ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRODALGA UYGULAMA İLE ISIL İŞLEM SIRASINDA SIVI ÜRÜNLERİN SICAKLIK DEĞIŞİMİ VE SICAKLIĞIN TEKDÜZELİĞİ ÜZERİNE ÜRÜN DÖNME HIZI VE VİSKOZİTESİNİN ETKİSİ

Hüseyin TOPÇAM

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2018

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Hüseyin TOPÇAM tarafından hazırlanan "Mikrodalga uygulama ile ısıl işlem sırasında sıvı ürünlerin sıcaklık değişimi ve sıcaklığın tekdüzeliği üzerine ürün dönme hızı ve viskozitesinin etkisi" adlı tez çalışması 25/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan: Doç. Dr. Halil Mecit ÖZTOP
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Doç. Dr. Özge ŞAKIYAN DEMİRKOL
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

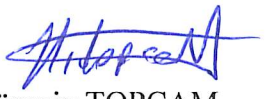
Prof. Dr. Atilla YETİŞEMİYEN

Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

25.12.2018



Hüseyin TOPÇAM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRODALGA UYGULAMA İLE ISIL İŞLEM SIRASINDA SIVI ÜRÜNLERİN SICAKLIK DEĞIŞİMİ VE SICAKLIĞIN TEKDÜZELİĞİ ÜZERİNE ÜRÜN DÖNME HIZI VE VİZKOZİTESİNİN ETKİSİ

Hüseyin TOPÇAM

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Sıvı ürünlerin endüstriyel olarak ısıl işleminde genellikle konveksiyon ve kondüksiyon ile ısı transferine dayalı geleneksel sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerle yapılan ısıl işlemlerde sterilizasyon ya da pastörizasyon değerine ulaşılması için gerekli proses süresince ürün içerisinde fazla işlem görmüş bölgeler oluşmaktadır. Bunun engellenmesi için endüstriyel üretimde mikrodalga kullanımına yönelim vardır. Ancak, mikrodalga sistemlerde, proses süresinde kısalma ve hacimsel ısınma gibi avantajlar olsa da ürün içerisinde meydana gelen tekdüze olmayan elektromanyetik alan dağılımı sebebiyle tekdüze olmayan bir sıcaklık dağılımı ortaya çıkmaktadır. Bunun engellenmesi için bu çalışmada, kesikli-sistem mikrodalgada elektromanyetik alan ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi için bir matematik model geliştirilmiş, oluşturulan model iki farklı visikoziteye sahip olan su ve % 0,5 CMC çözeltisi için deneysel olarak doğrulanmış ve sonrasında model endüstriyel sürekli-akış mikrodalga sistem tasarımında kullanılmıştır. Tasarlanan sistemde ürün olarak tüm-sıvı yumurta kullanılmış ve ürüne verilen yatay dönme hareketi sayesinde ürün içerisindeki sıcaklık dağılımının tekdüze hale getirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda 4000 W mikrodalga gücünde çalışan ve ürün akış hızı 0,5 m/s olan sistemde dönme hızının ürün içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisinin olumlu ve etkili olduğu belirlenmiştir. Sonrasında bu sistem geometrisi, mikrodalga enerjisinin daha verimli kullanılabilmesi için optimize edilmiş ve optimize edilen sistemde de ürün çıkış sıcaklık profilinin farklı dönme hızlarında daha tekdüze olabilmesi için sistem gücü ve sisteme ürün giriş hızı optimize edilerek endüstriye ilham vermesi ve üniversite-sanayi iş birliğini artırması umut edilen bir sistem tasarlanmıştır ve 8 rpm dönme frekansında çalışan bu sistemde, sistem çıkışında 0,6°C sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Aralık 2018, 120 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga pastörizasyon, sıvı ürün, yatay dönme, viskozitenin etkisi

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECTS OF ROTATION RATE AND VISCOSITY ON TEMPERATURE INCREASE AND UNIFORMITY DURING MICROWAVE THERMAL PROCESSING OF LIQUIDS

Hüseyin TOPÇAM

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

For thermal processing of liquid products, conventional methods, based on conductive and convective heat transfer, have been used. With these systems, it is common to face over-processing while trying to obtain the required lethality values. For this reason, use of innovative systems like continuous microwave systems are getting popular for industrial processes. Even though microwave systems have advantages like shorter process time and volumetric heating, it has also disadvantages like formation of non-uniform temperature distribution inside product due to the non-uniform electromagnetic field. In this study, a lab-scale microwave system was used to develop a mathematical model, and this model was experimentally validated using 2 liquids with different viscosities (water and 0.5 % CMC solution). After experimental validation, this model was used to design a continuous microwave system where liquid egg was the processed product. In this system, with the applied rotation, temperature distribution was aimed to be uniform. The effect of rotation rate on temperature uniformity in this system with 4000 W microwave power and 0.05 m/s inlet velocity was found to improve the uniformity. Then, geometry of this system was optimized for maximum energy absorption and used for optimization of microwave power and inlet velocity with the objective of achieving temperature uniformity at the exit of the system. As a result of the optimization studies, the 8 rpm rotation rate was determined to reduce the temperature difference at the exit of the system below 0.6 °C. The results of this study are planned to share with the stakeholders to develop further academy-industry partnered projects.

December 2018, 120 pages

Key Words: Microwave pasteurization, liquid products, horizontal rotation, effect of viscosity

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca gerek tez konum gerekse çalıştığım bütün konularda destek olan, sadece bu günüm için değil kendimi geliştirerek de kendime ve geleceğime yatırım yapmam için yol gösteren, yola adım attığımda ise yoluma ışık tutan çok değerli akıl hocam ve danışmanım Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Akademik ve kişisel tecrübelerini paylaşarak geleceğim için çizdiğim yolumda doğruları ve yanlışları görmemde destek olan Dr. Öğretim Üyesi Rahmi UYAR'a (Siirt Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Çalışmalarım sırasında, iyi ve kötü her durumda yanımda olan sayın çalışma arkadaşlarım Ozan ALTIN, Ozan KARATAŞ, Büşra EROL, Ezgi SON'a,

Attığım her adımda doğru ya da yanlış ayırt etmeden maddi ya da manevi her türlü desteklerini her zaman hissettiğim sevgili annem İlvane TOPÇAM ve babam Erol TOPÇAM'a,

Hayatta ne kadar şanslı olduğum konusunda şüpheye düştüğümde gözlerimin asla uzaklara bakmasına izin vermeyeceklerini ve daima yanımda olduklarını hissettireceklerini bildiğim kız kardeşlerim Gamze TUNA ve Ece TOPÇAM'a,

Adlarını buraya sığdıramadığım ama yüreğimde her zaman yerleri olacağını bildiğim, varlıklarını hep hissettiğim ve sonsuza kadar da hissetmek istediğim sevgili dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu araştırma 16H0443002 Hızlı Destek Projesi kapsamında Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir.

Hüseyin TOPÇAM

Ankara, Aralık 2018

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **ivx**
1. GİRİŞ **1**
2. KAYNAK ÖZETLERİ **4**
2.1 Geleneksel Sıvı Gıda Pastörizasyon Yöntemleri **4**
2.2 Mikrodalga Sistemlerde Sıvı Ürünlerin Isıl İşlemi **8**
2.2.1 Mikrodalga uygulama prensibi **8**
2.2.2 Sıvı ürünlerin mikrodalga sistemlerde prosesi **14**
3. MATERYAL YÖNTEM **21**
3.1 Materyal **21**
3.1.1 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem **21**
3.1.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan sıvı örnekler **23**
3.2 Yöntem **27**
3.2.1 Deneysel çalışmalar **27**
3.2.2 Modelleme çalışmaları **30**
4. BULGULAR VE TARTIŞMA **49**
4.1 Laboratuvar Ölçekli Mikrodalga Sistemde Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları **50**
4.1.1 Deneysel verilerle matematiksel model doğrulama çalışmaları **50**
4.1.2 Dönme hızının sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi **54**
4.2 Endüstriyel Ölçekte Sürekli-Akış Mikrodalga Sistem **78**
4.2.1 Endüstriyel sistemde dönme hızının sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi **81**
4.2.2 Optimum proses için endüstriyel sistem geometri optimizasyonu **88**
4.2.3 Optimize edilmiş geometride sıcaklık tekdüzeliğinin sağlanabilmesi için mikrodalga uygulama gücü ve ürün akış hızının optimize edilmesi **91**

4.2.4 Optimize edilmiş sistemde farklı dönme hızlarının sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi 94
4.2.5 Endüstriyel ölçekli sistemde; sıcaklık dağılımına, akışın gerçekleştiği boru sayısı ve konumunun etkisi 97
4.2.6 Endüstriyel skalada alternatif sistem tasarımı 105
5. SONUÇ 109
KAYNAKLAR 112
ÖZGEÇMİŞ 119

SİMGELER

c	Işık hızı (2999792458 m/s)
C	Konsantrasyon (g/L)
cm	Santimetre
c_p	Özgül ısısı (J/kg.K)
D	d-değeri (dk.)
Dk.	Dakika
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
F	Letalite
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi (m_2/s)
GHz	Giga Hertz
H	Isı transferi katsayısı (W/m²-°C)
K	Kelvin
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m-°C)
L	Uzunluk(cm)
m	Kütle (kg)
M	Akışkan kıvam katsayısı
MHz	Mega Hertz
MW	Mega Watt
N	Akış davranışı indeksi
n	Normal
P_0	Mikrodalga gücü (W)
Q	Isı (J)
r	Yarıçap (cm)
r_a	a yarı büyük ekseni
Ra	Rayleigh sayısı
Ra_r	Rotasyonel Rayleigh sayısı
r_b	b yarı küçük ekseni
rpm	Devir/dakika

s	Saniye
sa	Saat
S_{max}	Maksimum ağ boyutu
T	Sıcaklık(°C)
Ta	Taylor sayısı
T_f	Son sıcaklık (°C)
T_i	Başlangıç sıcaklığı (°C)
T_m	Maksimum sıcaklık (°C)
T_o	Çevre sıcaklığı (°C)
T_{ref}	Referans sıcaklık(K)
u_0	x-yönünde başlangıç hızı (m/s)
v_0	y-yönünde başlangıç hızı (m/s)
v	Hız (m/s)
W	Watt
w_0	z- yönünde başlangıç hızı (m/s)
X_1	1. Elementin simetri merkezinden uzaklığı (cm)
X_2	2. Elementi simetri merkezinden uzaklığı (cm)
z	Z-değeri (°C)
η	Görünür viskozite (Pa.s)
$`\rho$	Hacimsel yük yoğunluğu (C/m^3)
$\vec{B}$	Manyetik akı şiddeti (Wb/m^2)
$\vec{D}$	Elektrik akı yoğunluğu (C/m^2)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
$\bar{T}$	Ortalama sıcaklık (°C)
v_0	Başlangıç hızı büyüklüğü (m/s)
v_r	r-yönünde hız (m/s)
v_z	z-yönünde hız (m/s)
v_θ	θ-yönünde hız (m/s)
ε_0	Boşluğun geçirgenlik değeri (8.854×10^{-12} F/m)
ε_r	Permittivite

μ'	Bağıl geçirgenlik
μ_0	Boşluktaki manyetik geçirgenlik
μ_r	Manyetik geçirgenlik
ΔT	Sıcaklık farkı (°C)
°C	Derece Celcius
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
α	Isıl yayınma katsayısı (m^2/s)
β	Isıl genleşme katsayısı (1/K)
ε'	Dielektrik Sabiti
ε"	Dielektrik Kayıp faktörü
ζ	Dönme frekansı (rpm)
f	Frekans (Hz)
j	$\sqrt{-1}$
γ	En düşük kayma hızı
λ	Dalga boyu
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)

Kısaltmalar

MW	Mikrodalga
CMC	Karboksimetilselüloz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Farklı dönme hızının su dolu silindirik bir boru içerisindeki sıcaklık ve hız profili değişimlerine etkisi 5
Şekil 2.2 Muz püresinde elde edilen sıcaklık profilleri 6
Şekil 2.3 Farklı boru çeşitlerinde ısı değiştiricide elde edilen sıcaklık dağılımları 7
Şekil 2.4 Elektromanyetik tayf 9
Şekil 2.5 Birbirine dik konumda oluşan elektrik ve manyetik alan 9
Şekil 2.6 Mikrodalga enerjisinin ısıl enerjiye dönüşüm mekanizması 10
Şekil 2.7 Magnetronun genel yapısı 12
Şekil 2.8 Dikdörtgen kesit alanlı dalga kılavuzu 13
Şekil 2.9 Yağsız sütün 2 L/dk. akış hızında proses edilmesi sonucu boru çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı 16
Şekil 2.10 Bezelye pürelerinin sürekli-akış mikrodalga sisteminde proses edilmesi sonucu elde edilen sıcaklık verileri 16
Şekil 2.11 Farklı ürünlerde 1 L/dk. akış hızında helikal boru çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı 17
Şekil 2.12 1 L/dk. akış hızında helikal boru çıkışında farklı ürünlerin prosesi sırasında elde edilen sıcaklık dağılımı 17
Şekil 2.13 Farklı sıvılara ait deneysel sıcaklık dağılımları 19
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalar için kullanılan LG MS2022D model ev tipi mikrodalga fırın 22
Şekil 3.2 Mikrodalga sisteme ait dur-kalk döngüleri 29
Şekil 3.3 Sıcaklık verilerinin karşılaştırıldığı noktanın sistemin 3 boyutlu modeli içerisindeki konumu 30
Şekil 3.4 LG marka mikrodalga fırının matematiksel modelleme için ele alınan geometrik yapısı 32
Şekil 3.5 Endüstriyel ölçekte tasarımı yapılan sürekli akış mikrodalga sistemin hesaplamalı geometrisi 33
Şekil 3.6 Endüstriyel skalada alternatif sistem sürekli akış mikrodalga sistem hesaplamalı geometrisi 34
Şekil 3.7 Simülasyonlarda matematiksel çözüm için uygulanan ait ağ yapısı 38
Şekil 3.8 Ön simülasyon çalışmalarında 20 rpm dönme hızında oluşan Reynold sayısı dağılımı 39
Şekil 3.9 COMSOL çoklu fizik programı içerisinde gömülü olarak bulunan silindirik koordinat sistemi 43
Şekil 3.10 Endüstriyel skalada üretim kapasitesini artırmak amacıyla tasarlanan çoklu-borulu sistemler 48

Şekil 4.1 Su kullanılarak deneysel olarak elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması 52

Şekil 4.2 % 0,5 CMC kullanıldığında deneysel olarak elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması 53

Şekil 4.3 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde sıcaklık profillerinin analiz edildiği farklı kesitler 54

Şekil 4.4 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak suyun kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün toplam hacminde ve üst kesitinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark 55

Şekil 4.5 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak suyun kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün orta ve dikey kesitlerinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark 56

Şekil 4.6 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak % 0,5 CMC çözeltisi kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün toplam hacim ve üst kesitinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark 58

Şekil 4.7 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak % 0,5 CMC çözeltisi kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün orta ve dikey kesitlerinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark 59

Şekil 4.8 Suya uygulanan farklı dönme hızlarında ürün ve sistem içerisinde elde edilen elektromanyetik alan 60

Şekil 4.9 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem içerisinde elde edilen elektrik alan dağılımı 61

Şekil 4.10 Dönme uygulaması olmadığı durumda su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 62

Şekil 4.11 Dönme uygulaması olmadığı durumda % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 63

Şekil 4.12 Farklı kesitlerde, 2,5 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 64

Şekil 4.13 Farklı kesitlerde, 2,5 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 65

Şekil 4.14 Farklı kesitlerde, 5 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 66

Şekil 4.15 Farklı kesitlerde, 5 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 67

Şekil 4.16 Farklı kesitlerde 10 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 68

Şekil 4.17 Farklı kesitlerde 10 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 69

Şekil 4.18 Farklı kesitlerde 20 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 70

Şekil 4.19 Farklı kesitlerde 20 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri 71
Şekil 4.20 Farklı dönme hızlarında su içerisinde 120 s'de elde edilen hız profili 73
Şekil 4.21 Farklı dönme hızlarında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen hız profili 74
Şekil 4.22 Su ve % 0,5 CMC çözeltisinde dikey kesitte 0 ve 20 rpm dönme hızlarında oluşan sıcaklık dağılımı 76
Şekil 4.23 Proses sürecinde su içerisinde meydana gelen Taylor sayısı değişimi 76
Şekil 4.24 Proses sürecinde % 0,5 CMC içerisinde meydana gelen Taylor sayısı değişimi 77
Şekil 4.25 Endüstriyel sistem mikrodalga tasarımı sırasında kavite içerisinde elde edilen elektrik alan dağılımı 79
Şekil 4.26 Endüstriyel sistem içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımı 80
Şekil 4.27 Endüstriyel sistem içerisinde elde edilen hız profili 80
Şekil 4.28 Endüstriyel sistem çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı 81
Şekil 4.29 Endüstriyel sistemde ürün içerisinde elde edilen elektrik alan 82
Şekil 4.30 Farklı dönüş hızlarında ürün hacmi içerisinde elde edilen sıcaklık farkları 83
Şekil 4.31 Farklı dönüş hızlarında sistemden çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık farkları 83
Şekil 4.32 0, 2,5 ve 4 rpm dönme hızlarında boru çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve hız profili değişimi 84
Şekil 4.33 8, 12 ve 20 rpm dönme hızlarında boru çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve hız profili değişimi 85
Şekil 4.34 0, 2,5 ve 4 rpm dönme hızlarında sistem içerisinde oluşan hız profili değişimi 86
Şekil 4.35 8, 12 ve 20 rpm dönme hızlarında sistem içerisinde oluşan hız profili değişimi 87
Şekil 4.36 Optimizasyon çalışmaları sırasında kullanılan sistem geometrisi 89
Şekil 4.37 Optimizasyon çalışmaları sırasında elde edilen elektrik alan 89
Şekil 4.38 Optimizasyon çalışmaları sırasında elde edilen sıcaklık dağılımı 90
Şekil 4.39 Mikrodalga gücü ve ürün akış hızı optimize edilmiş 8 rpm dönme hızı uygulanan sistemde elde edilen hacimsel sıcaklık dağılımı 91
Şekil 4.40 Mikrodalga gücü ve ürün akış hızı optimize edilmiş ve 8 rpm dönme hızı uygulanan sistemde ürün çıkış noktasında elde edilen sıcaklık dağılımı 92
Şekil 4.41 Belirlenen optimum koşullar ve 8 rpm dönme hızında elde edilen sıcaklık değişimi ve buna bağlı olarak hesaplanan letalite değeri değişimi ... 93

Şekil 4.42 Mikrodalga sistem sonrası tutma tüpü kullanıldığı durumda üründe meydana gelen sıcaklık ve letalite değeri değişimi 94
Şekil 4.43 Farklı dönme hızlarında elde edilen hacimsel sıcaklık dağılımları 95
Şekil 4.44 Farklı dönme hızlarında elde edilen boru çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımları..... 96
Şekil 4.45 Tek borulu endüstriyel sistemde boru lokasyonunun elektromanyetik alan dağılımı üzerine etkisi 98
Şekil 4.46 Tek borulu endüstriyel sistemde boru lokasyonunun hacimsel sıcaklık dağılımı üzerine etkisi 99
Şekil 4.47 Tek borulu endüstriyel sistemde boru lokasyonunun sistem çıkışı sıcaklık dağılımı üzerine etkisi 99
Şekil 4.48 3 ve 4 borulu sistemlerde elektromanyetik alan dağılımı 100
Şekil 4.49 5 borulu iki farklı sistemde elektrik alan dağılımı 101
Şekil 4.50 Boru sayısı ve lokasyonunun sıcaklık dağılımı üzerine etkisi 102
Şekil 4.51 Gücü artırılan 3 borulu sistemde elde edilen elektrik alan dağılımı 102
Şekil 4.52 Gücü artırılan 3 borulu endüstriyel sistemde elde edilen sıcaklık dağılımı..... 103
Şekil 4.53 Gücü artırılan 3 borulu endüstriyel sistemde elde edilen hız profili 104
Şekil 4.54 Tasarlanan alternatif sistem içerisinde 2500 W değerinde elde elektrik alan ve sıcaklık dağlımı 106
Şekil 4.55 Borular arası uzaklığın optimize edildiği sistemde elde edilen elektrik alan ve sıcaklık dağılımı 107
Şekil 4.56 Sistem gücü ve giriş hızı optimize edilmiş sistemde elde edilen elektrik alan ve sıcaklık dağılımı 108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Sıcaklığa bağlı olarak suya ve % 0,5 CMC ye ait dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü. 25

Çizelge 3.2 Sıcaklığa bağlı olarak % 0,5 CMC çözeltisine ait termofiziksel özellikler 25

Çizelge 3.3 Tüm-sıvı yumurtaya ait sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü 27

Çizelge 3.4 Simülasyon çalışmaları yapılan 3 sistemde kullanılan akışkan örnekler 30

Çizelge 3.5 Matematiksel model çalışmalarında farklı sistemlerde kullanılan ağ yapısı fiziksel özellikleri 35

Çizelge 3.6 Dönme hızının Reynold sayısına etkisi 39

Çizelge 3.7 Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan başlangıç koşulları 42

Çizelge 3.8 Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan sınır koşulları 42

Çizelge 3.9 Endüstriyel sistemde yapılan geometri optimizasyonunda kullanılan hedef fonksiyon ve parametreler 45

Çizelge 3.10 Endüstriyel sistemde yapılan güç ve akış hızının optimizasyonunun özeti 46

Çizelge 3.11 Alternatif endüstriyel sistem için geometri optimizasyonunun özeti 47

Çizelge 3.12 Alternatif endüstriyel sistemde güç ve akış hızının optimizasyonunun özeti 47

Çizelge 4.1 Sistem dönme hızına bağlı olarak Froude sayısı değişimi 75

1. GİRİŞ

Sıvı gıda ürünlerinde ısıl işlem uygulaması geleneksel olarak konveksiyon ve kondüksiyon ile ısı transferi prensibine dayanmakta olup proses sırasında üründe tekdüze olmayan bir sıcaklık dağılımı oluşmaktadır. Bu durum özellikle viskozitesi yüksek ürünlerde önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu ürünlerde, geleneksel sistemlerde özellikle viskoziteye (ve düşük Reynolds sayısına) bağlı olarak oluşan laminer akış profilinden dolayı uygulama süresi ürün merkezine göre (yüksek hız oluşan bölge) yapılmakta ve bu durumda ürünün özellikle ısı transfer yüzeyine yakın bölgeleri daha fazla sürede ısıl işleme maruz kalmaktadır. Bu sebeple de ürün kalitesi ve proses verimliliği düşmektedir. Endüstriyel uygulamada bu tip geleneksel ısıl işlemlere alternatif olarak indüksiyon prensibine dayalı sistemler veya hacimsel ısınmayı mümkün kılan mikrodalga ve radyo frekans sistemlerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır.

