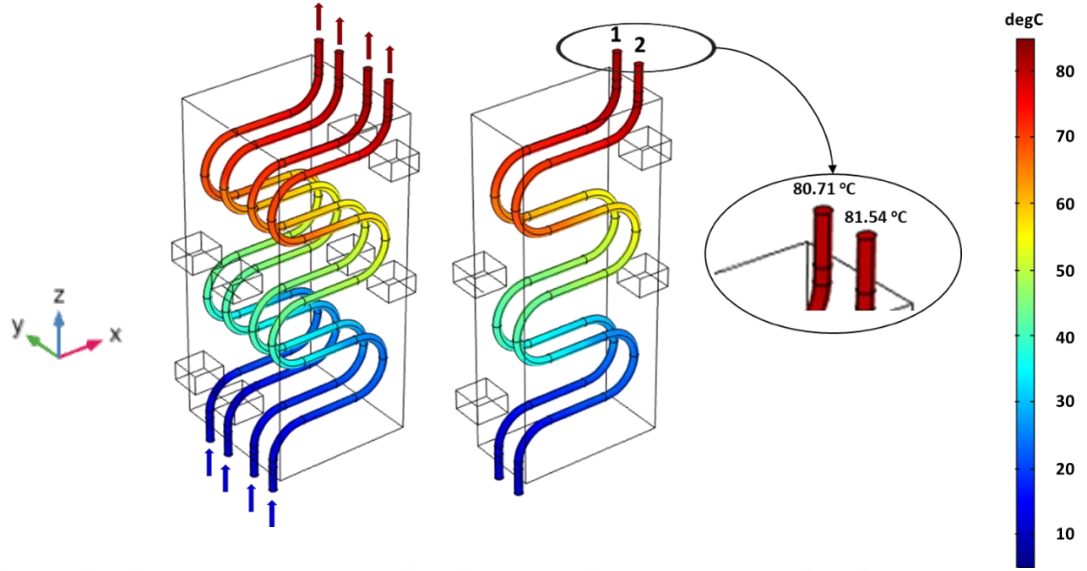


Şekil 4.12 Dondurma karışımında büyük kapta mikrodalga ısıl işlem sürecinde mikrobiyal yükünde meydana gelen azalma ve ürün hacimsel ortalama sıcaklık değişimi