Mikrodalga sistemlerde üründe sıcaklık artışı temel olarak mikrodalganın polar moleküllerle ve iyonlarla interaksiyona girerek ürün matriksi içerisinde moleküler sürtünmeye ve iyon göçüne bağlı olarak oluşan kinetik enerji artışına bağlıdır (Nasrollahzadeh vd. 2017). Mikrodalga sistemin geleneksel sistemlere göre önemli avantajları arasında hacimsel ısınma sağlaması, ısıl işlem uygulaması - sıcaklık artışı için ara ortama ihtiyaç duyulmaması, proses süresinin kısa olması verilebilir (Zhu vd. 2007, Wei 2012, Yousefi vd. 2013). Bu avantajlarının yanında ürünün özellikleri, geometrik yapısı, ürünün mikrodalga kavite içerisindeki pozisyonu ve mikrodalga kavite geometrisi ürün içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı ve bu dağılımın değişimine sebep olmakta; bu da ısıl işlem uygulanan üründe tekdüze olmayan sıcaklık dağılımını ortaya çıkarabilmektedir (Zhou vd. 1995, Basak ve Meenakshi, 2006, Zhang vd. 2013). Bu durum ise kontrol edilemeyen sıcaklık artışına ve tekdüze olmayan sıcaklık dağılımına bağlı olarak kalite ve güvenlik açısından problemlere neden olabilmektedir (Stratakos 2016). Bu nedenle mikrodalga uygulama sırasında ürün içerisinde sıcaklık dağılımını tekdüze yapabilmek amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları mikrodalga sistem içerisinde dalga kılavuzu yakınına dağıtıcı bir aparat eklemek (Plaza-Gonzalez vd. 2004), dalga kılavuzuna

dönme hareketi vermek (Pedreño-Molina vd. 2007) veya klasik mikrodalga fırınlarda kullanılan bir yöntem olan bir ara platform kullanımıyla ürünün dönmesini sağlamaktır (Liu vd. 2013). Bu kapsamda, ürünlerde oluşan tekdüze olmayan sıcaklık dağılımını engellemenin prensibi sistem içi yoğun elektrik alan oluşan bölgelere, ürünün proses sürecinde değişik bölgelerinin daha kısa sürelerde maruz kalmasını sağlayarak ürün içi belli bir bölgenin fazla ısınmasının engellenmesidir.

Sıvı ürünlerde ise, ürünün reolojik özelliklerinden dolayı, dönme hareketinin direkt olarak ürüne aktarılması ve bu bağlamda bir karışma işleminin de sağlanarak ürün sıcaklık değişimlerinin tekdüze olmasının sağlanması, katı ürünlere göre daha uygulanabilir bir proses olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvı ürüne uygulanan dönme hareketi ile ürünün farklı bölgelerinin yoğun elektrik alan oluşan bölgelere daha kısa süre maruz kalması sağlanmış böylece üründe gerçekleştirilen karışma ile sıcaklığın daha tekdüze olarak dağılması gerçekleştirilmiştir.

Sürekli mikrodalga sistemlerde, proses edilecek sıvı ürünler için tercih edilen silindirik geometriye bağlı olarak, elektrik alan sistem merkezinde yoğunlaşmakta ve buna bağlı olarak da akış merkezinde sıcaklık değerleri daha yüksek olmaktadır. Fakat laminer akışa özgü parabolik akış profili nedeniyle merkezde hız maksimum olduğundan akış merkezindeki ürün temelinde proses süresi hesaplanmakta ve merkez dışında olan ürün daha fazla ısıl işleme tabi tutulmaktadır. Bu durum, çift borulu ısı değiştiricilerde meydana gelen ve boru yüzeyindeki ürünün fazla proses edilmesi ile ortaya çıkan, kalite sorununun mikrodalga uygulama ile çözülmesine bir temel teşkil etmektedir. Bu nedenle, akışın gerçekleştiği silindirik boruya verilecek dönme hareketine bağlı olarak da, sıcaklığın boru içerisinde daha homojen dağıtılması ve buna bağlı olarak ürün kalitesinin arttırılması bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuştur.

Bu kapsamda bu çalışmanın amacı bir sürekli-akış sisteminde mikrodalga enerjiye maruz bırakılan sıvı ürün sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi, dönme uygulamasının ürün sıcaklık değişimine etkisinin gösterilmesi ve bu sistemde ürüne uygulanan dönme hareketi ve mikrodalga sistem geometrisi kapsamında ürün sıcaklığının tekdüze elde edilebilmesi amacıyla optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla

çalışma dahilinde COMSOL çoklu fizik yazılımı kullanılarak sürekli bir mikrodalga sistemi tasarlanmış; bu sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alanın ve ürün akış profili, sistem geometrisine bağlı olarak da ürün sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Deneysel doğrulama amacıyla, öncelikle laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde su (düşük viskoziteli Newtonumsu akış türüne örnek olarak) ve % 0,5 CMC (karboksimetilselüloz - yüksek viskoziteli Newtonumsu olmayan akış türüne örnek olarak) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak mikrodalga sistem geometrisi, uygulama gücü ve ürün akış hızı değişkenleri kullanılarak ürün içi sıcak değişimlerinin homojen olması temelinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmalarındeki temel amaç endüstriyel bir proses için gerekli proses tasarım parametrelerini ortaya koymaktır.

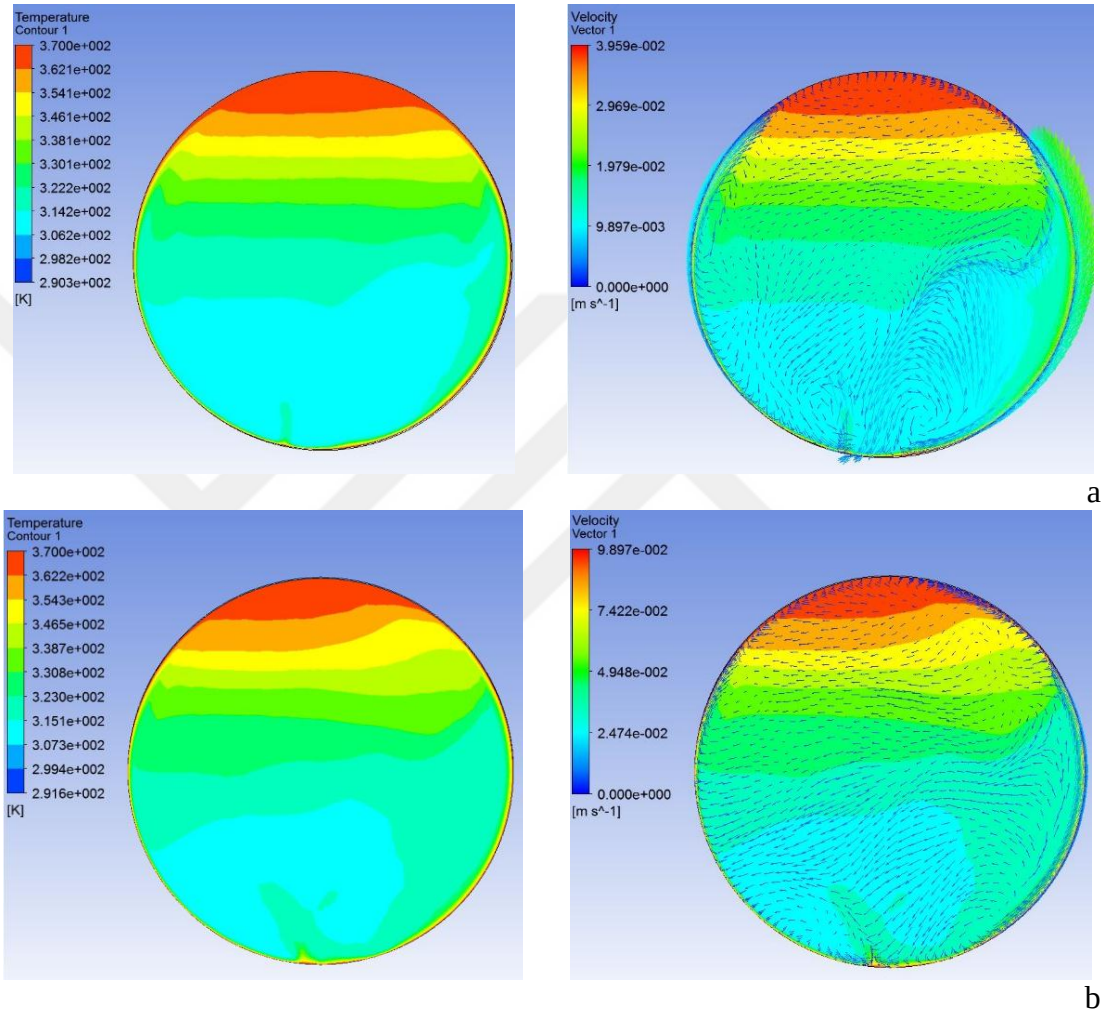
İlk aşamada, su ve % 0,5 CMC kullanılarak laboratuvar ölçekli bir sistemde gerçekleştirilen model geliştirme ve model doğrulama çalışmalarının devamında, endüstriyel ölçekli sistemler için tasarım - optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda ise ürün olarak son yıllarda tüketimi giderek artan ve halen konvansiyonel sistemlerde üretimi yapılan sıvı yumurta örneği kullanılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Geleneksel Sıvı Gıda Pastörizasyon Yöntemleri

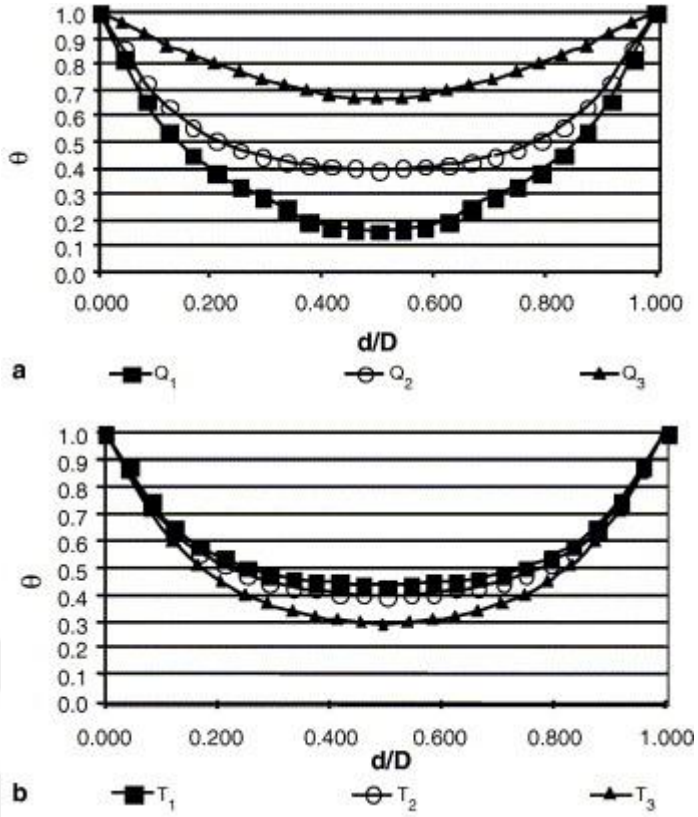
Geleneksel yöntemler olarak adlandırılan ısıl işlem yöntemleri hermetik kutularda bulunan ürünlere uygulanan bir proses olan konserve teknolojisi ya da gıdalara paketlemeden önce direkt uygulanan aseptik proses olarak iki şekilde uygulanmaktadır (Berk 2008). Klasik konserveleme teknolojisinde sıvı ürün içerisinde gerçekleşen ısı transferi sadece doğal konveksiyona bağlı olarak gerçekleştiği için, içeride gerçekleşen konveksiyonu artırmak adına shaka (yatay salınımlı), dikey dönme (end-over-end) ve yatay dönme (horizontal rotation) mekanizmalarına sahip retort sistemler kullanılarak ürün içi sıcaklık dağılımında tekdüzeliği artırmak amaçlanmaktadır (Erdoğdu vd. 2018). Dönme hızının yanında ürün viskozitesinin de ürün sıcaklık tekdüzeliğine önemli bir etkisi bulunmaktadır. Dairesel kesitli bir geometrideki dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisi konusunda yapılan bir matematiksel modelleme çalışmasında, viskozitesi yüksek ürünler için 10 rpm dönme hızının sıcaklık artışı açısından optimum olduğu ve bu dönme hızında üründe etkin bir karışma sağlanabildiği; belli bir dönme hızının üzerinde ise ürün viskozitesine bağlı olarak santrifüj ve Coriolis kuvvetlerinde meydana gelen dönme hızı artış etkisinin negatif olduğu (dönme hızı ile elde edilecek sıcaklık artışının yavaşladığı); su gibi düşük viskoziteli ürünlerde ise dönme hızı artışı ile ürün karışım ve sıcaklık artışının paralel olduğu belirtilmiştir (Tutar ve Erdoğdu (2012). Şekil 2.1, 10 ve 25 rpm dönme hızının su dolu silindirik bir boru içerisindeki sıcaklık ve hız profili değişimlerine etkisini göstermektedir. Aseptik proses sistemlerinde kullanılan tübüler boru sistemlerinde akışkan ürünlerde merkezde akış hızının daha yüksek olması ve ürünün dış yüzeyinden ısıtılması nedeniyle proses süresi ürün merkezindeki sıcaklık değişimine göre belirlenmektedir. Yani, ısıtıcı ortamdan soğuk noktaya (merkez noktası) olan yavaş ısıtma, sistemin dış yüzeyine yakın materyalin, ticari steriliteye ulaşılması için gerekli olandan daha uzun bir ısıl işleme maruz kalması ile sonuçlanmaktadır. Isı değiştirici sistemlerin kullanıldığı ve sıvı - akışkan ürünlerin proses edildiği aseptik proseste, özellikle süt ve süt ürünleri gibi sıcaklığa duyarlı gıda ürünlerinde, ısı transferinin gerçekleştiği yüzeylerde tortu oluşumu, gıda endüstrisinin ve gıda proses mühendisliğinin önemli problemlerinden

biridir (Visser ve Jeurnink 1997). Ditchfield vd. (2006)'nin de çalışmasında belirttiği üzere tübüler ısı değiştiricilerde ısı transferinin gerçekleştiği duvar ile ürün merkez noktası arasında sistem çıkışında önemli derecede sıcaklık farkı bulunmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.1 Farklı dönme hızının su dolu silindirik bir boru içerisindeki sıcaklık ve hız profili değişimlerine etkisi (Tutar ve Erdoğdu 2012)

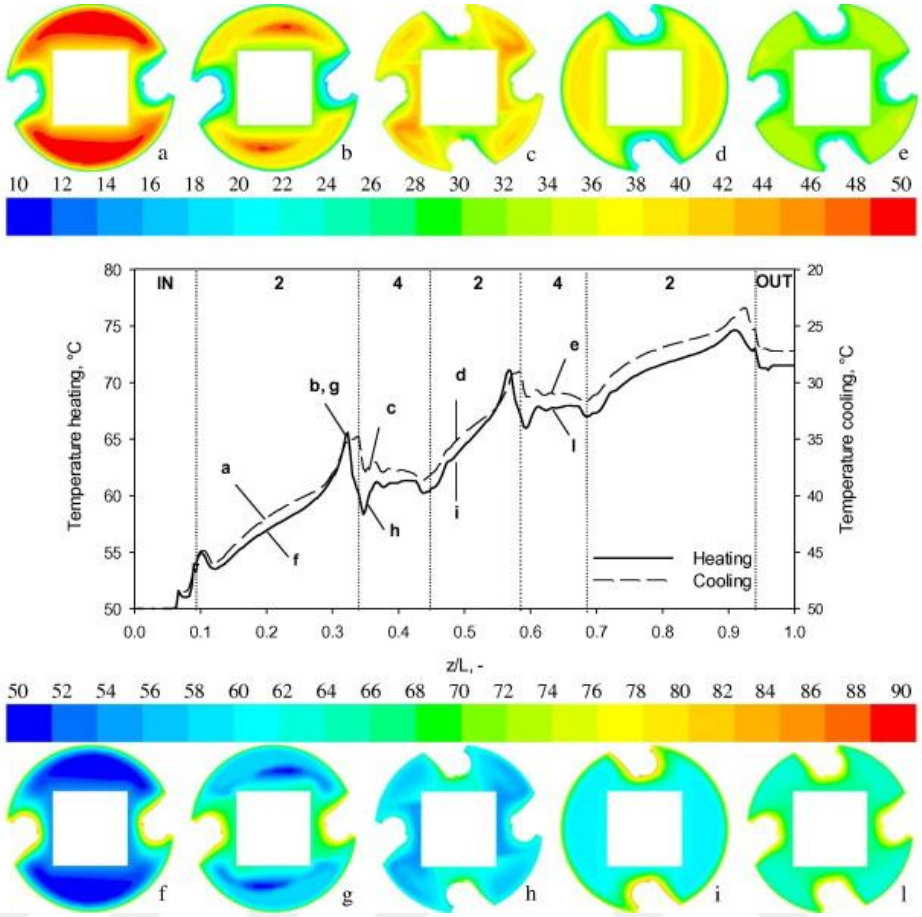
(a.10, b.2,5 rpm)



Şekil 2.2 Muz püresinde elde edilen sıcaklık profilleri (Ditchfield vd. 2006).

(a.121,1°C buhar sıcaklığında 3 farklı akış hızı için sistem çıkışına ait ($Q_1 = 4{,}7 \times 10^{-5}$ $m^3s^{-1,}$ $Q_2 = 3{,}7 \times 10^{-5}$ m^3s^{-1} ve $Q_3 = 2{,}5 \times 10^{-5}$ m^3s^{-1}), b.$3{,}7 \times 10^{-5}$ m^3s^{-1} akış hızında 3 farklı buhar sıcaklığına ait sistem çıkışında (T1 = 132,2 °C, T2 = 121,1 °C ve T3 = 110 °C))

Bu sistemlerde kullanılan borulara ürün sıcaklık tekdüzeliğini arttırabilmek amacıyla dönme hareketi uygulaması literatür ve endüstriyel ölçekte halen üzerinde çalışılan bir konudur. D'addio vd. (2013) borulara yatay dönme hızı vererek kestane püresi içerisinde sıcaklık dağılımını tekdüze hale getirmek amaçlı bir çalışma yapmıştır. Şekil 2.3'te bu çalışmada ısıtma ve soğutma aşamalarında içeride oluşan sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Bu çalışmada ürün içerisinde tekdüzelik sağlanabilse de ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyle ürün arasındaki sıcaklık farkı değiştirilememiştir. Bu sistem bu ürün için etkin olarak çalışsa da sıcaklığa duyarlı ürünlerde, boru çeperi etrafında sıcaklığın etkisiyle, proteinlerin denatürasyonuna bağlı olarak ortaya çıkacak problemler gözlenebilecektir.



Şekil 2.3 Farklı boru çeşitlerinde ısı değiştiricide elde edilen sıcaklık dağılımları (Ürün akış hızı 600 kg/sa. ve dönme hızı 150 rpm) (D'addio vd. 2013)

Üründe kalite kayıplarına sebep olan bu işlemlere alternatif olarak ürünün merkez sıcaklığının istenen sıcaklığa ulaşması için gereken süreyi azaltan yeni işleme teknikleri geliştirmek için çalışmalar yapılmakta olup akışkan ürünlerin prosesinde sürekli mikrodalga sistemlerin kullanımı ve bu konuda yapılan çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır. Temel olarak mikrodalga teknolojisi, pastörizasyon/sterilizasyon prosesleri için otoklav veya aseptik proseste ısı değiştiricilerin kullanımı gibi geleneksel ısıtma teknolojilerinin yerini alma potansiyeline sahip olan bir teknolojidir. Bu sistemlerde ısıl işlem ürünün, elektromanyetik enerjiyi absorblama ve absorbladığı enerjiyi ısıya çevirme yeteneğine dayandığı için aşırı ısıl işlemin elimine edilmesi yönünde önemli bir potansiyele sahiptir. Aşağıda özetlendiği gibi sıvı - akışkan ürünlerin mikrodalga uygulama ile prosesi konusunda literatürde farklı çalışmalar bulunsa da bu kapsamda Stratakos vd. (2016) endüstriyel skalada çalışan sürekli mikrodalga sisteminde domates

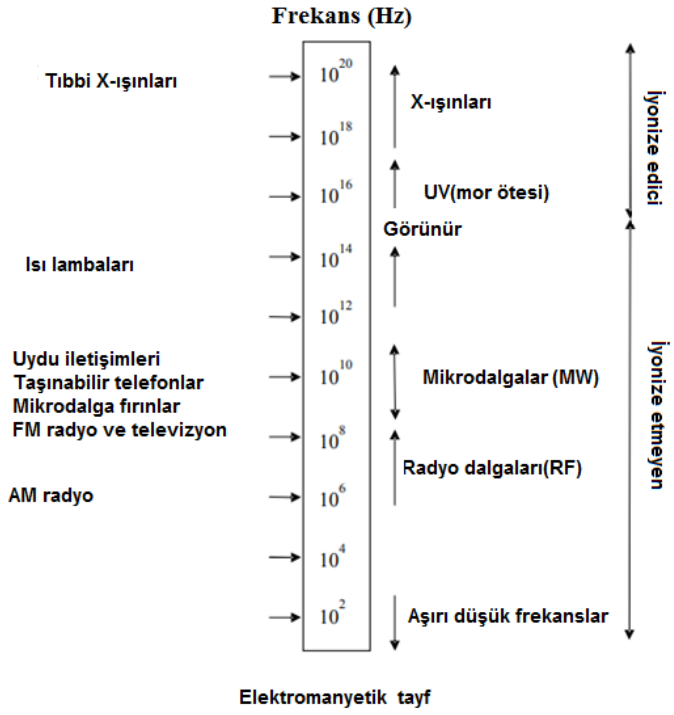
suyunun pastörizasyonunda boruya uygulanan dönme hareketinin etkisini incelemiş ve bu sistemlerin geleneksel yöntemlere bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

2.2 Mikrodalga Sistemlerde Sıvı Ürünlerin Isıl İşlemi

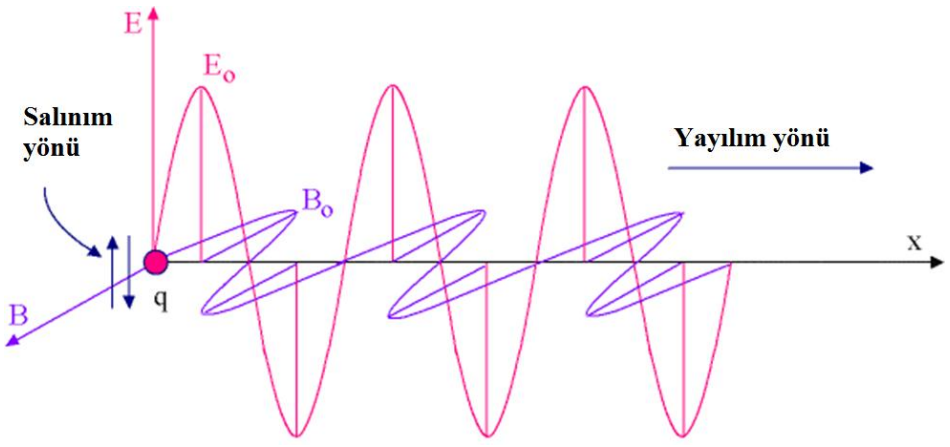
2.2.1 Mikrodalga uygulama prensibi

Elektromanyetik spektrumda mikrodalga bölgesi 1 GHz den 100 GHz e kadar olan alanı kapsamaktadır (Şekil 2.4). Mikrodalga (MW) içerdiği düşük enerji miktarına bağlı olarak iyonize edici olmayan dalga sınıfındadır (Dawoud 2003, Vollmer 2004). Mikrodalga ile ısıl işlem amacıyla kullanılan aralık genel olarak 300 MHz ile 3 GHz arasında olup dielektrik materyallerin tamamı bu aralık dahilinde ısıtılabilmektedir. ITU (International Telecommunication Union - Uluslarası Telekomünikasyon Birliği) tarafından belirlenen ve ISM band olarak adlandırılan endüstriyel, bilimsel ve medikal amaçlı kullanıma ayrılmış radyo frekans bant aralığında bulunan 915 MHz ve 2450 MHz olmak üzere 2 farklı frekans genel olarak mikrodalga ısıtma için kullanılmaktadır ve bu iki frekanstaki dalgaların, dalga boyları yaklaşık olarak sırasıyla 32,79 cm ve 12,24 cm'dir (Metaxas 1991). Mikrodalgalar da birbirine dik konumda olan elektrik alan ve manyetik alandan oluşmaktadır (Şekil 2.5). Mikrodalga ile ısıtmada etkili olan kısım büyük oranda elektrik alan olup mikrodalga ısıtmanın prensibi dipol rotasyonu veya iyon göçü sebebiyle oluşan kinetik enerji artışına bağlı olarak meydana gelen sürtünme kuvveti ısı enerjisidir. Şekil 2.6a'da dipol yapıda olan su molekülünün elektrik alanla etkileşimi gösterilmiştir. Burada dipol rotasyon oluşmasının sebebi oksijen ve hidrojen atomlarının elektronegativite değerlerindeki farklılıktır. Dipol hareket de elektrik alan salınımı sebebiyle moleküler pozisyon elektrik alana göre değişmekte ve bu hareket ise sürtünme sebebiyle ısı enerjisinin oluşmasına sebep olmaktadır (Şekil 2.6.a). Ürün içerisinde serbest iyonlar ya da iyonik türlerin bulunması durumunda mikrodalga enerji iyon hareketi sebebiyle de ısı enerjisine dönüşebilmektedir. Bu bağlamda iyonlar kendi yüklerini elektrik alanla aynı düzleme getirmek için ileri ve geri hareket etmekte ve böylece yine sürtünmeden kaynaklı olarak ısı enerjisi açığa çıkmaktadır (http://cem.com 2018). Serbest iyonların elektrik alan karşısındaki tepkisi şekil 2.6.b'de betimlenmiştir.

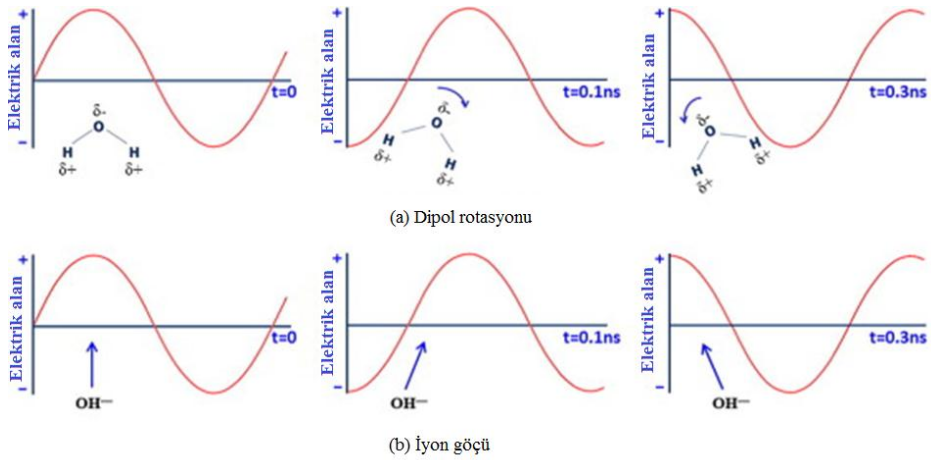
2450 MHz frekans değerinde bir su molekülü yaklaşık olarak saniyede $4{,}9\times10^{9}$ defa dönmek suretiyle çok hızlı bir şekilde ısı enerjisinin oluşmasına sebep olmaktadır (Kingston vd. 1997, King vd. 2003, Gregory ve Clarke 2006). Su hemen hemen bütün biyolojik materyallerin ana bileşeni olduğundan dielektrik ısınmada önemli yere sahip olan bir moleküldür.



Şekil 2.4 Elektromanyetik tayf (Dawoud 2003)



Şekil 2.5 Birbirine dik konumda oluşan elektrik ve manyetik alan (http://www.pstcc.edu 2018)



Şekil 2.6 Mikrodalga enerjisinin ısıl enerjiye dönüşüm mekanizması (Yin 2012)
(a.Dipol rotasyonu, b. iyon hareketi)

Mikrodalga sistemlerde elektromanyetik alan oluşumu Maxwell eşitlikleri ile açıklanmaktadır (Eşitlikler 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4) (Metaxas ve Meredith 1983).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \grave{}\rho \tag{2.1}$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\delta D}{\delta t} \tag{2.2}$$

$$\nabla \vec{B} = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla \vec{H} = j + \frac{\delta D}{\delta t} \tag{2.4}$$

Farklı ısınma mekanizmalarının da ele alınması kapsamında dielektrik ısınmayla direkt bağlantılı olan permittivite değeri ise kompleks bir yapıda ele alınmaktadır (Eşitlik 2.5) (Bradshaw vd. 1998).

$$\varepsilon_r = \varepsilon' + j\varepsilon'' \tag{2.5}$$

Bu karmaşık sayının gerçel kısmı ε' materyalin elektrik enerjiyi depolama yeteneğini belirmekte iken, sanal kısmı olan ε'' dielektrik kayıp faktörü ya da efektif kayıp faktörü olarak adlandırılmaktadır. ε'' değeri dipolar gevşeme kaybı ile birlikte iletim ve Maxwell-Wagner kayıplarını ifade etmektedir. ε'' değeri materyalin elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüşümünü etkileyen faktör olup, materyalin dielektrik özellikleri frekans, sıcaklık ve ürün kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir (Bradshah vd. 1998, Hebbar ve Rastogi 2012).

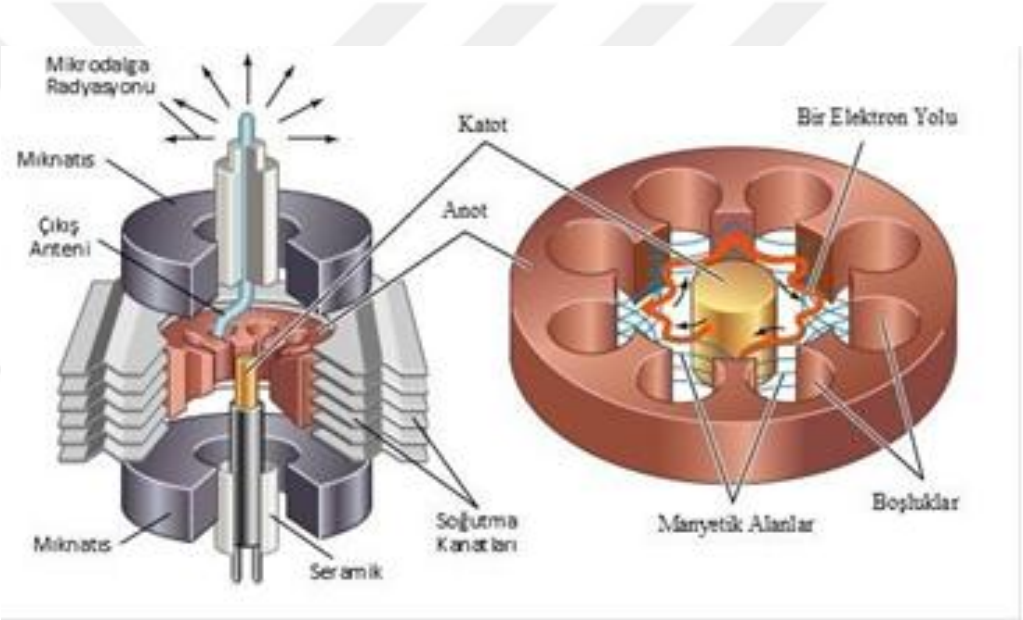
Mikrodalga uygulama sırasında, genel olarak mikrodalgalar materyal tarafından iletilmekte, yansıtılmakta ve/veya absorbe edilmektedir. Transparan materyaller ise mikrodalga ile hiç etkileşime girmeden ve yapısını değiştirmeden mikrodalgaları olduğu gibi iletmektedir. Buz bu kapsamda bir örnek olup; quartz ve PTFE - teflon da transparan materyal örneklerindendir. Elektromanyetik dalgayı yansıtan materyaller ise mikrodalga ile etkileşime girmeyen malzemeler olup metaller bu gruba uygun bir örnektir. Absorbe eden materyaller ise dielektrik özelliğine göre elektromanyetik enerjinin bir kısmını veya tamamını absorbe ederek ısı enerjisine dönüştürmektedir (Mello vd. 2014). Elektromanyetik alanın dielektrik materyal tarafından absorbe edilerek içerisine penetre etmesi penetrasyon derinliği ile belirlenmektedir. Penetrasyon derinliği elektromanyetik alan gücünün, orijinal değerin 0,368 (1/e) katına düştüğü uzaklık olarak tanımlanmaktadır ve eşitlik 2.6 ile ifade edilmektedir (Metaxas ve Meredith 1983).

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \tag{2.6}$$

Mikrodalga enerjisi dielektrik materyal içerisine penetre ettikten sonra ısı enerjisine dönüşmektedir (Eşitlik 2.7).

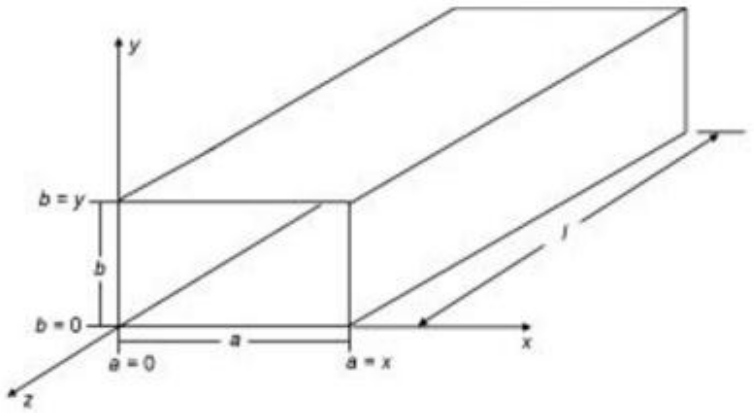
$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \left|\vec{E}\right|^2 \tag{2.7}$$

Klasik bir mikrodalga sistem; mikrodalga kaynağı, dalga kılavuzu ve aplikatör adı verilen 3 ana parçadan oluşmaktadır. Magnetron ev tipi ve endüstriyel mikrodalgalarda en çok kullanılan mikrodalga kaynağıdır. Magnetron, merkezinde yüksek negatif potansiyelli elektron-yayıcı bir katot ve vakum bir tüpten oluşur. Katot, kaviteler oluşturan anot tarafından çevrelenmiştir ve ikisi saçaklı bir alan tarafından birbirine kenetlenmiştir. Bir elektrik kuvveti uygulandığı zaman, yayılan elektronlar manyetik alan tarafından saptırılarak radyal olarak ivmelenir. Böylece oluşan elektromanyetik enerji, anten tarafından dalga kılavuzu içerisine yönlendirilir (Hebbar ve Rastogi 2012). Genel olarak, mikrodalga sistemlerinde kullanılabilen magnetronun yapısı şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Magnetronun genel yapısı (http://www.mikrodalga.com.tr 2018)

Dalga kılavuzu ise genellikle dikdörtgen ya da silindirik kesit alanına sahip içi boş metalik iletken yapılardır. Dalga kılavuzunun temel amacı mikrodalga kaynağı olan magnetronda üretilen elektromanyetik dalgaları mikrodalga aplikatörüne taşımaktır. Dalga kılavuzlarının yapısı amaca göre değişkenlik gösterse de endüstriyel ve ev içi amaçlarla kullanılan mikrodalga sistemlerde genel olarak dikdörtgen kesitli dalga kılavuzları kullanılmaktadır (Şekil 2.8) (Tang ve Resurreccion 2009).



Şekil 2.8 Dikdörtgen kesit alanlı dalga kılavuzu (Tang ve Resurreccion 2009)

Gıda maddelerinin ana bileşeni olan su dipolar doğasına bağlı olarak mikrodalga ile olan etkileşimlerinin ana kaynağıdır. Isı, ürünün her noktasında oluştuğundan, ısının genellikle yüzeyden iç kısımlara iletildiği geleneksel ısıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında ısıtma hızı daha fazla ve proses süresi daha kısa olmaktadır. Bu durum mikrodalga ısıtmanın endüstriyel skalada kullanılmasının başlıca nedeni olarak gösterilmekte olup kalitenin artırılması, maliyetin düşürülmesi ve verimin artırılmasında bu sistemlerin kullanılmasının diğer avantajlarıdır (Decareu 1985). Bununla beraber, mikrodalga uygulaması, belirli ürünlerin dielektrik ve termofiziksel özelliklerine bağlı olarak, ürünlerde düzensiz ve tekdüze olmayan bir ısınmaya da sebep verebilmektedir. Bu, dielektrik özelliklerin sıcaklık değişimlerinin önemli bir fonksiyonu olduğu düşük frekanslarda çalışırken daha da belirgin hale gelmektedir. Ürün geometrisi de bu problemi elimine etmede oldukça önem taşımaktadır (Campanone ve Zaritzky 2005). Bunun yanında mikrodalga bölmesinin geometrisi ve elektromanyetik parametreler de bu konuda ayrıca önemli olan özelliklerdir (Dincov ve Parrott 2004). Mikrodalga ısıtma sistemlerinin endüstriyel ölçüde uygulamasında sınırlayıcı olan düzensiz sıcaklık dağılımı, özellikle endüstriyel düzeyde uygulamalar için önemli bir problemdir. Örneğin, bu düzensiz dağılım ürünlerde kuru ve yanmış bölgeler oluştururken, diğer bölgelerde işleme için ısıl işlem için gerekli minimum sıcaklığa ulaşılamamaktadır. Bu olay, sterilizasyon sırasında tıpkı geleneksel bir proseste olduğu gibi, prosesin güvenli bir şekilde yürütülmesi için bazı bölgelerde fazla ısınma ile sonuçlanıp kalite kaybına da neden olabilmektedir.

Ürün içerisindeki sıcaklık dağılımının karakterizasyonunda matematiksel diferansiyel eşitlikler, çalışılan prosese önemli bir tanımlama sağladığından, mikrodalga sistemlerin kullanılması ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının karakterizasyonunun belirlenmesinde de matematiksel bir bakış açısının geliştirilmesi önemlidir (Campanone ve Zaritzky 2005). Düzensiz ısıtma problemi çözüldüğünde, özellikle akışkan gıdaların işlenmesinde sürekli mikrodalga sistemlerinin geleneksel ısıl işlem sistemlerinin yerini alması gıda endüstrisi açısından önemli bir gelişme olacaktır. Bu durumda, mikroorganizmaların inaktivasyonu ve kalite özelliklerinin azalması sıcaklık-zaman uygulamasına büyük ölçüde bağımlı olduğundan, sürekli mikrodalga sistemlerinin gıda endüstrisinde uygulamalar açısından matematiksel temelli olarak fizibilitelerinin belirlenmesi gerekmektedir (Coronel vd. 2003a, b). Bu kapsamda, mikrodalga sistemlerin tasarımı ve optimizasyon çalışmaları için, sistem içerisinde gerçekleşen elektrik alan ve üründe meydana gelen sıcaklık dağılımının belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı ve mikrodalga güç absorbsiyonu eşitliklerinin çözülmesi gerekirken; sürekli mikrodalga sistemleri için ise, çözümlerde, ürün akışının da göz önüne alınması için ek akış eşitlikleri bu sisteme dahil edilmelidir. Sürekli sistemlerden önce, genel olarak kullanılan mutfak tipi kesikli sistemlerde gerçekleştirilen matematiksel modelleme çalışmalarında, sistem içerisinde yer alan sıvı ürünlerin sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Prosetya ve Datta 1991, Datta vd.1992).

2.2.2 Sıvı ürünlerin mikrodalga sistemlerde prosesi

Sürekli mikrodalga sistemleri gıda endüstrisinde kullanım açısından göreceli olarak oldukça yeni olup işlenen gıdalardaki deneysel sonuçlar ile doğrulanan sıcaklık profillerinin öngörülmesi için teorik çalışmalara da ihtiyaç duymaktadır. Coronel vd. (2003b) süt içerisindeki sıcaklık profilini sürekli bir mikrodalga sistemindeki ısıl işlem sırasında belirlemişlerdir. Bu çalışmada sütün sürekli akış mikrodalga sistemde proses edilmesi sonucu ürün akış hızının akış yönüne dik kesitte elde edilen sıcaklık farklarına etkisi incelenmiş ve 2 L/dk.da 3,7 °C ve 3L/dk.da ise 3,0 °C olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.9, bu çalışmada 2 L/dk. akış hızında elde edilen sıcaklık profilini göstermektedir. Sürekli - akış mikrodalga sistemlerde düşük viskoziteli sıvı gıdaların proses edilmesi

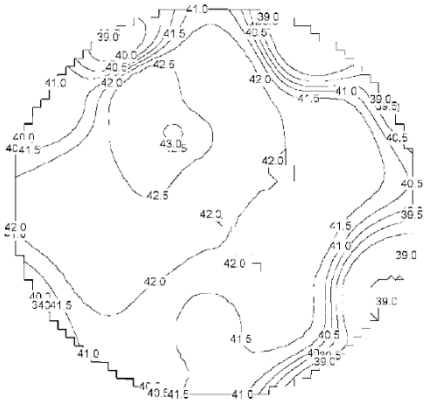
sonucu akış yönüne dik kesitte ele alınan sıcaklık farklarının geleneksel proseslerle karşılaştırıldığında çok yüksek olmayacağı Nikdel vd. (1993) tarafından belirtilmiştir.