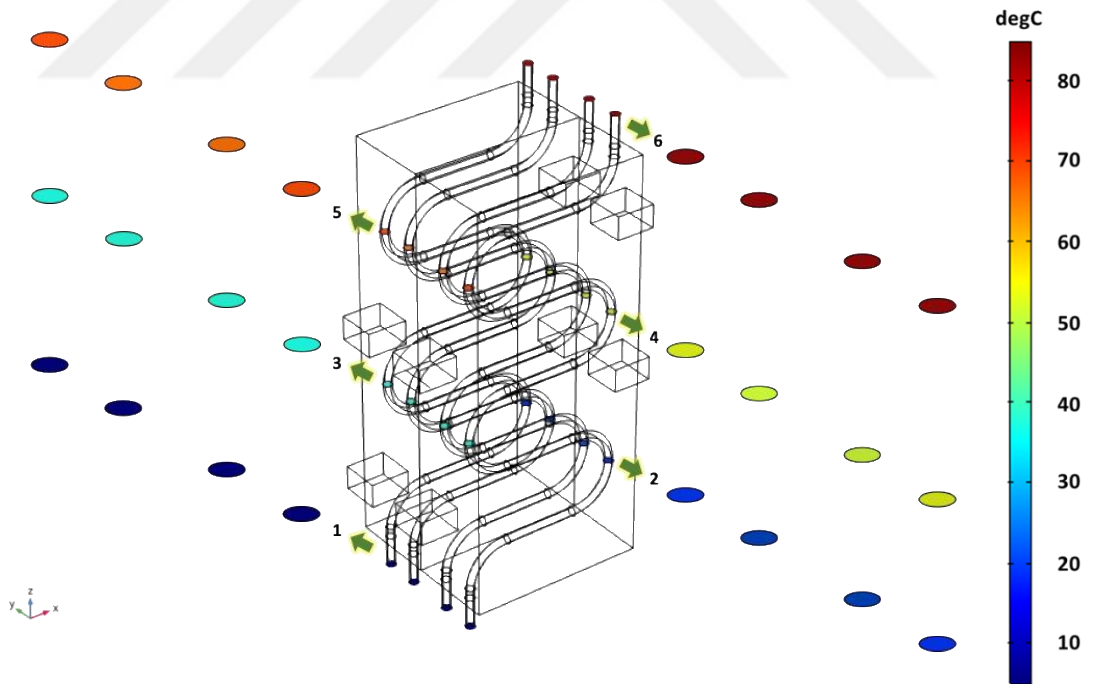
### 4.3 Proses Uygulamaları

#### 4.3.1 Endüstriyel ölçekli sürekli akış mikrodalga sistem geliştirilmesi

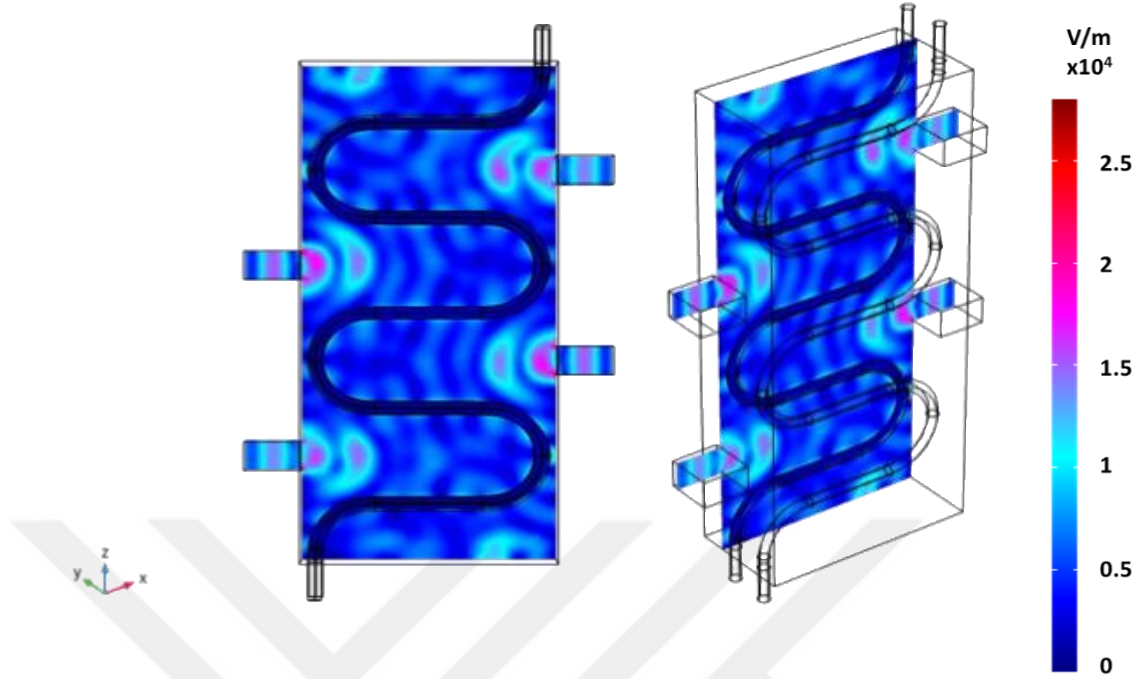
**Endüstriyel Sistem 1:** Pilot ölçekli mikrodalga sistemin tekdüze ısıtma problemi göz önüne alınarak sürekli akış bir mikrodalga tasarımı deneysel veriler kullanılarak doğrulanan model kapsamında gerçekleştirilmiştir. Burada amaç ürün sıcaklık değişiminde tekdüze ısıtma sağlayacak bir sistem tasarlamaktır. Tasarlanan endüstriyel sistemde dondurmanın mikrodalga ısıtma sonrası sıcaklık dağılımı şekil 4.13'te verilmiştir. Ürün giriş sıcaklığı 11 °C'dir. Çıkış sıcaklıklarına bakıldığında 1 numaralı hatta ve 2 numaralı hatta çıkış bölgesinde sırasıyla 80,71 °C ve 81,54 °C'dir. Sistem içerisinde gerçekleşen sıcaklık dağılımı ise farklı kesitlerde şekil 4.14'te verilmiştir. Sistem içi meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı ise şekil 4.15'te verilmiştir. Tasarlanan sistemde ürün akış hızı 0,02125 m/s'dir. Sistemde tek bir borudan proses edilen ürün miktarı 38,7 L/saat olup günde  $928,8 \times 4 = 3715,2$  L ürünün proses edilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.13 Endüstriyel skala sistem 1 geometrisi (a) ve simetri geometrisinde (b) sıcaklık dağılımı (°C)

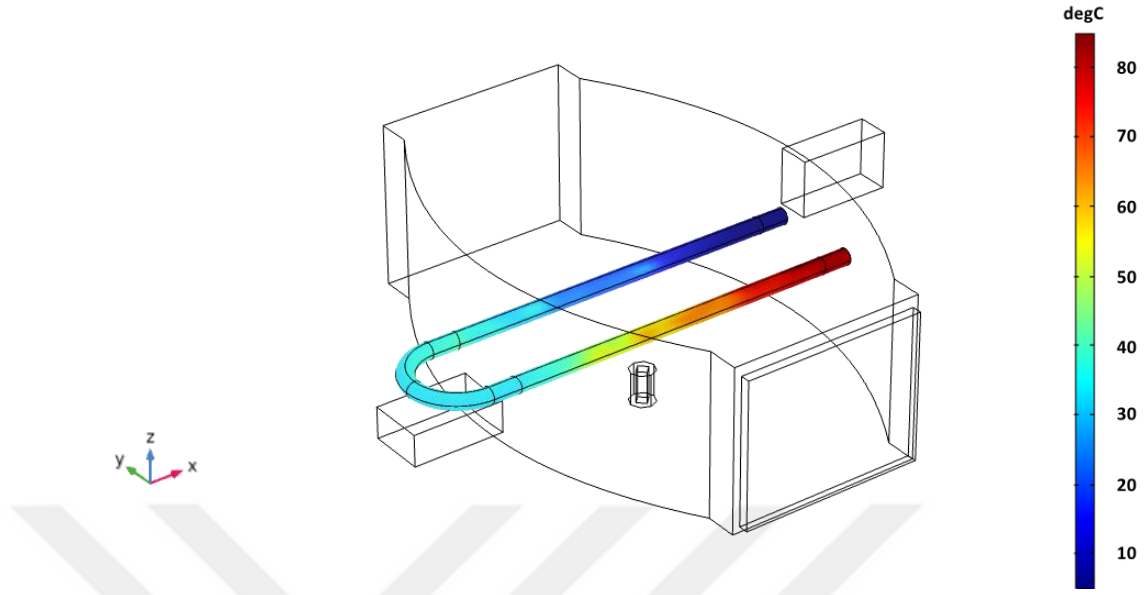


Şekil 4.14 Endüstriyel skala sistem 1 geometrisi içerisinde sürekli akış sürecinde meydana gelen sıcaklık değişimi

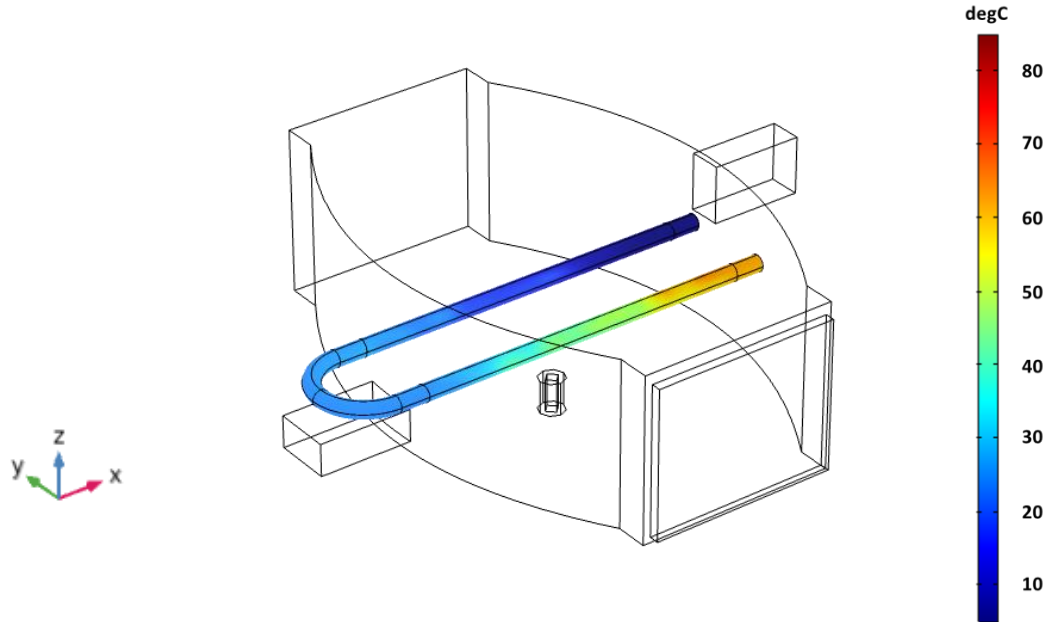


Şekil 4.15 Endüstriyel skala sistem 1 geometrisi sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alana dağılımı xz orta kesiti (V/m)

**Endüstriyel Sistem 2:** Bu sistem yukarıda açıklandığı kapsamda U şeklinde bir akış borusu ve 700 W gücünde 2 adet magnetrondan oluşmaktadır. Sistemin giriş kolu dönüş kıvrımına kadar rotasyon mekanizmasına sahiptir. Ürünün sisteme 12,36 °C sıcaklıkta girdiği varsayılmıştır. Sistem içerisinde rotasyonsuz mikrodalga ısıtma proseslerinde 0,6843 cm/s ve 0,9444 cm/s akış hızları kullanılmış olup ısıtma sonrası sıcaklık dağılımları sırasıyla şekil 4.16 ve 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.18 ve 4.19’da ise sistem içi meydana gelen elektromanyetik alan dağılımları verilmiştir. Tasarlanan sistemde ürün akış hızı 0,006843 m/s olduğunda çıkış sıcaklığı 82,33 °C, 0,009443 m/s olduğunda ise 63,854 °C’dir. 0,006843 m/s akış hızında proses edilen ürün miktarı 12,483 L/saat olup günde 299,6 L ürünün proses edilmesine olanak sağlamaktadır. Ürün akış hızı 0,009443 m/s olduğunda ise saatte 17,225 L ürün proses edilebilir olup günde 413,4 L ürün proses edilebilmektedir.

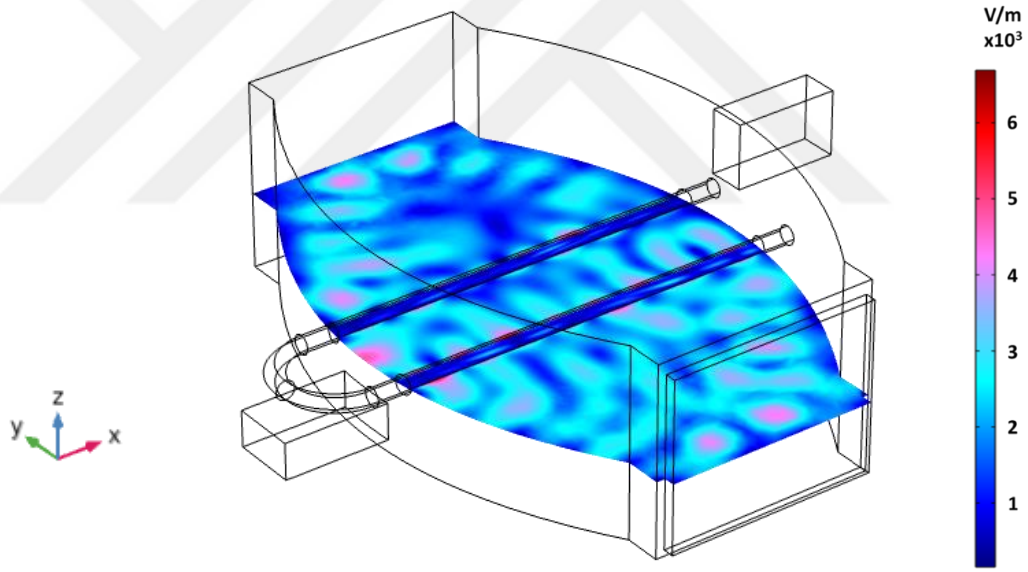


Şekil 4.16 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0.6843 cm/s akış sonrası meydana gelen sıcaklık dağılımı

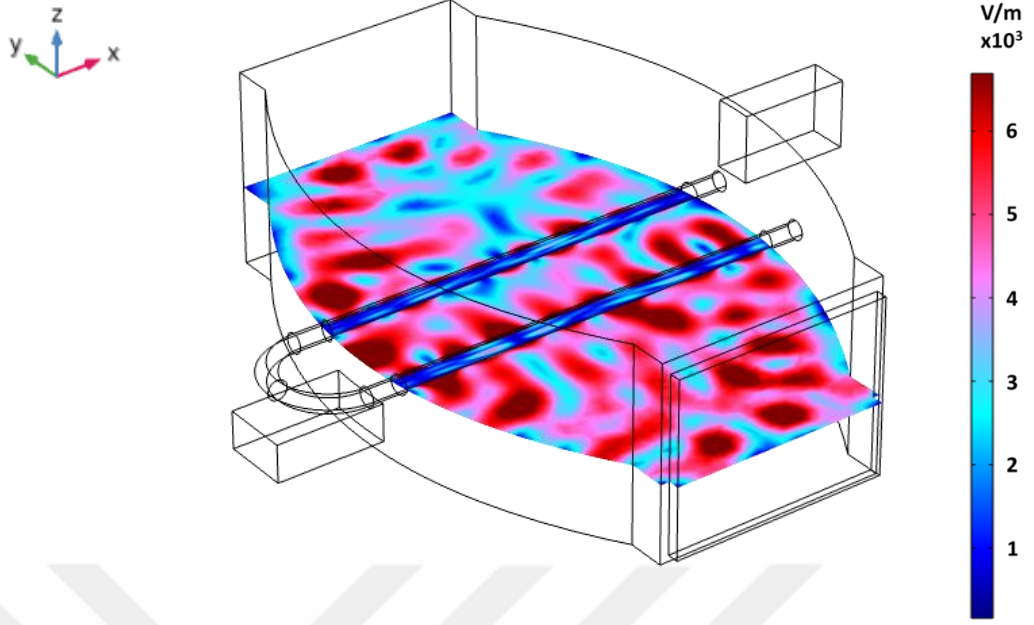


Şekil 4.17 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0.9443 cm/s akış sonrası meydana gelen sıcaklık dağılımı

Ancak burada şekil 4.17’de görüldüğü gibi sistem akış hızı 0,009443 m/s olduğunda sistemin denge sıcaklığı proses için belirlenen sıcaklık değerinin altında kalmaktadır. Bu durumun zamana bağlı dengeye gelme ve ürünün sistem içerisinde kaldığı süre düşünüldüğünde dengeye geldiği sıcaklık hedef sıcaklığın altında kalmaktadır. Burada hedef sıcaklığa ulaşmak için ürünün sistem içerisinde kalma süresinin artırılması gerekmektedir. Boru tasarımı ve akış hızı ile ilgili yapılacak değişiklikler ile bu sıcaklığa ulaşılabilir. Şekil 4.18 ve şekil 4.19’daki manyetik alan yoğunluğuna bakıldığında ise artan akış hızı ile manyetik alanın daha fazla yoğunlaştığı görülmektedir. Artan akış hızlarıyla, manyetik alan yoğunluğu artar ve enerji transferi hızlanır. Bu durum, sistemin dengeye geldiği sıcaklığı düşürmektedir.