Gentry ve Roberts (2005) elma suyunun pastörizasyonu amacıyla, bir mikrodalga fırın kullanarak sürekli bir mikrodalga sistemi tasarlamış ve hacimsel akış hızı, mikrodalga gücü ve ürün giriş sıcaklığının etkilerinin pastörizasyon zaman ve sıcaklığı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Coronel vd. (2005) mikrodalga enerjinin yayınım eşitliğini çözerek, sürekli bir mikrodalga sisteminin gıda maddelerinin işlenmesindeki fizibilitesinin belirlenmesi amacıyla bir çalışma yapmışlar ve uygun sonuçlar elde etmişlerdir. Sierra vd. (2000) sürekli bir mikrodalga sistemini sütün B_1 ve B_2 vitaminleri içeriği üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla kullanmışlardır. Tajchakavit vd. (1998) sürekli mikrodalga ısıtma ile elma suyundaki bozulma etmeni mikroorganizmaların inaktivasyonlarının daha belirgin hale gelmesini incelemişlerdir.

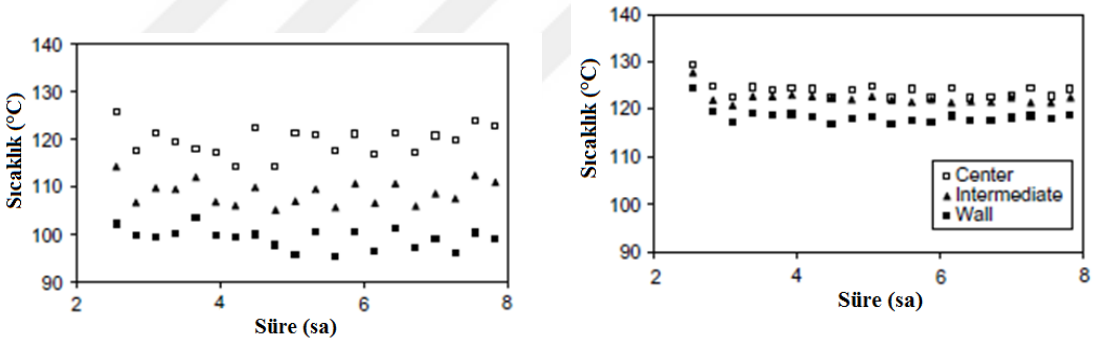
Yüksek viskoziteli (Newtonumsu olmayan) ürünlerin sürekli-akış mikrodalga sistemlerde proses edilmesi sırasında ise akışa dik kesitteki en yüksek ve en düşük sıcaklıklar arası farkın, düşük viskoziteli ürünlerin sürekli-akış mikrodalga sistemlerde proses edilmesi sırasında elde edilen sıcaklık farkından, daha fazla olması beklenmektedir. Bu durum hem ürün içerisinde konveksiyonun yanında gerçekleşebilecek kondüksiyon etkisiyle hem de yüksek viskoziteye bağlı olarak karışma etkisinin azalmasıyla açıklanabilmektedir. Bu sıcaklık farkını engellemek adına çeşitli yöntemler denenmektedir. Bu duruma örnek olarak Kumar vd. (2008) yılında yaptığı çalışmada sürekli-akış mikrodalga sistemde proses edilen sebze pürelerinde elde ettiği ve sonrasında mikrodalga aplikatörlerin çıkışına yerleştirdiği statik mikserler ile karıştırma sağladığında elde ettiği sıcaklık profillerinin modifiye edilmiş hali sırasıyla şekil 2.10'da gösterilmektedir.

Sürekli-akış mikrodalga sistemde farklı sıvı ürünlerin prosesi Tuta ve Palazoğlu (2017) tarafından modellenmiştir. Ürün içerisinde oluşabilecek homojen olmayan elektromanyetik alana bağlı olarak elde edilen tekdüze olmayan sıcaklık profilinin, akışın helikal boru içerisinden geçmesi sağlanması durumunda daha homojen bir şekilde oluşacağını göstermiştir. Yaptığı çalışmalar sırasında suyun ve

karboksimetilselülozun (CMC) helikal boruda mikrodalga ile proses edilmesi sonucu elde ettiği sıcaklık profili şekil 2.11'de gösterilmiştir.



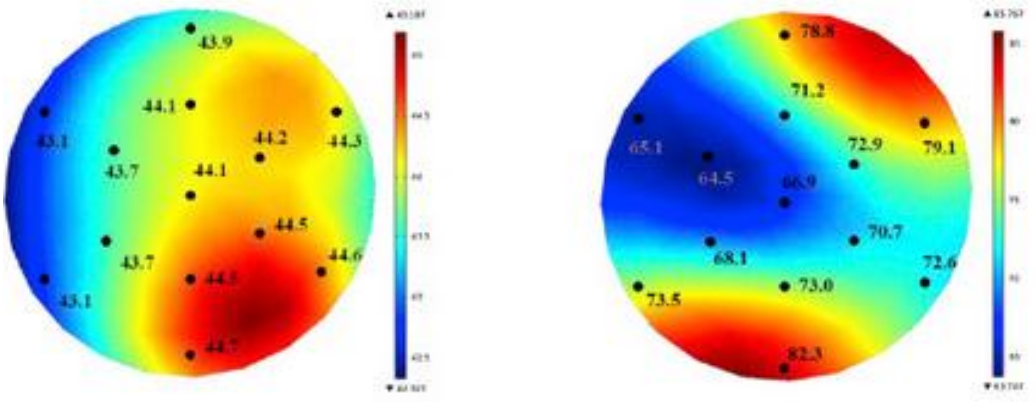
Şekil 2.9 Yağsız sütün 2 L/dk. akış hızında proses edilmesi sonucu boru çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı (Coronel vd. 2003).



a b

Şekil 2.10 Bezelye pürelerinin sürekli-akış mikrodalga sisteminde proses edilmesi sonucu elde edilen sıcaklık verileri (Kumar vd. 2008)

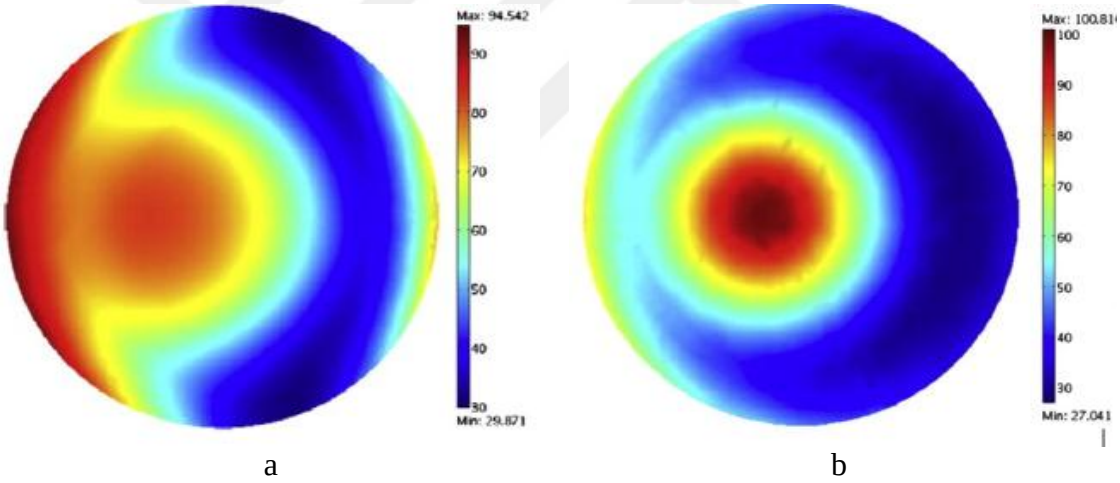
(a.Karıştırma işlemi olmaksızın, b.karıştırma işlemi ile)



a b

Şekil 2.11 Farklı ürünlerde 1 L/dk. akış hızında helikal boru çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı (Tuta ve Palazoğlu 2017)

(a.Su, b. % 0,5 CMC)



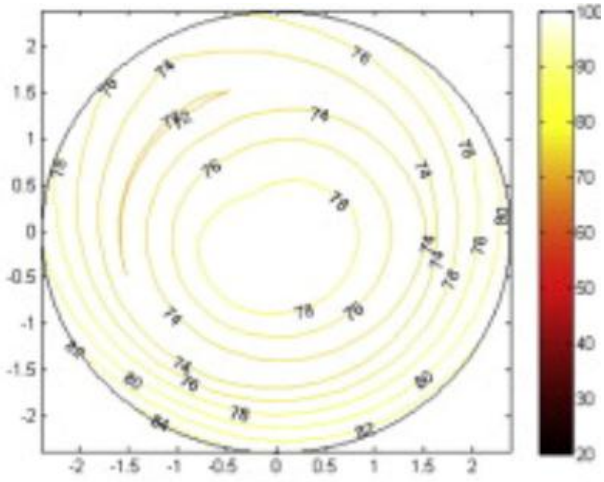
a b

Şekil 2.12 1 L/dk. akış hızında helikal boru çıkışında farklı ürünlerin prosesi sırasında elde edilen sıcaklık dağılımı (Salvi vd.2011)

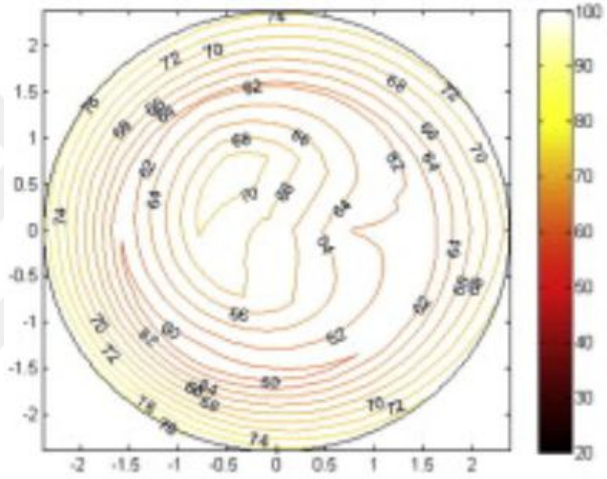
(a. Su, b. % 0,5 CMC)

Başka bir çalışmada Salvi vd. (2011) sürekli-akış mikrodalga sisteminde farklı hızlarda düşük viskoziteli su ve yüksek viskoziteli % 0,5 CMC solüsyonunun prosesinin bir modellemesini yapmıştır. Bu çalışmasında da şekil 2.12'den de anlaşılacağı gibi düşük viskoziteli suda akış yönüne dik kesitte sıcaklık farkı CMC solüsyonunun aynı kesitteki sıcaklık farkından daha düşük olduğunu göstermiştir.

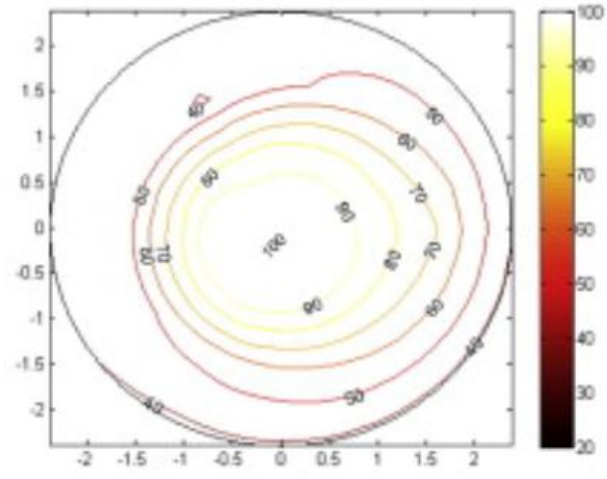
Bu sistemlerde kullanılan akışkanın dielektrik özelliklerindeki değişim de sıcaklık dağılımını önemli bir şekilde etkilemektedir. Salvi vd. (2009) dielektrik özelliğin sürekli-akış mikrodalga sistemlerde sıcaklık dağılımı üzerine etkisini gözlemek amacıyla yaptığı bir çalışmada su, tuzlu su ve CMC çözeltisi ile çalışmış ve şekil 2.13'te de görüleceği üzere en tekdüze sıcaklık dağılımının tuzlu suda oluştuğunu göstermişlerdir. Tuzlu su dielektrik kayıp değerinin daha yüksek olması da elde edilen sonuçtaki önemli bir kriter olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada da üzerinde durulduğu üzere proses edilecek ürünün dielektrik özelliklerinin özellikle sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmesi bu konudaki çalışmaların doğruluğu açısından elzem bir faktördür. Bu kapsamda, Zhu vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise sürekli mikrodalga sistemlerinde sıvı ürünlere uygulanan ısıl işlem sırasında dielektrik özellik ve tasarım parametrelerinin etkisi, geliştirilen bir matematiksel modelle incelenmiş ve tasarım parametreleri olarak mikrodalga kavite geometrisi ve sistem içerisinde kullanılan boru çap ve lokasyonunun önemi özellikle belirtilmiştir. Dairesel kesitli boru içi akışın gerçekleştiği bir durumda mikrodalga ısıtmanın matematiksel olarak modellenmesi konusundaki bir diğer çalışmada ise ürün hızının ve uygulanan mikrodalga gücünün ürün sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir (Cuccurullo ve Giordano 2015). Raaholt vd. (2016) ise ardarda gelen 3 kaviteden oluşan bir sürekli sistemdeki ısıl işlem tekdüzeliğini mikrodalga uygulama modları kapsamında farklı bir bakış açısıyla incelemiş ve sıvı ürün (Newtonumsu olmayan özelliklerde yüksek viskoziteli - kesme hızı bağmlı model ürün) çıkış sıcaklığında maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki farkın 10 °C'nin altına düşürülebileceğini göstermişlerdir.



a



b



c

Şekil 2.13 Farklı sıvılara ait deneysel sıcaklık dağılımları (Salvi vd. 2009)

(a.Tuzlu su, b. su, c. CMC)

Mikrodalga uygulamada sıvı ürünlere uygulanan dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisini gösterme amacıyla Chatterjee vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada dönme ve yerçekimi kuvvetlerinin sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir. Aksi-simetrik yaklaşımla gerçekleştirilen bu çalışmada, ev tipi mikrodalga sistemlerde dönme etkisi sağlamak amacıyla kullanılan sistemlerin ürün sıcaklık değişimine önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Deneysel olarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmeyen bu çalışmada aksi-simetrik uygulama yapılmış olması (ev tipi mikrodalga sistemlerde bu yaklaşım doğru olmayacağından) çalışma sonuçlarının güvenirliği konusunda soru işaretleri doğurmuştur. Stratakos vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise sürekli akış bir mikrodalga sistemde ürünün akış hareketi sırasında boruya uygulanan dönme hareketinin domates suyu fizikokimyasal özellikleri, mikrobiyel karakteristiği ve antioksidan kapasitesi üzerine etkileri incelenmiş ve bu sistemin geleneksel sistemlere iyi bir alternatif olabileceği konusuna değinilmiştir.

3. MATERYAL YÖNTEM

Sıvı gıdaların mikrodalga sistemlerde proses edilmesi ve proses sonucunda prosesin amacına uygun ürün elde edilebilmesi amacıyla yapılan bu çalışmanın ilk bölümünde, laboratuvar ölçekli bir sistemde iki farklı viskoziteye sahip sıvı ürünün (su ve % 0.5 CMC çözeltisi) proses edilmesi, proses sırasında üründe meydana gelen sıcaklık değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla prosesin matematiksel modelinin hazırlanması ve simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle doğrulanması, bu sistemde radyal yönde uygulanan dönme hareketinin sıvının sıcaklık profili üzerine etkisinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma, deneysel olarak doğrulanan model kullanılarak sürekli-akış mikrodalga sistem tasarımı, sistemden elde edilen verimin artırılması ve ürünün sistemden ayrılırken belirlenen sıcaklıklarda sıcaklık profilinin tekdüze olması amaçlarıyla yapılan optimizasyon çalışmaları ve yüksek üretim kapasitesi için alternatif endüstriyel sistem tasarımları konusundaki çalışmalarla tamamlanmıştır.

3.1 Materyal

3.1.1 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem

Yapılacak model simülasyonlarının doğrulanması amacıyla, deneysel çalışmaların yürütüldüğü LG MS2022D model ev-laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem kullanılmıştır (Şekil 3.1.a). Bu sistem sıvıların proses edilebilmesi amacıyla sistem duvarlarının üst tarafından sistem içerisine, 2,5 cm yarıçaplı ve 17,5 cm yüksekliğe sahip iki ucu kapalı silindirik, mikrodalga enerjiye tamamen geçirgen olduğu varsayılabilen teflon (PTFE) silindirik tüp yerleştirilerek modifiye edilmiştir (Şekil 3.1.b). Sistem özellikleri arasında bulunan dönme hareketinden faydalanabilmek amacıyla da teflon tüpün taban kısmı döndürme aparatına uyumlu olarak tasarlanmıştır.



a



b

Şekil 3.1 Deneysel çalışmalar için kullanılan LG MS2022D model ev tipi mikrodalga fırın

a. modifiye edilmeden, b. sıvı ürün prosesi için modifiye edilmiş

Mikrodalga sistemde, ürünün ısınması için yerleştirilen, elektromanyetik alanın oluştuğu ve duvarları alüminyum yapıda olup elektromanyetik dalgaları tamamen yansıtan kavitenin genişliği 29,3 cm, derinliği 25,5 cm ve yüksekliği 18 cm olarak ölçülmüştür. Sistem 2,5 rpm hızla dönmekte olup; sistemin kendi içerisinde bulunan güç ayarları kısmında 500 W, 360 W, çözdürme ve 70 W olarak belirtilen seviyeler

bulunmaktadır. Bu çalışmalar sırasında 500 W değeri kullanılmıştır. Yapılan ön çalışmalar sırasında belirtilen güçlerin direkt olarak sistem içerisine verilemediği ve aynı zamanda elektromanyetik dalgaların üretildiği magnetronun aşırı ısınmasını engellemek amacıyla sistemin aralıklar ile çalıştığı tespit edilmiştir. Mikrodalga sistemlerde elektrik enerjisinin elektromanyetik enerjiye dönüşümünü sağlayan magnetron aparatı farklı yapılarda olabilmektedir. Kullanılan laboratuvar ölçekli mikrodalga sisteme ait magnetron, eşmerkezli yapıda olup TEM (Transvers Elektrik ve Manyetik) modunda çalışmaktadır. Sistem içerisine gelen dalgaların frekansı 2450 MHz olup dalga boyları 12,23 cm'dir (Eşitlik 3.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.1}$$

3.1.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan sıvı örnekler

Sıvıların mikrodalga ile proses edilmesi sırasında viskozitenin ürün sıcaklık profiline etkisinin incelenmesi için iki farklı sıvı örneği (düşük viskoziteli Newtonumsu sıvı örneği olarak saf su, yüksek viskoziteli Newtonumsdsu olmayan örnek olarak ise % 0,5 konsantrasyonunda karboksimetilselüloz -CMC- çözeltisi) kullanılmıştır. % 0,5 CMC çözeltisi hazırlanırken CMC ve saf su miktarları kütle (w/w) olarak belirlenmiş, oda sıcaklığında ev tipi karıştırıcı yardımı ile CMC'nin su içerisinde çözünmesi sağlanmıştır. Çözelti içerisinde hapsolan gaz kabarcıklarının giderilmesi amacıyla da çözelti hazırlandıktan sonra oda sıcaklığında 48 saat dinlendirilmiştir. Sıcaklık uygulaması ile çözdürme işlemi daha kolay olsa da ısıl işlem uygulama sırasında ürünün dielektrik özelliklerinin geri dönüşümsüz olarak değişebileceği göz önünde bulundurularak oda sıcaklığında karıştırıcı uygulaması tercih edilmiştir. Karıştırma sırasında ürün sıcaklığının etkili bir biçimde yükselmediği de teyit edilmiştir.