Şekil 4.18 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0.6843 cm/s akış sonrası oluşan elektromanyetik alana ait kesit (V/m)



Şekil 4.19 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0.9443 cm/s akış sonrası meydana gelen elektromanyetik alana ait kesit (V/m)

#### 4.3.2 Dönmenin sıcaklık değişimi ve tekdüzeliğe etkisi

Mikrodalga uygulama sürecinde elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak ürün tarafından absorbe edilen enerji miktarı ve penetrasyon derinliği ürün sıcaklık değişimi etkileyen önemli faktörlerdir. Buna ek olarak, özellikle sıvı ürünlerde, doğal ya da zorlamalı konveksiyon oluşum ürün viskozitesi bağlı olarak ürün sıcaklık değişimini etkilemektedir. Bu nedenle, proses sürecinde üründe bir karışım etkisi yaratabilmek amacıyla uygulanacak olan dönme etkisi de ürün sıcaklık değişiminin tekdüze olarak elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Topcam vd., 2020). Dönme etkilerinin elektromanyetik enerjiyi farklı açılarda odaklayarak gıda ürünlerinin sıcaklık tekdüzeliğini arttırdığı literatürde de bazı çalışmalarla desteklenmiştir (Topcam vd., 2020). Sıvı ürünlerde içeride oluşan konveksiyonel akımlar etkisi ile ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı viskoziteye göre değişkenlik göstermektedir. Düşük viskoziteli ürünler daha kolay elde edilebilen karıştırma etkisiyle daha tekdüze olarak ısınabilirken bu durum aynı proses koşullarında viskozitesi yüksek ürünler için daha zor olmakta ve bu durum da daha dengesiz bir sıcaklık dağılımına yol açmaktadır.

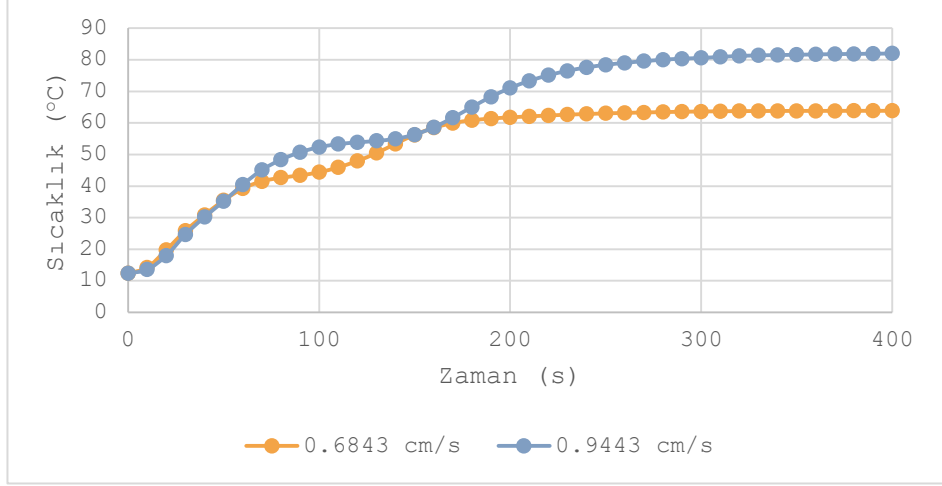
Dondurma karışımının viskozitesi incelendiğinde artan sıcaklıkla beraber M ve n değerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum artan sıcaklıkla beraber dondurma karışımının akışkanlığının da arttığını göstermektedir. Artan akışkanlık ise ürünün karışmasını kolaylaştırmakta ve daha tekdüze bir sıcaklık profilinin elde edilebilmesine yardımcı olmaktadır.

Endüstriyel sistem 2 de dönme etkisi verilebilen boru kesiminde 0, 2,5, 5 ve 10 rpm’de rotasyonun etkileri incelendiğinde 2,5 ve 5 rpm arasında önemli bir sıcaklık farkı gözlenmemiştir. Karışım 10 rpm ile karıştırıldığında ise sıcaklık tekdüzeliğinde önemli bir ilerleme sağlanabilmiştir. Sistem 2’de farklı akış ve dönüş hızlarında sistemin yatışkın koşula geldiği sıcaklıklar çizelge 4.5’te verilmiş olup şekil 4.21’de gösterilen kesitten alınan akış profilleri ise şekil 4.22 ve 4.23’te gösterilmiştir. Sistemin dengeye geldiği sıcaklık profili ve borudaki sıcaklığın farklı noktadaki kesitleri ayrıca şekil 4.24’te verilmiştir.

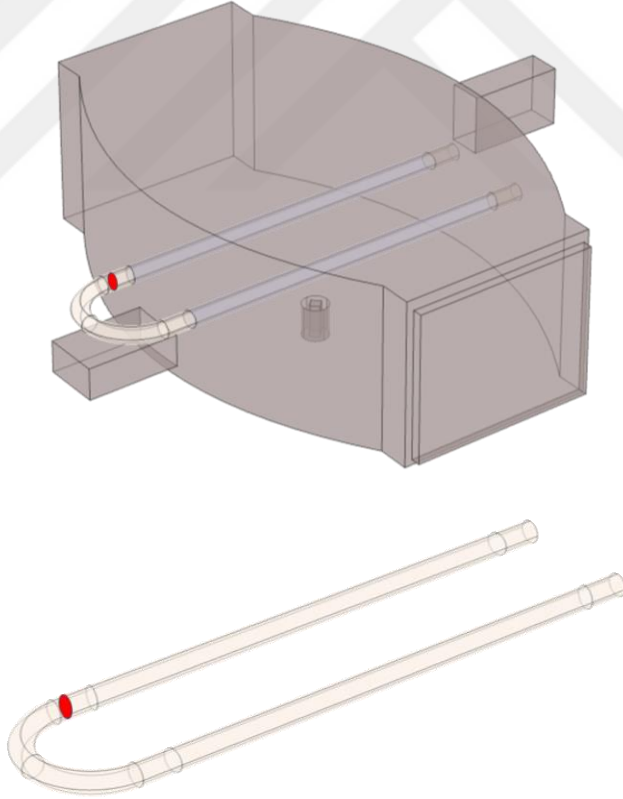
Çizelge 4.5 Endüstriyel sistem 2’de akış ve dönüş hızına bağlı olarak sistemin yatışkın koşula geldiği durumda sistem çıkışı ortalama sıcaklık değerleri

Dönüş Hızı (rpm)	Sistem çıkışı ortalama sıcaklık değeri (°C)	
	0,6843 cm/s	0,9443 cm/s
0	82,331	63,854
2,5	76,066	58,328
5	76,073	58,325
10	77,750	59,701

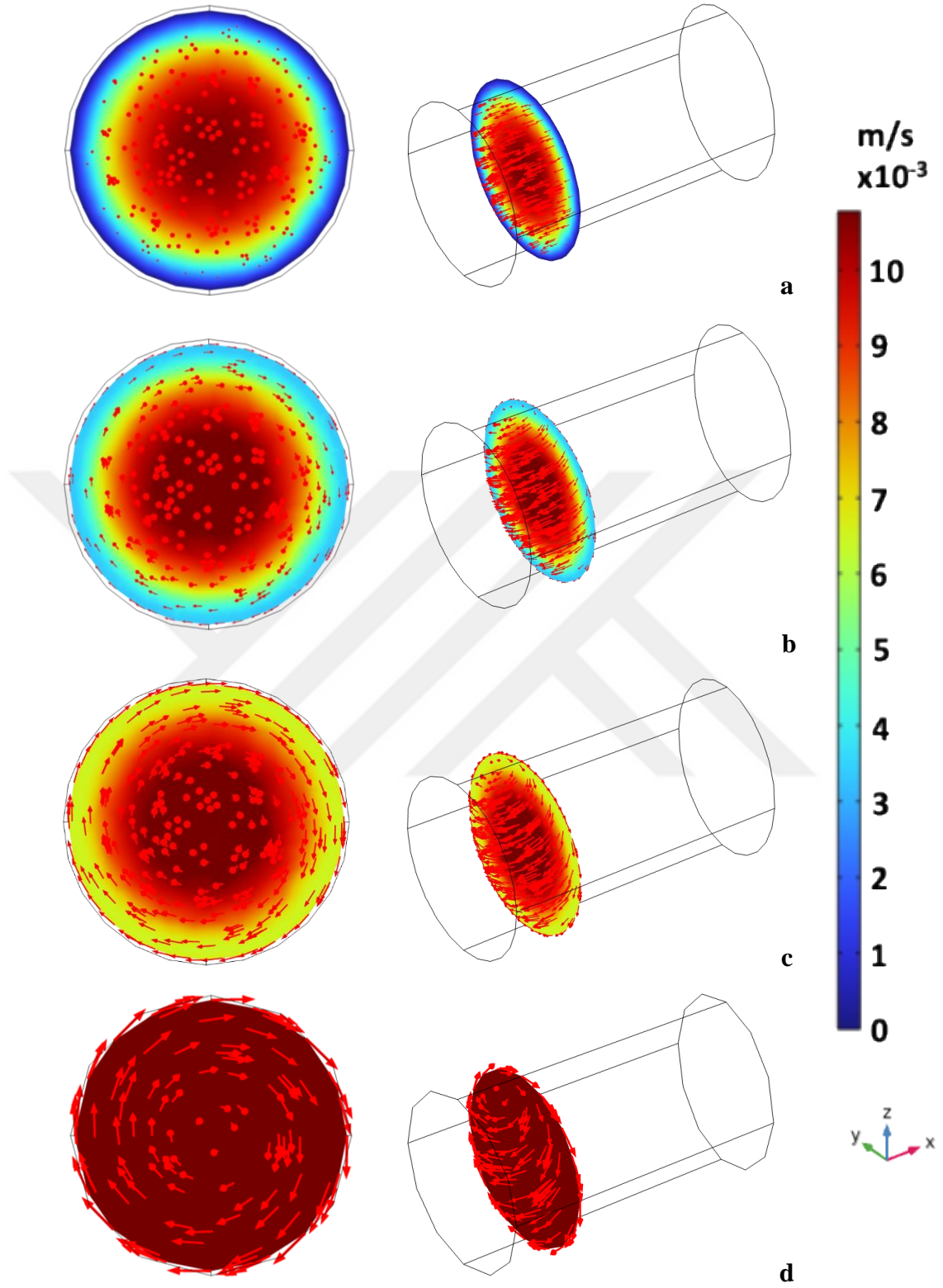
Her iki akış hızında (0,6843 cm/s ve 0,9443 cm/s) 0 rpm için zamana bağlı model çözümlenmeleri yapılmıştır. Yapılan çözümlenmeler sonucunda her iki akış hızında da prosesin başlamasından yaklaşık 300 s sonra sistemin dengeye geldiği görülmektedir (Şekil 4.20).