Simülasyon çalışmaları sırasında kullanılan fiziksel özellikler saf su için çizelge 3.1'de % 0,5 CMC için ise çizelge 3.2'de verilmiştir. Saf su için dielektrik özellik değerleri Gıda Mühendisliği bölümü - Computational Food Processing (CFπ) grubu tarafından sıcaklık ve frekansın fonksiyonu olarak ölçülmüş olup tezin bu aşamasında 2450 MHz

frekanstaki değerleri kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Saf su için diğer fiziksel değerler (ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı kapasite değeri, yoğunluk ve viskozite) yine sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kullanılan yazılımın kütüphanesinden direkt olarak kullanılmıştır (Çizelge 3.1). % 0,5 CMC çözeltisi için gerekli dielektrik özellik değerleri (ε' ve ε'') Coronel vd. (2008)'nin önerdikleri eşitlik (Eşitlik 3.2 ve 3.3) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\varepsilon' = 82,90 - 0,10C - 5,58\times10^{3}C^{2} + 1,68\times10^{-3}CT - 0,22T - 5,83\times?10^{-4}T^{2} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon'' = 9,76 - 0,10C + 1,22\times10^{-2}C^{2} - 2,53\times10^{-3}CT - 5,22\times10^{-2}T + 1,60\times10^{-3}T^{2} \quad (3.3)$$

Isıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı kapasitesi ve yoğunluk (Çizelge 3.2) değeri, sıcaklığın fonksiyonu olarak, Tuta ve Palazoğlu (2017) çalışmasından alınmıştır. Düşük konsantrasyondaki CMC çözeltilerinin viskozitesi, literatürde görünür viskozite (sadece sıcaklığın bir fonksiyonu) olarak sıvının Newtonumsu akışkan özellik gösterdiği varsayımıyla ya da viskozitenin sıcaklık ve kayma hızı fonksiyonu olduğu Newtonumsu olmayan akışkan olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle simülasyon çalışmalarında CMC hem Newtonumsu akışkan hem de Newtonumsu olmayan akışkan olarak ele alınmıştır. Newtonumsu olmayan akışkan durumu için viskozitenin Power Law'a bağlı olarak değiştiği varsayımı yapılmıştır (Eşitlik 3.4).

$$\eta = M(\gamma)^{N-1} \quad (3.4)$$

Simülasyon çalışmalarının deneysel verilerle doğrulaması yapıldıktan sonra, endüstriyel tasarım çalışmalarında proses edilecek ürün olarak sıvı bütün yumurta baz alınmıştır. Pastörize sıvı yumurta üretimi, ürün viskozitesine bağlı olarak laminer akış koşullarında gerçekleştirilen bir proses olarak, bu duruma güzel bir örnek teşkil etmektedir. Yumurta biyolojik yararlılık olarak nitelendirilen sindirilebilirlik ve protein kalitesinin yüksek olması ve elzem aminoasitleri içeren yapısıyla oldukça değerli bir gıda ürünüdür. Türkiye'de 2016 yılında 18655 milyon adet yumurta üretilmiştir ve bununla birlikte kişi başına 203 adet yumurta tüketimi yapılmış (Anonim 2016) olsa da tüketim alışkanlıklarının değişmesi ve hazır gıda sektörünün de gelişmesine paralel olarak pastörize sıvı yumurta üretimi de önemli bir artış göstermiştir. Yumurta yüksek besleyici özellikleri yanında, son yıllarda gıda güvenliği kapsamında *Salmonella*

enteritidis problemi ile sürekli olarak gündemde olan bir üründür. Yılda dünyada ortalama olarak 200 milyon ile 1,3 milyar arası tifo sonuçlu olmayan Salmonellozis vakası görülmekte ve bunların yaklaşık 3 milyonu ölüm ile sonuçlanmaktadır (Howard vd. 2012).

Çizelge 3.1 Sıcaklığa bağlı olarak suya ve % 0,5 CMC ye ait dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü.

Sıcaklık (°C)	Su		% 0,5 CMC çözeltisi	
	ε`	ε``	ε`	ε``
5	85,05	17,93	81,19	9,28
20	79,31	10,84	77,80	8,91
40	72,57	6,19	72,86	9,53
60	66,39	3,78	67,47	11,43
65	64,9	3,41	66,04	12,11
80	60,44	2,33	61,60	14,62
90	57,46	1,61	58,49	16,69

Çizelge 3.2 Sıcaklığa bağlı olarak % 0,5 CMC çözeltisine ait termofiziksel özellikler

Sıcaklık (°C)	k (W/m.K)	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg.K)	μ (Pa.s)	M (kg/m.s)	N
20	0,602	997,6	4170,3	0,5	0,639	0,791
35	0,623	994,5	4174,8	0,308	0,409	0,844
50	0,641	989,8	4181,9	0,192	0,246	0,86
65	0,656	983,4	4191,4	0,115	0,148	0,865
80	0,668	975,2	4203,3	0,077	0,096	0,906
90	0,674	968,9	4212,7	0,038	0,062	0,974

Yapılan araştırmalar *Salmonella* kaynaklı salgınların % 76'sına yumurta ve yumurta ürünlerinin neden olduğu ve yumurta tüketimine bağlı Salmonellozise neden olan mikroorganizmanın da *S. enteritidis* olduğunu göstermiştir (Heperkan ve Gökler 2012). *S. enteritidis*'in yumurtalarda doğal olarak bulunma olasılığı 1/20000 olarak

belirlenmiştir. Geleneksel ısıl işlem uygulamaları ile ısı değiştirici sistemlerde gerçekleştirilen pastörize sıvı yumurta üretiminde de hedef olarak bu mikroorganizma seçilmektedir (Anonymous 2006).

Sıvı yumurtanın sıcaklığa hassas bir gıda olması, pastörizasyon prosesi sırasında ısı değiştiricilerin kullanılması, ürün içerisinde ve özellikle ısı değiştirici çeperinde koagülasyon oluşmasına sebebiyet vermektedir. Koagülasyona bağlı olarak bir yanda ısı penetrasyon hızında bir yavaşlama meydana gelirken bir yanda da üründe kayıplar ve kalite özelliklerinde azalmalar olmaktadır. Bu sebeple ısı değiştiricilere alternatif olarak kullanılacak mikrodalga sistemlerde ürünün akış hızı ve mikrodalga gücü koagülasyonu minimuma indirmek ve hatta engellemek amacıyla üzerinde durulması gereken parametrelerdir. Bu parametrelerdeki değişimin sonucu olarak üründe oluşacak olan sıcaklık değişimi ve pastörizasyon değerine bakılarak pastörizasyonun amacına ulaşıp ulaşmadığına karar verilmektedir:

$$F = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-Tref}{z}} dt \tag{3.5}$$

Eşitlik 3.5'te F pastörizasyon değerini, T_{ref} ise referans sıcaklık değerini göstermektedir. Tüm-sıvı yumurtalarda referans sıcaklık değeri 60 °C, z-değeri ise Jin vd. (2008) tarafından *S. enteritidis* strain 13076 için belirtilen 4,08 °C olup yumurta pastörizasyon çalışmalarında *S. enteritidis* sayısında 5 log evrelik azalma sağlayacak bir sıcaklık - zaman kombinasyonunun kullanılması gereklidir (Mermelstein 2001).

Bu kapsamda sıvı yumurtaya ait fiziksel ve dielektrik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır. Muira vd. (2003) yumurta beyazı ve sarısını da içeren farklı katı ve sıvı gıda ürünlerinin mikrodalga dielektrik özelliklerini, Lokhande vd. (1996) albümin ve yumurta sarısının dielektrik özelliklerini, Hamid-Samimi vd. (1984) ve Scalzo (1970) sıvı yumurtanın ısıl işlem sırasındaki akış özelliklerini Telis-Romero vd. (2006) ise yumurta sarısının reolojik özelliklerini değişik sıcaklık aralıklarında vermektedirler. Sıvı bütün yumurta kullanılarak yapılan matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan dielektrik (Çizelge 3.3) ve fiziksel özellikleri için sırasıyla Coimbra vd. (2006) ve Wang vd. nin

(2008) çalışmalarından faydalanılmıştır. Sıvı yumurtaya ait elektriksel iletim katsayısı olarak Gongora-Nieato vd.nin (2003) çalışmasında belirttiği değer olan 0,62 S/m kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Tüm-sıvı yumurtaya ait sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü (Wang vd. 2008)

Sıcaklık (°C)	ε'	ε''
20	64,0	18,7
40	56,8	21,1
60	51,5	25,3
70	50,2	28,4
80	50,5	33,3
100	53,3	44,9

3.2 Yöntem

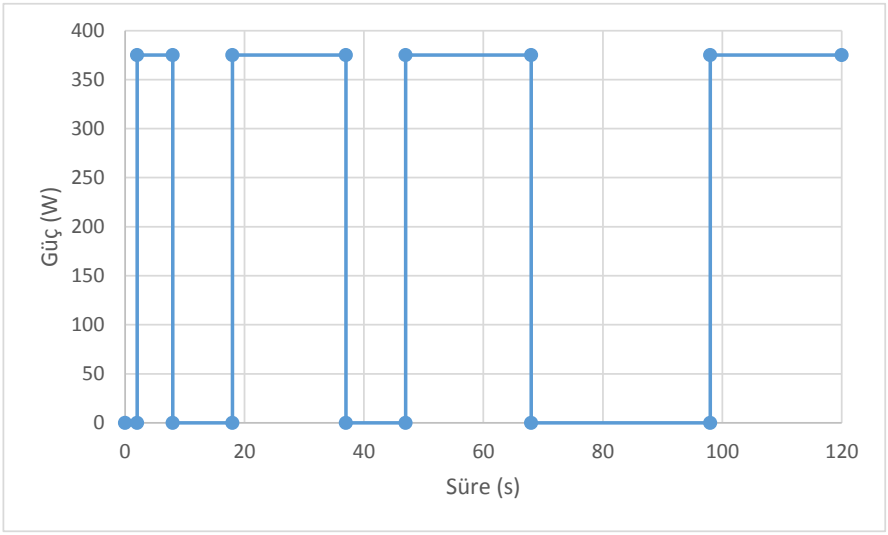
3.2.1 Deneysel çalışmalar

Simülasyon çalışmalarının deneysel olarak doğrulanması amacıyla ürün hacimsel sıcaklık ortalaması ve noktasal sıcaklık değeri kullanılmış ve elde edilen deneysel veriler simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hacimsel sıcaklık ortalama değerleri, mikrodalga uygulama sırasında farklı zaman aralıklarında, sistem içerisinde bulunan teflon silindirdeki suyun sıcaklık değerinin ölçülmesiyle elde edilmiştir. Mikrodalga sistemin kullanım sırasındaki dur - kalk aşamalarının da doğru olarak sonuçlar içerisinde irdelenmesi amacıyla, her zaman adımında yapılan ölçümlerden sonra silindir içerisindeki sıvı değiştirilmiş ve bir sonraki zaman adımı için proses 0 anından tekrar başlatılmıştır. Bu ölçümlerde, silindir içerisindeki sıvı sıcaklığı etkin bir karıştırma işleminden sonra Cole Parmer Digi Sense - T tipi ısıl çift kullanılarak ölçülmüştür. Noktasal sıcaklık değişimleri ise fiber optik sıcaklık sensoru (FISO Technologies INC. Québec, Canada) kullanılarak fiber optik problar ile ölçülmüştür.

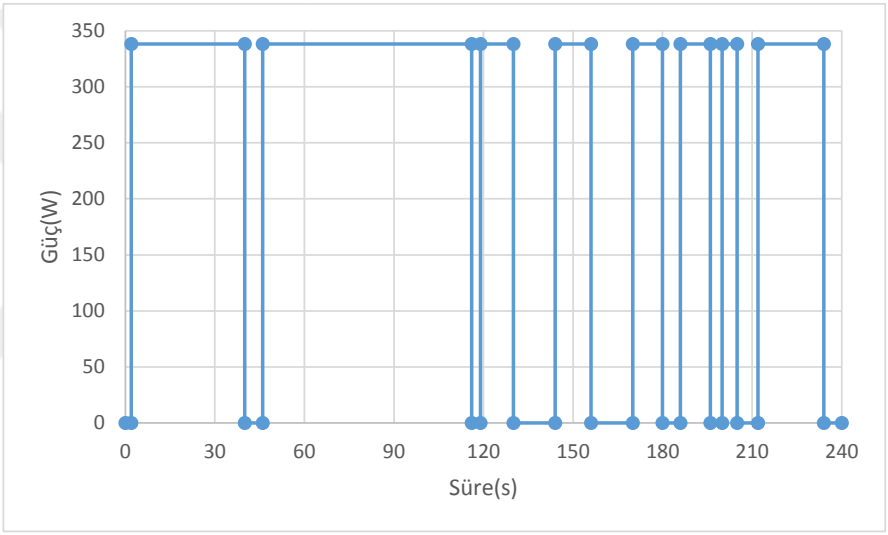
Daha önceden bahsedildiği gibi yapılan ön çalışmalar sırasında laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemin güç profilinin stabil olmadığı, magnetronda gerçekleşen ısınmalara bağlı olarak sistemin dur-kalk prensibi ile çalıştığı belirlenmiştir. Bu sebeple sisteme ait çalışma döngüsünün belirlenmesi, simülasyon çalışmalarının deneysel verilerle uyumunun sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan deney sırasında alınan noktasal sıcaklık verileri sayesinde sisteme ait dur-kalk zamanları tespit edilmiş böylece simülasyonlarda doğru veriler kullanılmıştır. Aynı zamanda sistemin tam verimde çalışmadığı göz önünde bulundurularak 500 W sistem ayarında sistem içerisine verilen gerçek gücün hesaplanması için, sistem belirli bir süre çalıştırılarak, total hacimde elde edilen sıcaklık farkından faydalanılarak sistemin gerçek güç değeri elde edilmiştir.

Hem dur-kalk çalışma döngüsü hem de sistemin gerçek gücü belirlenirken hacimsel ile noktasal sıcaklıkla doğrulama çalışmalarında farklı değerler elde edilmiştir. Hacimsel sıcaklık doğrulama çalışmaları sırasında sistem içerisindeki sıcaklık değişimi yine noktasal olarak ölçülerek sisteme ait dur-kalk süreleri ve güç değeri belirlenmiştir. Hacimsel sıcaklık doğrulaması için yapılan deneyler kısa süreler kullanıldığı için magnetronda gerçekleşen ısınma problemi daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Noktasal doğrulama sırasında ürün direkt olarak 240 s proses edildiği için ısınma problemi daha fazla olmakta ve böylece sisteme ait dur-kalk döngüsü değişmektedir. Bununla birlikte ürüne etki eden gerçek güç değeri de hacimsel deneylere göre nispeten daha düşük olmaktadır. Hacimsel sıcaklık verilerinden ve noktasal sıcaklık verilerinden elde edilen dur-kalk döngüleri sırasıyla şekil 3.2.a ve b'de gösterilmektedir.

Hacimsel doğrulama deneyleri için belirlenen dur-kalk süreleri göz önünde bulundurularak tüp içerisinde bulunan sıvı, 8, 18, 37, 47, 68, 76, 98, 106 ve 120. saniyelerde ölçümler tamamlandıktan sonra her deney arası magnetronun soğuması beklenerek, proses edilmiş ve belirtildiği şekilde teflon silindir içerisinde bulunan sıvı proses sonunda karıştırılarak içerisindeki sıcaklığın tekdüze olması sağlanmıştır. Bu sürelerde elde edilen sıcaklık değişimleri kullanılarak, hacimsel sıcaklık için yapılan simülasyonlarda kullanılmak üzere ürünün toplam absorbe ettiği güç değeri 375,19 W olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.2.a).



a



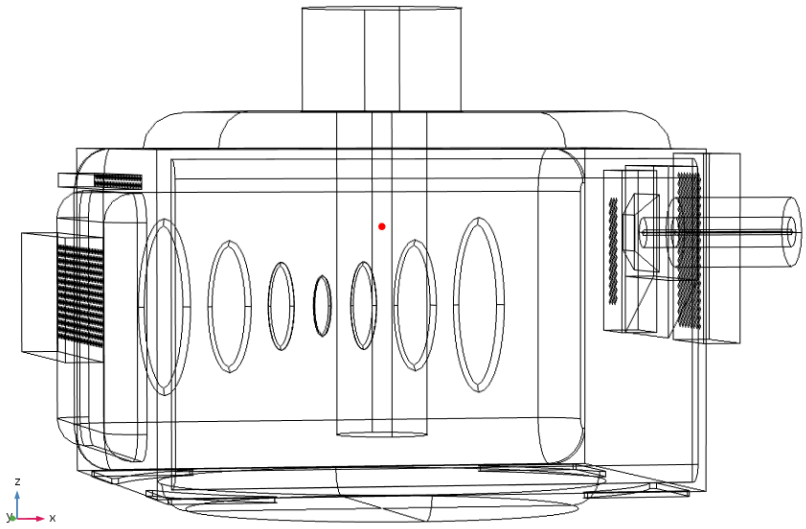
b

Şekil 3.2 Mikrodalga sisteme ait dur-kalk döngüleri

a. hacimsel sıcaklık verilerinden elde edilen, b. noktasal sıcaklık verilerinden elde edilen

$$Q = m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \tag{3.6}$$

Noktasal sıcaklık verileri ise ürünün 240 s proses edilmesi sonucunda elde edilmiştir. Bu sıcaklık verileri teflon silindir tabanından 11.285 cm yükseklikte şekil 3.3'te gösterilen noktadan alınmıştır. Noktasal sıcaklık ölçüm deneyleri sonunda ise ürünü absorbe ettiği güç değeri 338,27 W olarak hesaplanmıştır (Eşitlik 3.6) (Şekil 3.2.b).



Şekil 3.3 Sıcaklık verilerinin karşılaştırıldığı noktanın sistemin 3 boyutlu modeli içerisindeki konumu

3.2.2 Modelleme çalışmaları

Modelleme çalışmaları sırasında çözülmesi gereken kompleks eşitlikler ve bu eşitliklerin birbiri ile etkileşimlerinin çözümünde COMSOL V5.2 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik yazılımının kullanılması tercih edilmiştir. Bu çalışmalarda laboratuvar ölçekli sistem kullanılarak geliştirilen matematiksel model için deneysel olarak doğrulama çalışmaları ve iki farklı endüstriyel sistemde proses tasarım ve optimizasyon çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Belirlenen 3 sistemde kullanılan akışkan örnekler çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Simülasyon çalışmaları yapılan 3 sistemde kullanılan akışkan örnekler

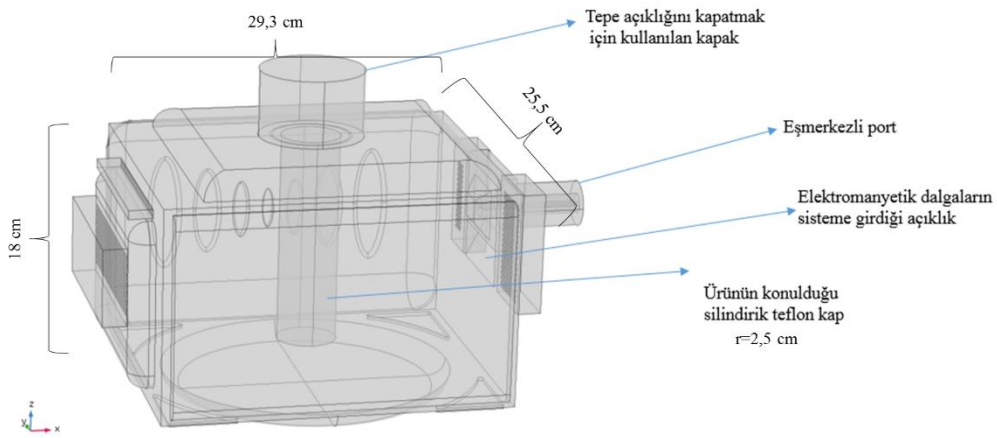
Laboratuvar ölçekli sistem	Saf su ve % 0,5 CMC çözeltisi
Endüstriyel sistem	Tüm-sıvı yumurta
Alternatif endüstriyel sistem	% 0,5 CMC çözeltisi

3.2.2.1 Sistem geometrilerinin oluşturulması

Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem: Yukarıda açıklandığı şekilde çalışmanın ilk aşamasını model doğrulama çalışmaları oluşturulmuştur. Model doğrulama çalışmaları amacıyla LG MS2022D model mikrodalga sistem modifiye edilmiş ve bu sistemden elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır. Sistem içerisinde ürün sıcaklık dağılımının belirlenmesi amacıyla mikrodalga kavite geometrisi, magnetron geometrisi ve dalga kılavuzu geometrisinin fiziksel boyutlar belirlenmiş ve bu özellikler hesaplamalı geometrinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Sistem geometrisinin oluşturulmasından sonra ürün parametreleri sistem başlangıç ve sınır koşulları belirlenmiş, ağ yapısının oluşturulmasından sonra eş zamanlı olarak kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı, ürün sıcaklık değişimi ve sıcaklık ve dönme hızına bağlı olarak akış dinamiğinde oluşan değişimler çözülmüştür.

Sistem kavitesi 29,3 cm genişliğinde, 25,5 cm derinliğinde ve 18 cm yüksekliğindedir. Kavite içerisinde yer alan farklı geometrik özellik ve delikler, elektromanyetik alan dağılımını etkileyebileceğinden, hesaplamalı geometri içerisinde aynen kullanılmıştır. Sıvı ürünlerin proses edilmesi amacıyla modifiye edildiğinden sistemin üst tarafında 3,385 cm çapında dairesel bir delik bulunmakta ve bu delikten mikrodalgaların dışarı sızmasını engellemek amacıyla da deliğin üzeri daha yüksek bir alüminyum kapak ile kapatılmıştır.