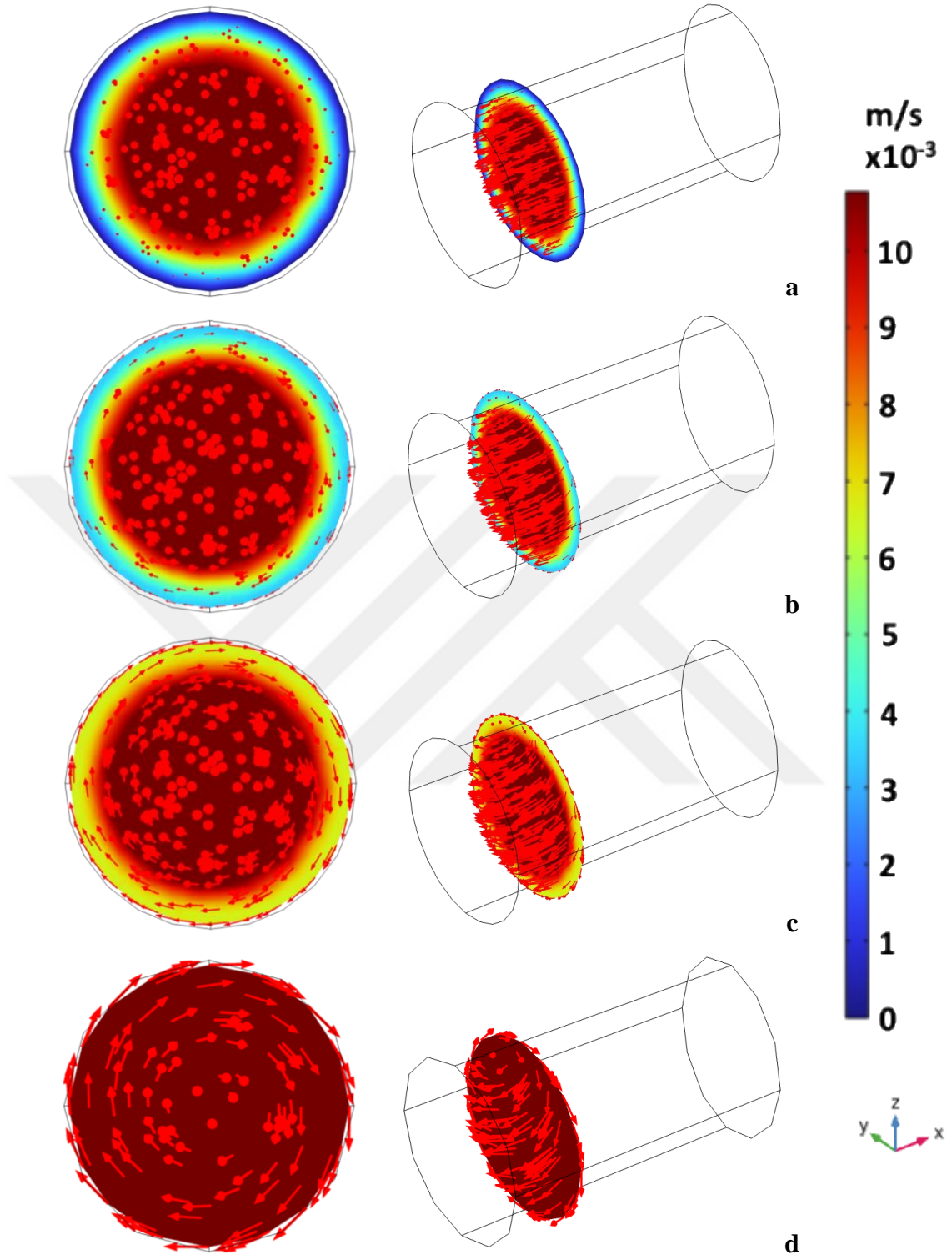
Şekil 4.20 Dönme etkisi olmadan 0,6843 ve 0,9443 cm/s giriş hızlarında elde edilen ürün sıcaklık değişiminin proses süresince değişimi



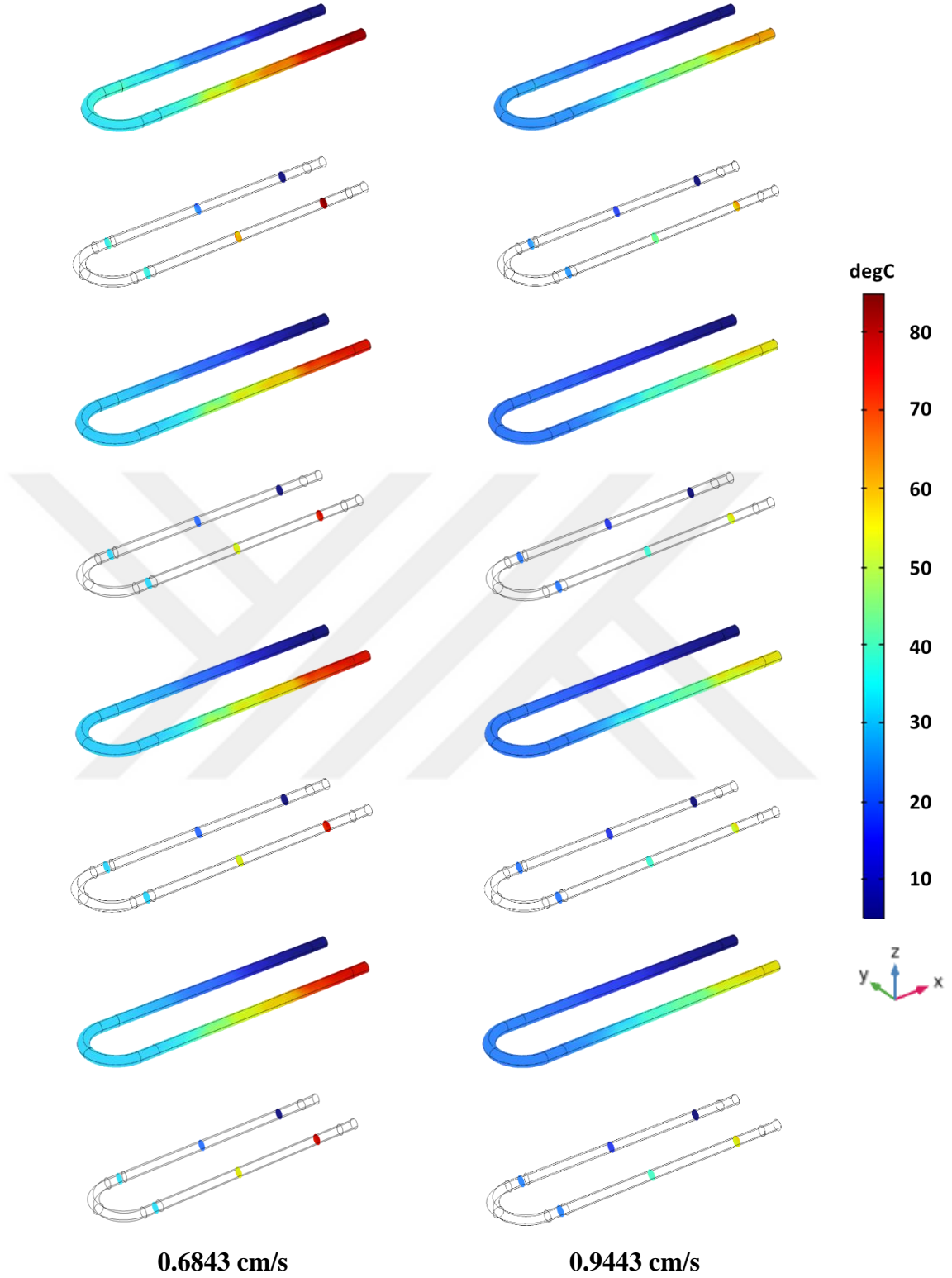
Şekil 4.21 Endüstriyel sistem 2 içerisinde şekil 4.22 ve 4.23 için akış profilinin alındığı kesit



Şekil 4.22 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,6843 cm/s hızla meydana gelen akış profili (a 0 rpm, b 2,5 rpm, c 5 rpm ve d 10 rpm)



Şekil 4.23 Endüstriyel sistem 2 içerisinde 0,9443 cm/s hızla meydana gelen akış profili (a 0 rpm, b 2,5 rpm, c 5 rpm ve d 10 rpm)