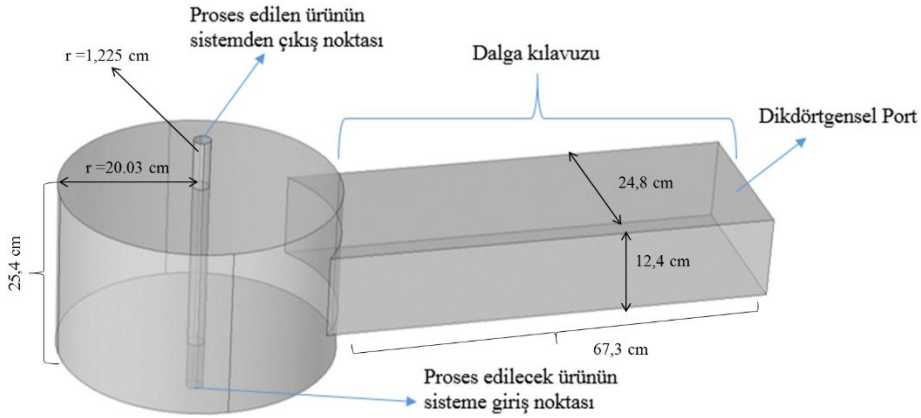
Proses edilecek ürün içerisindeki elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak sıcaklık değişimi ve akış dinamiği modelleme çalışmaları yapılırken, teflon silindirin mikrodalgaya tamamen transparan olduğu varsayılmıştır ($\varepsilon' = \varepsilon'' = 2$; Sperati ve Starkweather, 1961). Bu nedenle teflon silindir duvar kalınlığı yapılan çizimlerde kullanılmamıştır. Teflon silindir içerisindeki ürün yüksekliği 17,5 cm ve çapı ise 5 cm'dir. Bu kapsamda hazırlanan geometrik yapı ve kısımları şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 LG marka mikrodalga fırının matematiksel modelleme için ele alınan geometrik yapısı

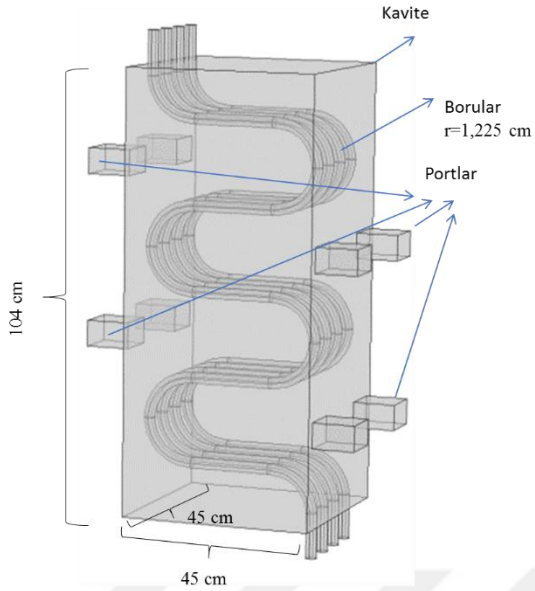
Sürekli akış mikrodalga sistem: Ürün sıcaklık değişimi temelinde, deneysel olarak doğrulama çalışmaları laboratuvar ölçekli sistemde tamamlandıktan sonra, akış ve dönme etkisinin endüstriyel ölçekli bir sistemde belirlenmesi ve bu kapsamda tasarım - optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla sürekli akış olan bir sistem kullanılmıştır. Sürekli akış mikrodalga sistemlerin tasarımında endüstriyel proses amacıyla genel olarak kullanılan silindirik kavite mikrodalga sistem baz alınmıştır. Sistem tasarım ve optimizasyon çalışmalarında sistem kavite geometrisi, ürün akışının sağlandığı boru sistemi (kavite içerisindeki boru lokasyonu ve ürün akış hızı) ve mikrodalga uygulama gücü ele alınmıştır.

Başlangıç geometrisi (Şekil 3.5) olarak, literatürde de sık olarak kullanılan, silindirik kavite kullanılmıştır. İlk simülasyon çalışmalarında kullanılan kavite yarıçapı 20,3 ve uzunluğu 25,4 cm'dir. Ürün akışının sağlandığı boru sisteminde, boruların mikrodalgaya geçirgen teflondan yapıldığı varsayılarak boru çeper kalınlığı tasarıma dahil edilmemiştir. Bu sistem boru iç çapı olarak 2,54 cm düşünülmüştür. Dalga kılavuzu ise dikdörtgenler prizması geometrisinde olup, genişliği 67,3 cm, derinliği 24,8 cm ve uzunluğu 12,4 cm olarak kullanılmıştır. Tasarlanan sürekli akış sistemine ait geometrik özellikler şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Endüstriyel ölçekte tasarımı yapılan sürekli akış mikrodalga sistemin hesaplamalı geometrisi

Alternatif endüstriyel sistem:Çalışmanın bu bölümünde halen endüstriyel proseslerde kullanılan, ENBIO Technology (İsviçre) (http://flowjet.pl/en/ 2018) firmasının mikrodalga ısıl işlem cihazı olarak ürettiği sistem baz alınmıştır. Bu kapsamda şekil 3.6'da gösterilen sistemin 8 adet magnetronunun olduğu ve 2450 MHz frekansla elektromanyetik dalga ürettiği kabul edilmiştir. Sistem kavitesinin uzunluğu 104 cm derinliği ve genişliği ise 45 cm'dir. Bu sistem içerisinde 4 adet 2,54 cm çaplı boru içerisinden akışın gerçekleştiği durumlar için tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Endüstriyel skalada alternatif sistem sürekli akış mikrodalga sistem hesaplamalı geometrisi

3.2.2.2 Ağ yapısının oluşturulması

Sonlu element çözümlerinde ağ yapısının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Ağ yapısının oluşturulması hem kompleks eşitliklerin çözümünün kolaylaştırılması için sistemi küçük parçalara bölmekte hem de çözülen eşitliklerin hangi alanda çözüldüğüne dair bilgi vermektedir.

Elektromanyetik alana dair çözüm yapılırken ağ yapısının elektromanyetik alan fiziğini doğru çözümlenmesi için eşitlik 3.7'de gösterilen Nyquist kriteri kullanılmıştır:

$$S_{\max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{m'\varepsilon'}} \tag{3.7}$$

Nyquist eşitliğinde λ, dalga boyu (m); c, ışık hızı (m/s); f, frekans (Hz); μ', bağıl geçirgenlik değerini; ε', dielektrik sabitini belirtmektedir. Bu kritere göre sistem içerisinde kurulan ağ yapısının maksimum değerinin, sistem içerisindeki dalga boyunun yarı uzunluğundan ya da ışık hızının frekans bağıl geçirgenlik ve dielektrik sabitine oranından küçük olması gerekmektedir.

Çizelge 3.5 Matematiksel model çalışmalarında farklı sistemlerde kullanılan ağ yapısı fiziksel özellikleri

Sistem	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
Laboratuvar ölçekli sistem	Dörtgensek element sayısı	195737
	Üçgensek element sayısı	30693
	Köşe element sayısı	7794
	Tepe element sayısı	3847
	Element sayısı	197733
	Ağ hacmi (cm^3)	18560
Endüstriyel sistem	Dörtgen element sayısı	87257
	Üçgen element sayısı	6614
	Köşe element sayısı	564
	Tepe element sayısı	34
	Element sayısı	87257
	Ağ hacmi (cm^3)	52470
Alternatif endüstriyel sistem	Dörtgen element sayısı	238264
	Üçgen element sayısı	24304
	Köşe element sayısı	5271
	Tepe element sayısı	424
	Element sayısı	238264
	Ağ hacmi (cm^3)	218100

Modelleme çalışmalarında, COMSOL çoklu fizik yazılımının ağ yapısı oluşturma özelliği kullanılarak sistem tetrahedral geometriden oluşan ağ yapısına bölünmüştür. çizelge 3.5'te bütün sistemler için kullanılan ağ yapısına dair fiziksel özellikler verilmiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak laboratuvar ölçekli sistem, endüstriyel sistem ve alternatif endüstriyel sistem için ağ boyutu, ağ hacminin element sayısına oranlanması ile elde edilen birim element hacminin küp kökü alınarak hesaplanmıştır (Eşitlik 3.8);

$$\sqrt[3]{\frac{\text{Ağ hacmi}}{\text{Element sayısı}}} = \text{Ağ boyutu} \tag{3.8}$$

Laboratuvar ölçekli sistem:

$$\sqrt[3]{\frac{18560}{197733}} = 0{,}45 \text{ cm} = 0{,}0045 \text{ m}$$

Endüstriyel sistem:

$$\sqrt[3]{\frac{52470}{87257}} = 0{,}85 \text{ cm} = 0{,}0085 \text{ m}$$

Alternatif endüstriyel sistem:

$$\sqrt[3]{\frac{218100}{238264}} = 0{,}91 \text{ cm} = 0{,}0091 \text{ m}$$

Nyquist eşitliği ile hesaplama yapılırken laboratuvar ölçekli sistem için 2450 MHz frekans değeri ε' içinse su (81) ve CMC ye ait (85) sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti değerlerinden sayısal olarak en büyük olanı kullanılmıştır. Endüstriyel sistem için 915 MHz frekans değeri ve sıvı yumurtaya ait sayısal olarak en büyük dielektrik sabiti değeri (64) ve alternatif sistem için 2450 MHz frekansta % 0,5 CMC çözeltisi için maksimum dielektrik sabiti (85) kullanılmış, ağ oluşturma çalışmalarında

elektromanyetik alan çözümü için gerekli maksimum element boyutu eşitlik 3.7 kullanılarak belirlenmiştir:

Laboratuvar ölçekli sistem:

$$\frac{2999792458}{2*2450000000\sqrt{(85*1)}} = 0{,}066 \text{ m}$$

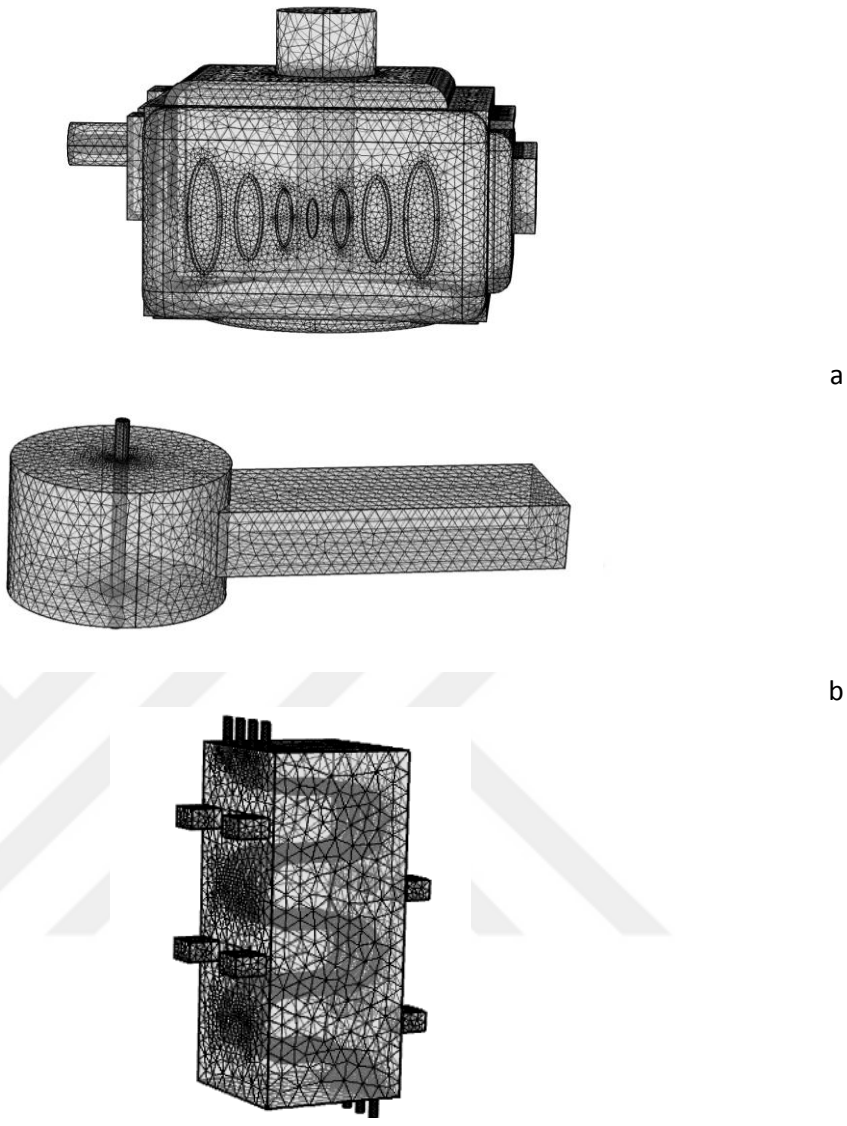
Endüstriyel sistem:

$$\frac{2999792458}{2*915000000\sqrt{(64*1)}} = 0{,}177 \text{ m}$$

Alternatif endüstriyel sistem:

$$\frac{2999792458}{2*2450000000\sqrt{(85*1)}} = 0{,}066 \text{ m}$$

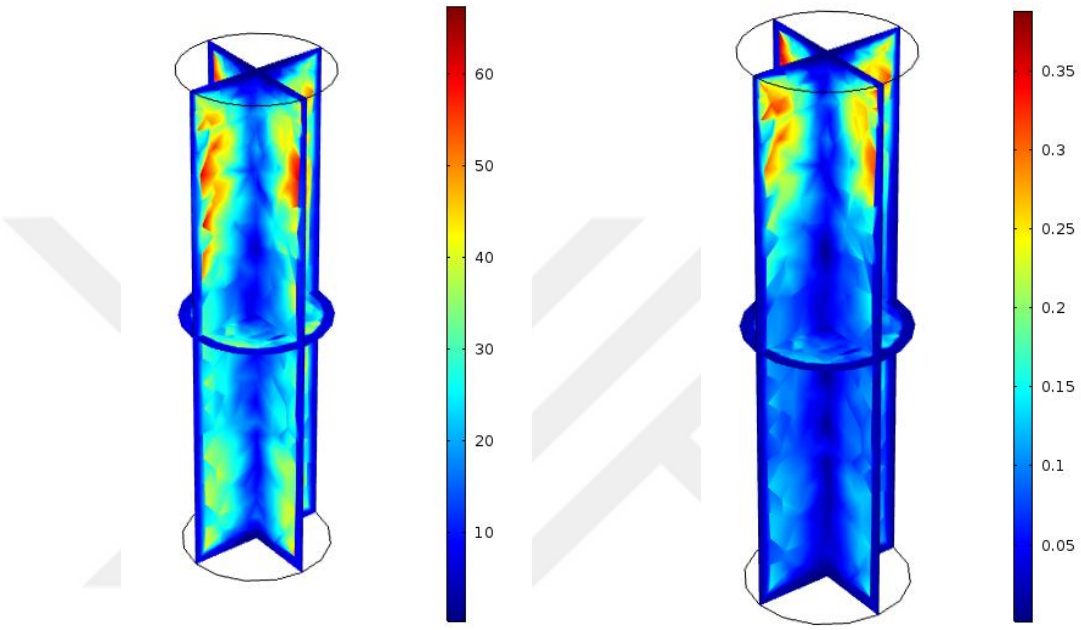
Belirtilen sistemlerde gerçekleştirilecek çözümlerde, sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı yanında, ürün sıcaklık değişiminin belirlenebilmesi amacıyla eş zamanlı olarak akış dinamiği ve ısı transferi denkliklerinin de çözülmesi gerektiğinden eşitlik da görüldüğü şekilde kullanılan ağ element boyutları, Nyquist eşitliğine göre belirlenen değerlerden daha küçük olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, her 3 sistem için oluşturulan ağ yapısı şekil 3.7.a,b,c'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Simülasyonlarda matematiksel çözüm için uygulanan ait ağ yapısı
a.Laboratuvar ölçekli sistem, b. sürekli sistem, c. alternatif endüstriyel sistem

Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan denklikler: Mikrodalga uygulama sırasında eş zamanlı olarak kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı, ürün sıcaklık değişimi ve uygulanan dönme hızına bağlı olarak ürün sıcaklık değişimlerinin eş zamanlı olarak çözülebilmesi amacıyla COMSOL çoklu fizik yazılımının radyo frekans (RF) modülü, ısı transferi (Heat Transfer) modülü ve sistem içerisinde gerçekleşecek doğal ve zorlamalı konveksiyon için hesaplamalı akış dinamiği (CFD) modülü kullanılmıştır. Bu modüller içerisinde sırasıyla elektromanyetik dalgalar, sıvı içerisinde ısı transferi ve laminer akış fizikleri ayrıca uygulanmıştır. Yapılan ön

simülasyon çalışmalarında 20 rpm dönme hızına kadar suyun kullanıldığı düşük viskoziteli durumda dahi türbülans oluşmadığı ayrıca belirlenmiştir. Şekil 3.8 ön simülasyon çalışmalarında 20 rpm hızında su ve % 0,5 CMC çözeltilerinde oluşan Reynold sayısı dağılımını göstermektedir. Çizelge 3.6'da ise 0 ve 20 rpm dönme hızında ürün içerisindeki hacimsel ortalama Reynold sayısı değeri verilmektedir.



a b

Şekil 3.8 Ön simülasyon çalışmalarında 20 rpm dönme hızında oluşan Reynold sayısı dağılımı

a. su, b. % 0,5 CMC çözeltisi

Çizelge 3.6 Dönme hızının Reynold sayısına etkisi

	0 rpm	20 rpm
Su	2.29	16,96
% 0,5 CMC çözeltisi	9.23×10^{-4}	0,06

Hem laboratuvar ölçekli sistem hem de endüstriyel sistem içerisinde gerçekleştirilen matematiksel model çalışmaları sırasında kavite içerisinde oluşacak elektromanyetik

alan dağılımı ve yoğunluğunun belirlenmesi için Maxwell eşitliklerinden faydalanılmıştır (Eşitlik 3.9).

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu_r} \times \vec{E}) - \frac{\omega^2}{c}(\varepsilon' - i\varepsilon'' \vec{E}) = 0 \tag{3.9}$$

Maxwell eşitliklerinin çözümü sırasında laboratuvar ölçekli sistem için 2450 MHz frekans (laboratuvar ölçekli sistem ve alternatif endüstriyel sistem için) ve endüstriyel sistem için 915 MHz (endüstriyel sistem için) frekans baz alınmıştır. Sistem içerisine elektromanyetik dalgaların giriş yaptığı bölüm olarak ele alınan "port" olarak laboratuvar ölçekli sistemde TEM modunda elektromanyetik dalga ileten eşmerkezli port kullanılırken; endüstriyel sistemde ise TE10 modunda elektromanyetik dalga ileten dikdörtgen port kullanılmıştır. Yukarıda da açıklandığı şekilde laboratuvar ölçekli sistem çalışmalarında iki ayrı model doğrulama (ürün hacimsel sıcaklık değişimi ve ürün içerisinde noktasal bazlı sıcaklık değişimi) sistem gücü 375,19 W ve 338,53 W olarak kullanılmış ve bu güç değerleri sisteme deneysel çalışmalarla süresi belirlenen dur-kalk döngüsü şeklinde verilmiştir. Endüstriyel sistem kapsamında yapılan çalışmalarda ise, yapılan ön çalışmalar sonucunda ürün için uygun olan sıcaklıklara 4000 W güç uygulaması sırasında ulaşıldığı belirlenmiş ve tasarım çalışmaları sırasında bu güç değeri temel olarak kullanılmıştır. Her iki sistemde de kavite duvarlarına çarpan elektromanyetik dalgaların tam olarak yansıdığı mükemmel elektrik iletkenliği sınır koşulu kullanılmıştır (Eşitlik 3.10):

$$n \times \vec{E} = 0 \tag{3.10}$$

Ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımın belirlenmesinde kullanılan enerji denkliği ve ürün içerisinde absorbe edilen güç değerinin hesaplanması için aşağıdaki denklikler kullanılmıştır (Eşitlikler 3.11 ve 3.12):

$$v_r \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T + Q \tag{3.11}$$

$$Q = \sigma \left|\vec{E}\right|^2 = \frac{1}{2}\omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \sigma \left|\vec{E}\right|^2 \tag{3.12}$$

Sıvı ürünlerin akışı sırasında hız ve basınç değişimlerinin belirlenmesi ise süreklilik (Eşitlik 3.13) ve momentum (Eşitlik 3.14) eşitliklerinin çözümü ile sağlanmıştır. CMC'nin Newtonumsu olmayan akış olarak ele alındığı durum için görünür viskozitenin hesaplanması için Power Law eşitliği (Eşitlik 3.4) kullanılmıştır.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rpv_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)=0 \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
&\rho\left(\frac{\partial v_r}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}-\frac{v_\theta^2}{r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=\\
&\qquad -\frac{\partial P}{\partial r}+\mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_r)\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right]\\
&\rho\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_\theta}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{v_r v_\theta}{r}+v_z\frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right)=\\
&\qquad -\frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial \theta}+\mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_\theta)\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2}+\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}+\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}\right]\\
&\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \theta}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\\
&-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right]+\rho g z
\end{aligned} \tag{3.14}$$

3.2.2.3 Başlangıç ve sınır koşulları

Başlangıç koşulları: Belirtilen 3 sistem için gerçekleştirilen çözümlerde kullanılan başlangıç ve sınır koşulları çizelge 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir. Konvektif ısı transfer katsayısı (h) değeri 10 W/m².K olarak kullanılmış ve ortam sıcaklığı ise 20 °C olarak kabul edilmiştir. Dönme uygulanan simülasyonlarda, çizelge 3.8'de gösterildiği şekilde teflon silindir (boru) yüzeylerine radyal yönde dönme hızı sınır koşulu uygulanılmıştır. Bu kapsamda, kullanılan yazılımda koordinat sistemi, Kartezyen koordinat düzleminden silindirik koordinat düzlemine çevrilmiş ve aşağıda hesaplandığı şekilde dönme yüzeyinde kullanılacak hız değeri belirlenmiştir (Eşitlik 3.15).

$$v = 2\cdot\pi\cdot\zeta\cdot sys2.r \tag{3.15}$$

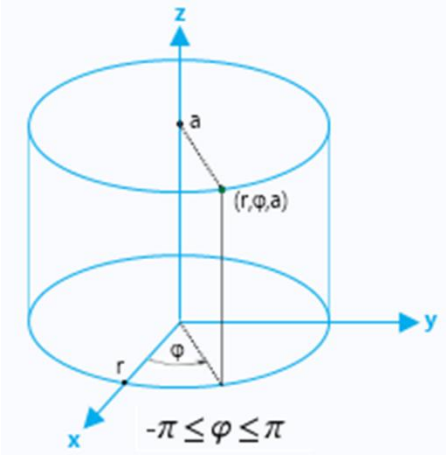
Bu eşitlikte kullanılan ζ dönme frekansının rpm cinsinden değeridir. sys2.r değişkeni ise COMSOL programı içerisinde gömülü olan silindirik koordinat sisteminde (Şekil 3.9) radyal yöndeki koordinatın merkez noktasından uzaklık değeridir.