Şekil 4.24 Endüstriyel sistem 2 içerisinde yatışkın koşullarda elde edilen sıcaklık dağılımı (a 0 rpm, b 2,5 rpm, c 5 rpm ve d 10 rpm)

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında dondurma karışımının pastörizasyonu amacıyla laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistem kullanılarak matematiksel modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş; geliştirilen modeller deneysel sıcaklık değişim verileri kullanılarak doğrulanmış ve doğrulanan model kullanılarak endüstriyel skalada sürekli akış mikrodalga sistem tasarım çalışmaları yapılmıştır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

- Laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde dondurma karışımları ısı işleme tabi tutulmuş, ürün sıcaklık değişimleri Comsol çoklu fizik programı kullanılarak belirlenmiş ve model sonuçları dondurma karışımı ile yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sıcaklık değişim sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulama çalışmalarında iki farklı hacimde gerçekleştirilmiştir. Küçük hacimli bir kap ile yapılan deneyler 190 s, büyük kap ile yapılan deneyler ise 750 s sürmüştür. Deney çalışmalarında 3 farklı noktadan sıcaklık ölçümü alınmış olup proses süreleri 3 noktadan 80 °C'ye ulaşılan süre olarak belirlenmiştir.
- Mikrodalga ısıtmanın etkinliğini değerlendirmek amacıyla *Listeria monocytogenes* inokülasyonu yapılmış dondurma karışım örnekleri büyük hacimli deney koşullarında 200, 400, 600 ve 750 s proses edilmiş ve mikrobiyal inaktivasyon belirlenmiştir. 200 ve 400 s'lik prosesler sonrası *Listeria*'nın inaktivasyonu için gereken sıcaklıklara ulaşılamamıştır. 600 s'lik proses sonrası hacimsel olarak 76,11 °C'ye ulaşılmış olup 2,70 log azalma sağlanmıştır. Tam inaktivasyon ise 750 s'lik proses sonucunda ürün sıcaklığının 95°C'nin üzerine çıkmasıyla elde edilmiştir.
- Deneysel verilerde doğrulanan model kullanılarak sürekli akış mikrodalga endüstriyel sistem tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu bağlamda 2 farklı endüstriyel sistem tasarımı yapılmıştır:
  - o Endüstriyel sistem tasarımı için sistem 1'de sistem içerisinde yer alan akış borularının konumu optimizasyon çalışmaları ile belirlenmiştir. Ürün çıkışı için hedef olarak belirlenen 80 °C'yi sağlayacak şekilde akış hızı ve sistem parametreleri belirlenmiştir.

- Endüstriyel sistem tasarımı kapsamında hazırlanan sistem 2 için akış hızı ve diğer sınır koşulları belirlenmiştir. Sistemin giriş kolu rotasyon mekanizmasına sahip olup sıcaklık dağılımının tekdüzeliği üzerine sistem 2’de de dönmenin etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.5’te yer alan yatışkın koşul sıcaklıkları şekil 4.24’te yer alan çıkış yüzeyi sıcaklık ortalamasını ifade etmektedir. Buradan artan akış hızları ile dengeye gelme sıcaklıklarının azaldığı sonucuna varılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında dondurma karışımlarının mikrodalga ile pastörizasyona uygun bir gıda olduğu görülmüş, mikrobiyoloji deneyleri ile bu sonuç desteklenmiştir. Mikrodalga sistemlerin endüstriye entegrasyonu için farklı sistem tasarımları yapılmış olup bu çalışmalar halen geliştirilebilir bir durumdadır.

## KAYNAKLAR

- Abdünnur, V. 2016. İstanbul'da satışa sunulan dondurmaların *Listeria monocytogenes* ve *enterobacteriaceae* varlığı yönünden incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Güvenliği ve Beslenme Ana Bilim Dalı, 70, İstanbul.
- Akar, N. Z., ve Özdemir, S. 2022. Erzurum piyasasında tüketime sunulan mahalli ve endüstriyel dondurmaların bazı mikrobiyolojik ve fizikokimyasal özelliklerinin karşılaştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (38), 352-359. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1068702>
- Altın, O. 2017. Gıda ürünlerinin mikrodalga uygulama ile ısıtılması ve (dondurulmuş ürünlerin) çözdürülmesinde basıncın etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, Ankara.
- Amézquita, A. and Brashears, M. M. 2002. Competitive inhibition of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat meat products by lactic acid bacteria. Journal of Food Protection, 65(2), 316-325.
- Badayman, M. 2018. Aydın ilinde açıkta satışa sunulan sade roma dondurmalarında hijyen ve kimyasal kalitenin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Programı, 73, Aydın.
- Barel, M., Hizlisoy, H., Köşkeroğlu, K., Gürbulak, E. Ç. ve Özkaya, Y. 2023. Hayvansal kökenli gıdalarda *Listeria monocytogenes* prevalansının meta-analizi. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 20(1), 19-29.
- Baysan, U. 2024. Bitkisel sütlerin gıda endüstrisindeki önemi ve mikrobiyal güvenliğinin sağlanması. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 12(1), 116-124.
- Beşir, İ., Kırmızıyaka, E. S., Çaylar, M. ve Koçer, F. 2019. *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. kullanılarak dondurmanın proteince zenginleştirilmesi. Mantar Dergisi, 10(3), 178-185.
- Bilgehan, G., Alan, S., Akgöl, M., İncili, G. K. ve Öksüztepe, G. 2021. Şavak taze beyaz peynirlerde *Listeria monocytogenes* ve salmonella spp. varlığının araştırılması. Fırat Üniversitesi Sağlık Bilimleri Veteriner Dergisi, 35(3), 131-135.
- Biniş, A. B. 2023. Açık ve ambalajlı dondurmalarda aflatoksin M1 varlığının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sivas Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Veterinerlik Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Ana Bilim Dalı, 78, Sivas.
- Bylund, G. and Systems, T. P. P. 2015. Dairy processing handbook. Lund: Tetra Pak Processing Systems AB.
- CDC. 2022. Web Sitesi: <https://www.cdc.gov/listeria/outbreaks/monocytogenes-06-22.html>, Erişim Tarihi: 21.04.2024.