Çizelge 3.7 Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan başlangıç koşulları

Sistemler	Çalışma	Isı transferi modülü	Akışkanlar dinamiği modülü	Elektromanyetik dalga modülü
LG MS2022D	Hacimsel doğrulama	T_i=16,43 °C	u_0=0 m/s v_0=0 m/s w_0=0 m/s	P_0=375,19 W
	Noktasal doğrulama	T_i=18,723 °C		P_0=338,27 W
	Dönme etkisi	T_i=16,43 °C		P_0=375,19 W
Endüstriyel sistem	Tasarım	T_i=6,85 °C	u_0=0 m/s v_0=0 m/s w_0=0,05 m/s	P_0=4000 W
	Optimizasyon	T_i=6,85 °C		
Alternatif endüstriyel sistem	Tasarım	T_i=10 °C	u_0=0 m/s v_0=0 m/s w_0=0,05 m/s	P_0=2500 W
	Optimizasyon	T_i=10 °C		

Çizelge 3.8 Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan sınır koşulları

Sistemler	Çalışma	Isı transferi modülü	Akışkanlar dinamiği modülü	Elektromanyetik dalga modülü
LG MS2022D	Hacimsel doğrulama	h=10 W/m^{2}K T_o=20 °C	U_w=v_w U_w=2,5 rpm	Mükemmel elektrik iletkeni $n \times E = 0$
	Noktasal doğrulama			
	Dönme etkisi		U_w=2,5-20 rpm	
Endüstriyel sistem	Tasarım	h=10 W/m^{2}K T_o=20 °C	U_w=2,5-20 rpm	Mükemmel elektrik iletkeni $n \times E = 0$
	Optimizasyon			
Alternatif endüstriyel sistem	Tasarım	h=10 W/m^{2}K T_o=20 °C	Kaymazlık (no slip)	Mükemmel elektrik iletkeni $n \times E = 0$
	Optimizasyon			



Şekil 3.9 COMSOL çoklu fizik programı içerisinde gömülü olarak bulunan silindirik koordinat sistemi

3.2.2.4 Matematiksel modellerde kullanılan çözümleyiciler

Geliştirilen matematiksel modelleme çalışmalarında laboratuvar ölçekli sistemde zamana bağlı (transient) endüstriyel sistemlerde ise yatışkın koşullarda çözüm yapılmıştır. COMSOL yazılımı, sonlu element problemlerinde ortaya çıkan lineer denklemlerin çözümünde direkt ve yinelemeli yöntemler olarak adlandırılan 2 farklı algoritma kullanmaktadır. Direkt yöntemler LU ayrıştırması (Cholesky yöntemi) yöntemine dayanmakta olup PARDISO (Parallel Sparse Direct Solver), MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver) ve SPOOLES (SParse Object Oriented Linear Equations Solver) olmak üzere 3 farklı çözüm yaklaşımından oluşmaktadır. Bu çalışmada, elektromanyetik alan çözümü için MUMPS, ısı ve momentum transferi içinse PARDISO yöntemi kullanılmıştır.

Ağ yapısının problem fiziğine göre oluşturulması ve çözüm yöntemlerinin iyi kurgulanması durumunda kullanılacak yöntemler arasında önemli bir fark oluşması beklenmese de belirtilen üç yöntem arasındaki temel fark bilgisayar donanımına yaptığı yük ve çalışma hızı noktasındadır. PARDISO çözüm yöntemi direkt çözümler arasında en hızlı yöntem ve SPOOLES çözüm yöntemi ise en yavaş olanıdır. Aynı zamanda SPOOLES direkt çözümler arasında en az RAM ihtiyacı duyan çözüm yöntemi iken bütün direkt çözüm yöntemleri fazla RAM ihtiyacı göstermektedirler. Ancak, MUMPS ve PARDISO yöntemleri gerektiği zaman çözümün bir kısmını çekirdek dışına

yükleyebilmekte ve çözüm sırasında ihtiyaç duyulması halinde sistem hard diskini de kullanabilmektedir (https://www.comsol.com 2018). Bu kapsamda, gerçekleştirilen farklı ön simülasyon çalışmalarına da bağlı olarak yukarıda belirtilen yöntemlerin kullanımına karar verilmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları HP Z440 model 48 GB RAM ve 3.5 GHz işlemci hızına sahip iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı modeller için gerekli RAM ihtiyacı, model içeriğine göre değişmekle birlikte genel olarak maksimum 16 GB RAM kullanımı ile laboratuvar ölçekli sistemde gerçekleştirilen yatışkın olmayan simülasyon çalışmaları ≈9 saatte tamamlanmıştır.

3.2.2.5 Endüstriyel sistemlerde tasarım ve optimizasyon çalışmaları

Endüstriyel sistemlerde gerçekleştirilen tasarım ve optimizasyon çalışmaları, laboratuvar ölçekli sistem için gerçekleştirilen ve deneysel olarak doğrulaması yapılan matematiksel model temelinde yapılmıştır. Bu kapsamda COMSOL çoklu fizik yazılımının optimizasyon modülünde Nelder-Mead yöntemi kullanılmıştır. Birden fazla değişkene sahip fonksiyonların yerel minimum noktalarının bulunması için tercih edilen Nelder-Mead yöntemi, iki bağımsız değişken bulunması durumunda hayali bir üçüncü nokta kullanılarak uzay düzleminde oluşturulan üçgen geometri üzerinde en olumsuz sonucu veren noktanın bertaraf edilmesi ve diğer iki noktaya bağlı olarak tekrar bir üçgenin oluşturulması ile devam eden bir yaklaşımdır. Yinelenen denemeler sonucunda, oluşturulan üçgenler giderek bir noktaya yakınsamakta ve bu nokta optimum değer olarak belirlenmektedir (Nelder ve Mead 1965).

Bu çalışmada endüstriyel sistemde tasarım ve optimizasyon çalışmaları ürün tarafından maksimum enerji absorplanması için sistem geometrisinin (mikrodalga kavitesinin) optimizasyonu ve çıkış sıcaklık tekdüzeliğinin sağlanması için sistem gücü ve akış hızının optimizasyonu olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir:

Maksimum enerji absorblanması amacıyla sistem geometrisi optimizasyonu: Önceden de (Çizelge 3.4) belirtildiği şekilde endüstriyel sistem tasarım çalışmasında ürün olarak sıvı yumurta kullanılmıştır. Endüstriyel sistem tasarımında, istenen çıkış sıcaklığına ulaşmak adına yapılan ön çalışmalar sırasında gerekli güç ve akış hızı sırasıyla 4000 W ve 0,05 m/s (0,48 L/dk.) olarak belirlenmiştir. Bu değerler temelinde sistem içerisinde akış halinde bulunan ürün tarafından maksimum mikrodalga enerjisin absorblanması ve ürünün sistem çıkışında (fiziksel olarak mümkün olmasa da) maksimum sıcaklığa ulaşabilmesi amacıyla mikrodalga kavite geometrisi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, silindirik kavitenin xy-kesitine ait dairenin a ve b-yarıeksen boyutları kontrol parametreleri olarak belirlenmiştir. Bu optimizasyon çalışmasının özeti çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Çizelge 3.9'da belirtilen sınırlamalardan en düşük değer olarak kullanılan 0,15 m değerine kullanılan dalga kılavuzu boyutuna göre karar verilmiştir. 0,5 m'den büyük değerlerde ise kavitenin çok büyümesi ve fiziksel olarak uygun olmayan bir geometrinin oluşması karar mekanizmasında etkili olmuştur.

Çizelge 3.9 Endüstriyel sistemde yapılan geometri optimizasyonunda kullanılan hedef fonksiyon ve parametreler

Geometri optimizasyonu	
Hedef fonksiyon	$max\bar{T}$
Kontrol değişkenleri	r_a r_b
Sınırlamalar	0,15 m<a<0,5 m 0,15 m<b<0,5 m

Sistem gücü ve akış hızı optimizasyon: Örnek ürün olarak ele alınan sıvı yumurtada pastörizasyonun sağlanabilmesi için en az 60 °C sıcaklığa ulaşılması elzem bir nokta olup 65 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda albümin denatüre olmaktadır (mikrodalga uygulama sistemlerinde ürün sıcaklık dağılımına bağlı olarak, hedef ortalama sıcaklığın 65 °C seçilmesi durumunda lokal olarak daha yüksek sıcaklıklarında meydana gelmesi olasılığı düşünülerek sıcaklık aralığı 60 °C olarak seçilmiştir). Bu kapsamda, belirlenen sıcaklık değerine ulaşırken son ürün kalitesi açısından proses sırasında ürün içerisinde

65 °C sıcaklığın üzerine çıkılmaması büyük önem taşımakta ve aksi durumda ürün kayıpları meydana gelmektedir. Bu sorunun çözümü için optimize edilmiş sistem geometrisi kullanılarak ürünün çıkış sıcaklığı hedef fonksiyon olarak kabul edilmiş ve bu hedef doğrultusunda sistemde uygulanan mikrodalga gücü ve akış hızının optimizasyonu temelinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasının özeti çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Endüstriyel sistemde yapılan güç ve akış hızının optimizasyonunun özeti

Güç ve akış hızı temelimde optimizasyon	
Objektif fonksiyon	$min\Delta T$
Kontrol değişkenleri	P v
Sınırlamalar	100 W< P<10000 W 0,005 m/s<v<0,5 m/s 332,15 K <Tf <334,15 K

Alternatif endüstriyel sistemde gerçekleştirilen sistem geometrisi ve sistem gücü-akış hızı optimizasyon çalışması: Bu bölümde halen endüstriyel proseslerde kullanılan (http://flowjet.pl/en/ 2018) ve iç tasarımı net olarak bilinmeyen bir sistem temelinde yapılan ön simülasyon çalışmalarına göre mümkün olabilecek geometrik özellikler dikkate alınarak sistemde uygulanan mikrodalga gücü ve sıvı ürün akış hızı temelinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda önce sistemden çıkan ürünün sıcaklık dağılımının tekdüze olması amacıyla sistem içerisinde bulunan 4 helikalimsi borunun aralarındaki uzaklığın optimize edilmesi için bir çalışma yapılmıştır. Bunun için soldan sağa 1 ve 4. boru ile 2 ve 3. borudaki ürüne oluşan sıcaklık dağılımının simetrik olduğu ele alınmış buna göre 1. ve 2. boru arasındaki sıcaklık farkı hedef fonksiyon olarak bu iki borunun simetri merkezinden uzaklığı ise kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır. Daha sonra optimum geometrik özellikler kullanılarak ürün çıkış sıcaklığının 60 °C ye ulaşması için gereken mikrodalga gücü ve ürün akış hızı optimize edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmalarının özeti çizelge 3.11 ve 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Alternatif endüstriyel sistem için geometri optimizasyonunun özeti

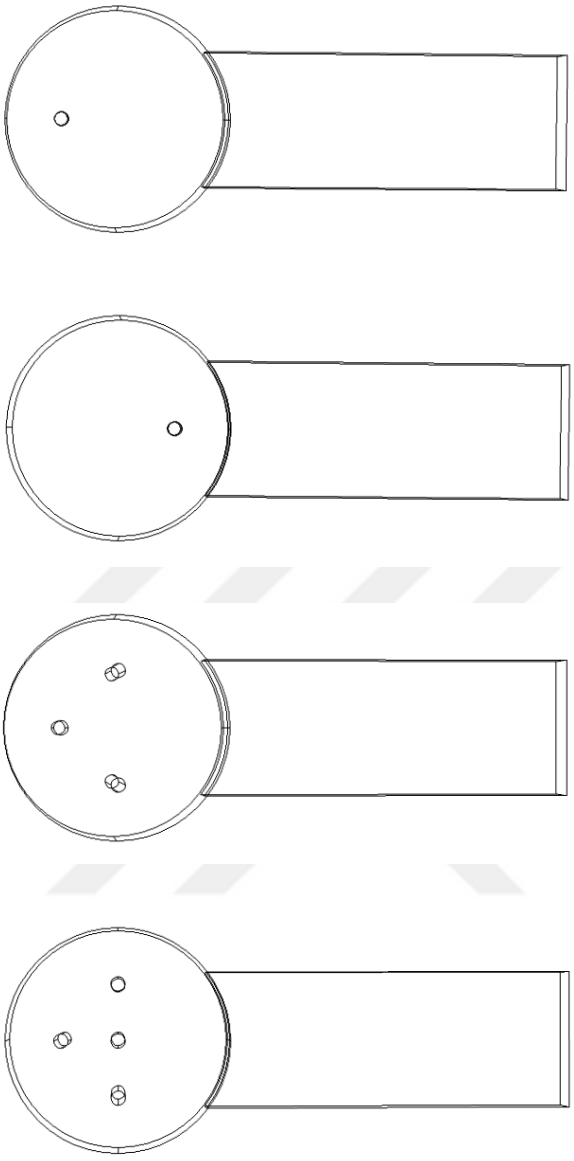
Geometri Optimizasyonu	
Hedef fonksiyon	$min\Delta T$
Kontrol değişkenleri	X_1 X_2
Sınırlamalar	0,01 m $<X_1<$ 0,02 m 0,026 m $<X_2<$ 0,074 m

Çizelge 3.12 Alternatif endüstriyel sistemde güç ve akış hızının optimizasyonunun özeti

Güç ve akış hızı optimizasyonu	
Hedef fonksiyon	$max(\overline{T} = Tf)$
Kontrol değişkenleri	P v
Sınırlamalar	500 W <P <5000 W 0,01 m/s < v <0,5 m/s $T_f \leq$ 333 K $T_m \leq$ 338 K

3.2.2.6 Endüstriyel sistemde sıcaklık dağılımına, akışın gerçekleştiği boru sayısı ve konumunun etkisi

Çalışmanın bu bölümünde tasarlanan ilk endüstriyel sistem üzerinden öncelikle boru lokasyonunun ve sonrasında da üretim kapasitesinin artırılabilmesi amacıyla boru sayısının artırılması ele alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle sistem içerisinde bulunan tek boru önde ve tek boru arkada (merkezden kavitenin yarıçapının yarısı kadar uzaklıkta) olacak şekilde boru lokasyonunun (Şekil 3.10) sıcaklık dağılımı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalar sırasında 5000 W mikrodalga gücü ve 0,05 m/s hızda ürün girişi verilmiştir. Daha sonra endüstriyel üretim kapasitesinin artırılabilmesi adına bir tane 3 borulu, bir tane 4 borulu ve iki tane 5 borulu sistem tasarımı yapılmış (Şekil 3.10) ve farklı borulardaki sıcaklık dağılımları incelenmiştir.



a

b

c

d

Şekil 3.10 Endüstriyel skalada üretim kapasitesini artırmak amacıyla tasarlanan çoklu-borulu sistemler

a.3 borulu sistem, b. 4 borulu sistem, c. 5 borulu sistem düzen 1, d.5 borulu sistem düzen 2

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Endüstriyel gıda proses uygulamalarına sıvı ürünlere uygulanacak ısıl işlem amacıyla, ısı değiştiriciler gibi, genel olarak kondüksiyon ve konveksiyon prensibine bağlı geleneksel sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerin kullanılmasındaki en önemli problem boru ya da ısıl işlem uygulanan yüzeyde meydana gelen aşırı sıcaklık yükselmesine bağlı olarak fazla proses edilmiş (over-processed) bölgelerin oluşmasıdır. Bu durum son ürün kalitesinin gerek duyusal olarak yabancı tat ve koku oluşması gerek reolojide meydana gelen pıhtı oluşmaları gerekse oluşan kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak son üründe istenmeyen ve/veya tüketimi halinde tüketici sağlığına zararlı bileşikler oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sıvı ürünlerdeki, viskoziteye de bağlı olarak meydana gelen laminer akış profilinden dolayı proses tasarım çalışmaları (laminer akış durumunda silindirik bir boruda merkezde akışkan hızının ortalama akışkan hızının 2 katı olmasından dolayı) boru içerisinde merkez akış hızına göre yapılmakta ve bu nedenle ürün genel olarak fazla proses edilmektedir. Farklı katı ürün proseslerinde ısıl işlem amacıyla inovatif yöntemlerden olan mikrodalga ve radyo frekans gibi teknolojiler sanayide önemli yer bulmaya başlamış olsa da sıvı ürünlerin prosesinde bu teknolojilerin kullanımı halen yeni bir alan olarak kabul edilmektedir.

Daha önceden de bahsedildiği üzere mikrodalga sistemler hacimsel ve hızlı bir ısıtma sağlayarak genel olarak kalite üzerinde olumlu bir etki sağlasa da ürün içerisinde tekdüze olarak oluşmayan elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak tekdüze olmayan sıcaklık profilinin ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple, konvansiyonel mutfak-laboratuvar ölçekli sistemlerde sistem içerisinde döner tabla kullanılması, elektromanyetik alanın sistem içerisinde dağıtılması amacıyla dağıtıcı aparat yerleştirilmesi gibi yöntemler kullanılarak ürün içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmeye çalışılmaktadır. Sıvı ürünlerin mikrodalga sistemlerde endüstriyel proses koşullarında proses edilmesi çalışmaları nispeten yeni bir alan olması sebebiyle ürün içerisinde tekdüze sıcaklık dağılımı elde etmek için yapılan çalışmaların sayısı da kısıtlıdır. Bu amaçla akışın gerçekleştiği borunun helikal bir formda olması ya da akışın olduğu boruya dönme hareketinin verilmesi gibi yöntemler halen literatürde bulunan önemli çalışmalardır. Bunların dışında genel olarak silindirik geometrili

mikrodalga kavite içerisinde sistem merkezinden geçen boruda akan ürüne, akış sırasında mikrodalga uygulaması en fazla çalışılan konu olarak göze çarpmaktadır.

Bu doğrultuda bu çalışmada öncelikle laboratuvar ölçekli bir sistemde matematiksel model geliştirilmesi ve bu modelin farklı koşullarda deneysel olarak doğrulanması konusunda çalışmalar yapılmış, sonrasında endüstriyel ölçekli sürekli bir sistemde sistem geometrisi optimizasyon ve proses tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise halen endüstriyel proseslerde kullanılan bir sistemde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve optimizasyon çalışmaları ürün sıcaklık profilinin tekdüze olması hedefine gerçekleştirilmiştir.

4.1 Laboratuvar Ölçekli Mikrodalga Sistemde Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

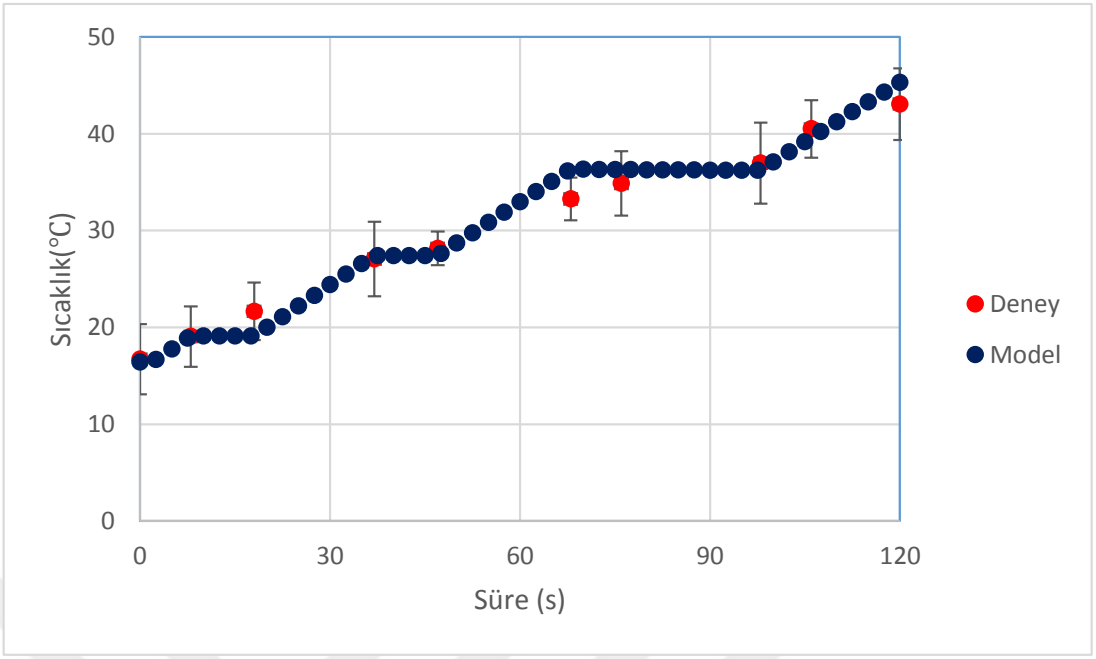
4.1.1 Deneysel verilerle matematiksel model doğrulama çalışmaları

Materyal ve Yöntem bölümünde detaylı olarak açıklanan matematiksel model çalışmalarından sonra, geliştirilen modellerin deneysel olarak doğrulanma çalışmaları için laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde saf su ve % 0,5 CMC kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları matematiksel model sonuçları ile hacimsel ortalama sıcaklık ve noktasal sıcaklık değişimi açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sistem dönme hızı olan 2,5 rpm ‘de gerçekleştirilmiş olup; 500 W güç seçeneği kullanılmıştır. 500 W güç opsiyonunun kullanılması durumunda, bölüm 3.2.1’de de detaylı olarak açıklandığı gibi hacimsel ortalama sıcaklık için 375,19 W ve noktasal sıcaklık değişimi için 338,27 W değerleri elde edilmiştir.