- CDC. 2023. Web Sitesi: <https://www.cdc.gov/listeria/outbreaks/ice-cream-08-23.html>, Erişim Tarihi: 20.04.2024.
- CDC. 2023. Web Sitesi: <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/s0810-listeria-outbreak.html>, Erişim Tarihi: 20.04.2024.
- Cruz, N., Capellas, M., Hernández, M., Trujillo, A. J., Guamis, B. and Ferragut, V. 2007. Ultra high pressure homogenization of soymilk: Microbiological, physicochemical and microstructural characteristics. Food Research International, 40(6), 725–732. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2007.01.00>
- Cubukçu, S. and Aydemir Atasever, M. 2018. Microbial quality of ice cream sold by retail outlets in Erzurum. Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi, 13(1), 54–62. <https://doi.org/10.17094/ataunivbd.290227>
- Dag, D., Singh, R. K. and Kong, F. 2022. Developments in radio frequency pasteurization of food powders. Food Reviews International, 38(6), 1197–1214.
- Erkmen, O. 2010. Gıda kaynaklı tehlikeler ve güvenli gıda üretimi. Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi, 53(3), 220-235.
- Erol, B. 2021. Investigation of microwave processing for pasteurization of vegan milk products. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 60, İzmir.
- Erol, Z. and Taşçı, F. 2021. Overview of *Listeria monocytogenes* as a foodborne pathogen: Traditional review. Türkiye Klinikleri J. Vet. Sci., 12(1), 37-48.
- FDA. 2023. Web Sitesi: <https://www.fda.gov/food/outbreaks-foodborne-illness/outbreak-investigation-listeria-ice-cream-august-2023>, Erişim Tarihi: 22.04.2024.
- FDA. 2023. Web Sitesi: <https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/ice-cream-house-voluntarily-recalling-all-dairy-ice-cream-products-and-non-dairy-parve-frozen>, Erişim Tarihi: 16.07.2024.
- FDA. 2024. Totally Cool, Inc. recalls all ice cream products because of possible health risks. Web Sitesi: <https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/totally-cool-inc-recalls-all-ice-cream-products-because-possible-health-risk#recall-announcement>, Erişim Tarihi: 12.03.2024.
- FDA. 2024. Web Sitesi: <https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/totally-cool-inc-recalls-all-ice-cream-products-because-possible-health-risk>, Erişim Tarihi: 12.07.2024.
- Giray, H. ve Soysal, A. 2007. Türkiye’de gıda güvenliği ve mevzuatı. TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni, 6(6), 485-490.
- Gönen, K. 2021. Gıda ve gıda işletmelerinde *Listeria monocytogenes* ve biyofilmine karşı kullanılan bazı modern teknikler. Akademik Et ve Süt Kurumu Dergisi, (1), 19-26.
- Gönülalan, S. ve Gönülalan, Z. 2010. Kayseri ilinde satışa sunulan dondurmaların *Listeria monocytogenes* varlığı yönünden incelenmesi. Sağlık Bilimleri Dergisi, 19(3), 191-195.

- Günes, E., Uysal, A. and Durak, Y. 2022. Survey on methicillin resistance and panton valentine toxin of staphylococcus aureus strains isolated from raw milk and ice cream: Molecular study by multiplex PCR. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(4), 711–718.
- Güven, M., Karaca, O. B. ve Yaşar, K. 2010. Düşük yağ oranlı Kahramanmaraş tipi dondurma üretiminde farklı emülgatörlerin kullanımının dondurmaların özellikleri üzerine etkileri. Gıda, 35(2), 97-104.
- İşleyici, Ö., Sancak, H. ve Tuncay, R. M. 2016. Van ilinde satışa sunulan ambalajlı ve ambalajsız dondurmaların mikrobiyolojik kalitesi. Van Veterinary Journal, 27(2), 57–67.
- Karacabey, A., Gürsel, A., Ergül, E., Gürsoy, A. ve Erdoğan, N. G. 1989. Dondurma miksini farklı sıcaklıklarda pastörize etmenin miksın viskozitesi, mikrobiyolojik kalitesi ve protein stabilitesi üzerine etkileri. Gıda, 14(5).
- Kiper, F. Z., Erdem, T. K. ve Gezginç, Y. 2022. Dondurma üretiminde kullanılan alternatif stabilizerler. Akademik Gıda, 20(3), 313-320.
- Koç, G. ve Uzman, A. 2015. Gıda güvenliği ve gıda güvenliği: Kavramsal çerçeve, gelişmeler ve Türkiye. Tarım Ekonomisi Dergisi, 21(1 ve 2), 39-48.
- Marra, F., Lyng, J., Romano, V. and McKenna, B. 2007. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model. Journal of Food Engineering, 79(3), 998-1006.
- Pratap-Singh, A. (Editör), Erdoğan, F. (Editör), Wang, S. (Editör), and Ramaswamy, H. (Editör). 2024. Microwave Processing of Foods: Challenges, Advances and Prospects. Zürich: Springer, London/Berlin .
- Sağlam, D. ve Şeker, E. 2016. Gıda kaynaklı bakteriyel patojenler. Kocatepe Vet. J., 9(2): 105-113.
- Sezgin, A. C. 2020. Gıda güvenliği açısından tehlike oluşturan bazı bakteriler ve sağlık üzerinde etkileri. Journal of Global Food Research, 1(1), 1-9.
- Sung, H. J. and Kang, D. H. 2014. Effect of a 915 MHz microwave system on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in salsa. LWT-Food Science and Technology, 59(2), 754–759.
- Şireli, U. T. ve Cengiz, G. 2023. Gıda kaynaklı mikrobiyal hastalıkların 2019 verilerine genel bakış: Geleneksel derleme. Türkiye Klinikleri Journal of Veterinary Sciences, 14(1), 28-38.
- T.C. Resmî Gazete. 2011. Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği. 17/12/2011, 28145.
- Taygun, D. ve Beyhan, Y. 2020. Korona virüs pandemisi: Yeniden önem kazanan gıda kaynaklı hastalıklar, nedenleri ve önleme yolları. Sağlık ve Toplum, 175-181.
- Tutar, E., Köksalan, E. ve Akyol, İ. 2015. Gıdalarda Bulunan Mikrobiyal Patojenlerin Karakterizasyonunda Real Time PCR Teknolojisi. KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 18(4), 26-39.

- Uğuz, M. T. ve Kireçci, E. 2018. Kahramanmaraş piyasasında satışı sunulan Maraş dondurmasında patojen mikroorganizmaların membran filtrasyon yöntemiyle araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(4), 41-46.
- Uyar, R. 2014. Radyo frekans yöntemi ile çözündürme işleminin matematiksel modellenmesi, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 121, Mersin.
- Yazar, G., ve İçier, F. 2013. Radyo frekans ısıtma yöntemi ve gıda işlemede kullanımı. *Akademik Gıda*, 11(2), 80-93.
- Yücel, N., ve Çıtak, S. 2000. Dondurma örneklerinde bazı mikroorganizmaların varlığı üzerine bir araştırma. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 57(3), 165-170.