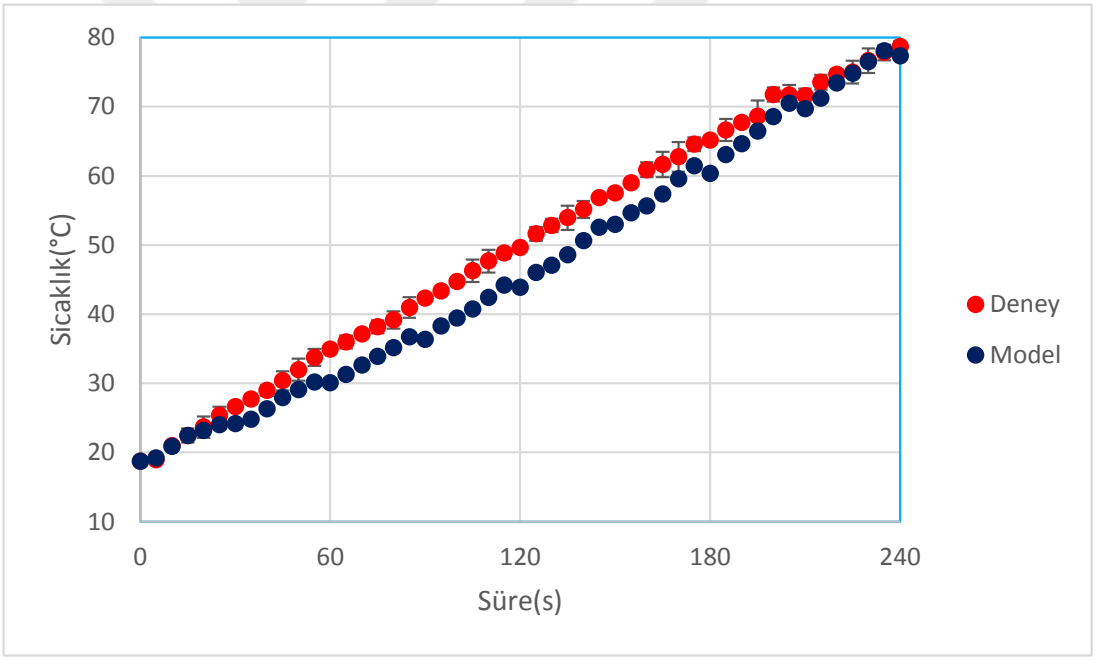
Matematiksel model sonuçları ve deneysel sonuçların karşılaştırılması şekil 4.1 ve 4.2 de gösterilmektedir. Şekil 4.1.a ve 4.1.b su için hacimsel ve noktasal sıcaklık doğrulamalarını gösterirken aynı şekilde şekil 4.2.a ve 4.2.b de % 0,5 CMC çözeltisi için hacimsel ve noktasal sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Hacimsel ortalama sıcaklık değişimleri kapsamında model doğrulama sonuçları noktasal sıcaklık değişimlerine göre, görsel olarak da incelendiği gibi, daha olumlu

görülmektedir. Bu durum, deneyler sırasında noktasal ölçümün yapılacağı koordinatların 3 boyutlu düzlemde belirlenmesi (yapılabilecek birkaç mm'lik hata dahi elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak önemli sıcaklık farklarına sebep verebilmektedir), ürüne dönüş hareketinin verilmesinde dolayı fiber optik probun sıvı üründe oluşan hıza bağlı olarak hareket edebilmesi gibi deneysel hatalarla açıklanabilmektedir. Ayrıca, laboratuvar ölçekli sistemde magnetronun ısınmasına bağlı olarak düzenli bir dur-kalk döngüsünün elde edilememesi (farklı deneyler sırasında farklı döngülerin oluşması) de noktasal sıcaklık ölçümünü etkileyen bir unsur olarak göze çarpmıştır. Bunlara ek olarak, düzensiz dur-kalk döngülerinin oluşması, bu döngülerin modelde kullanılmasında da problem teşkil etmiş ve bu durum direkt olarak ürün sıcaklık değişini etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkmıştır.

% 0,5 CMC çözeltisi kullanılan simülasyon çalışmalarında, yöntem bölümünde de açıklandığı şekilde, ürün viskozite değişimi hem Newtonumsu akışkan hem de Newtonumsu olmayan akışkan olarak ele alınmıştır. Şekil 4.2.a ve şekil 4.2.b'de görüldüğü üzere doğrulama çalışmaları sırasında Newtonumsu yaklaşım ve Newtonumsu olmayan yaklaşım arasında fark gözlenmemiş olup uygulanan dönme hızında oluşan kayma kuvvetinin viskozite değişimini önemli olarak etkileyememesi bu durumu açıklamaktadır.



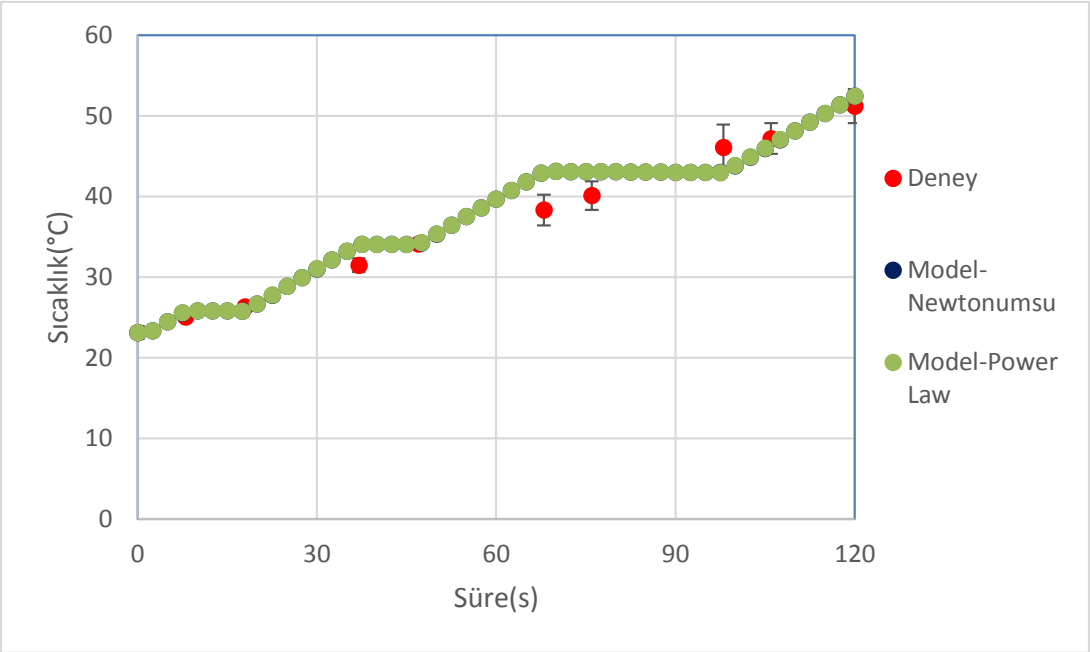
a



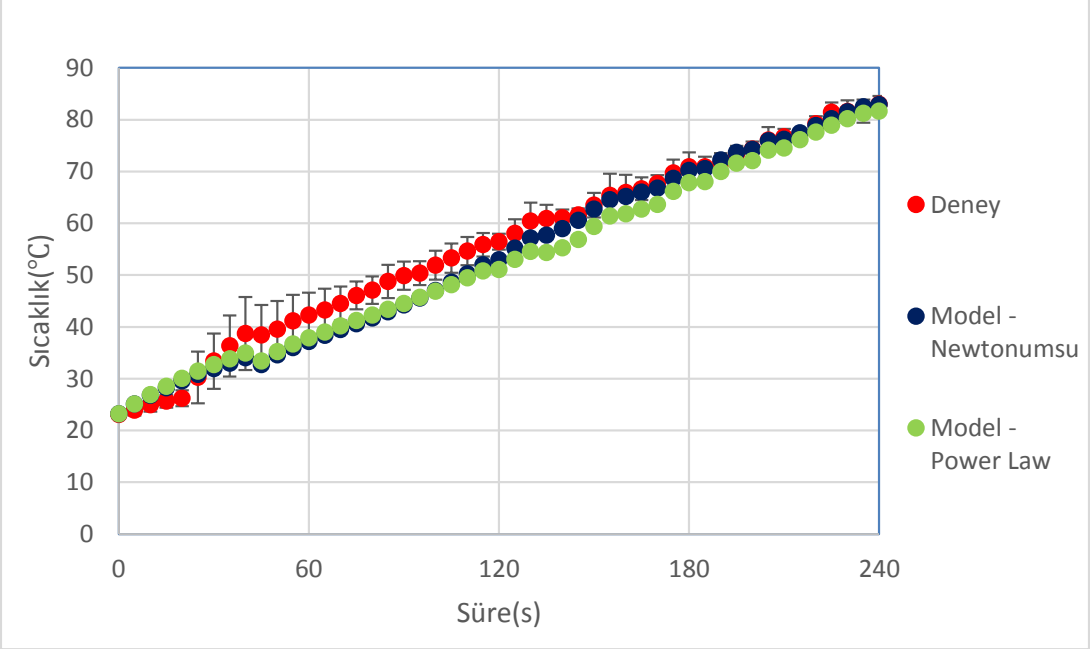
b

Şekil 4.1 Su kullanılarak deneysel olarak elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması

a. Hacimsel sıcaklık ortalaması, b. Noktasal sıcaklık değişimi



a



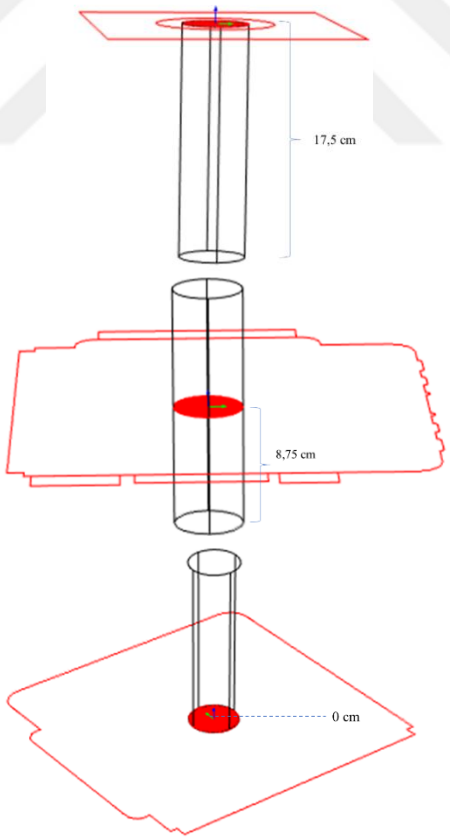
b

Şekil 4.2 % 0,5 CMC kullanıldığında deneysel olarak elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması

a. Hacimsel sıcaklık ortalaması, b. Noktasal sıcaklık değişimi

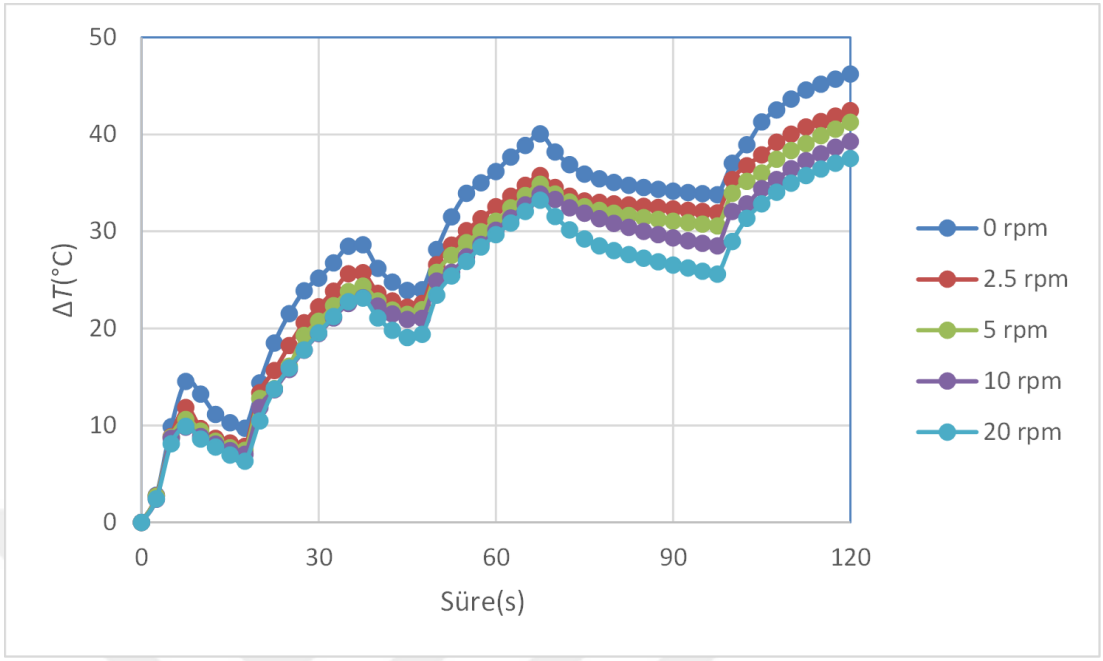
4.1.2 Dönme hızının sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi

Deneysel veriler kullanılarak matematiksel model doğrulama çalışması tamamlandıktan sonra, laboratuvar ölçekli sistemde su ve % 0,5 CMC çözeltisine uygulanacak dönme hızının ürün sıcaklık dağılımı ve sıcaklık tekdüzeliği üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ürünün dönmediği (0 rpm) ve 2,5, 5, 10 ve 20 rpm hızlarla dönme hızı uygulandığı durumlarda simülasyon çalışmaları gerçekleştirilerek ürün sıcaklık değişimi belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda teflon silindir boruda bulunan ürünün bütün hacminde ve üst yüzey, orta yüzey ve alt yüzeyinde (Şekil 4.3) oluşan maksimum - minimum sıcaklık farkı temelinde ürün sıcaklık dağılımının tekdüzeliği karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4 ve 4.5 su; şekil 4.6 ve 4.7 ise % 0,5 CMC çözeltisi için dönme hızının etkisi ile meydana gelen ΔT (maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark) değeri değişimini göstermektedir.

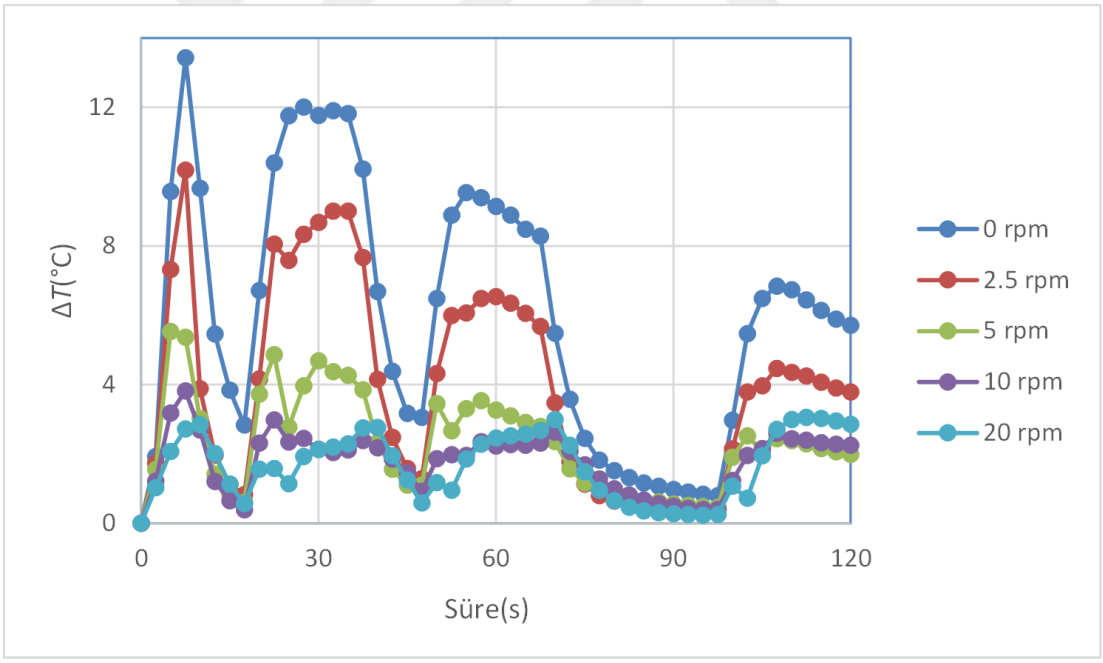


Şekil 4.3 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde sıcaklık profillerinin analiz edildiği farklı kesitler

a.üst yüzey, b.orta kesit, c.alt yüzey



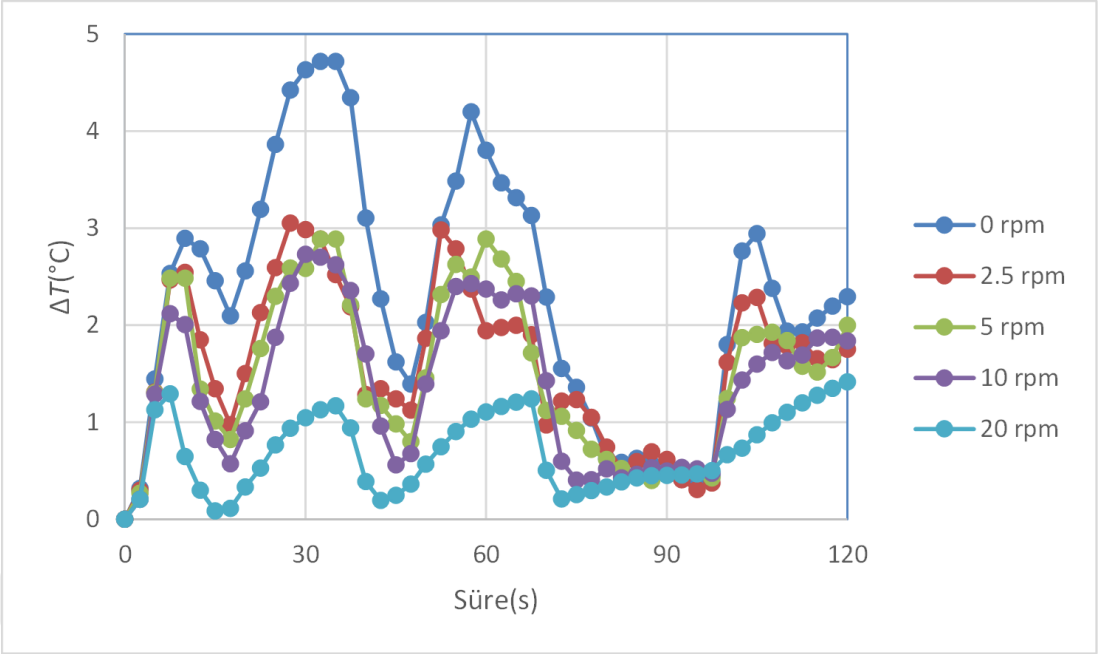
a



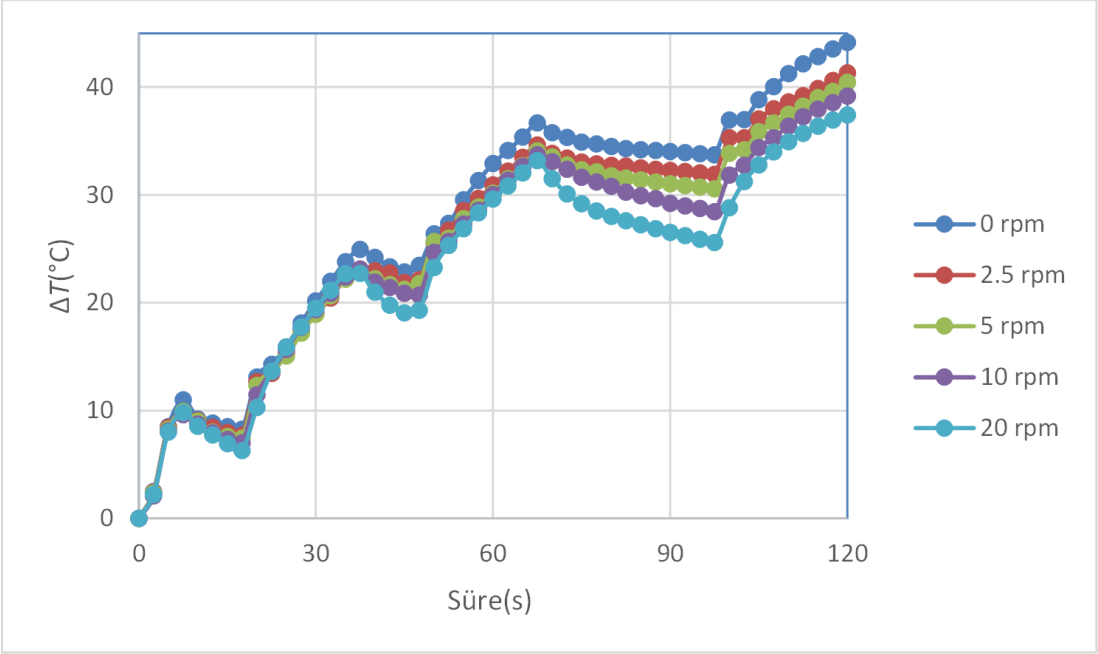
b

Şekil 4.4 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak suyun kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün toplam hacminde ve üst kesitinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark

a. toplam hacim, b. üst yüzey



a



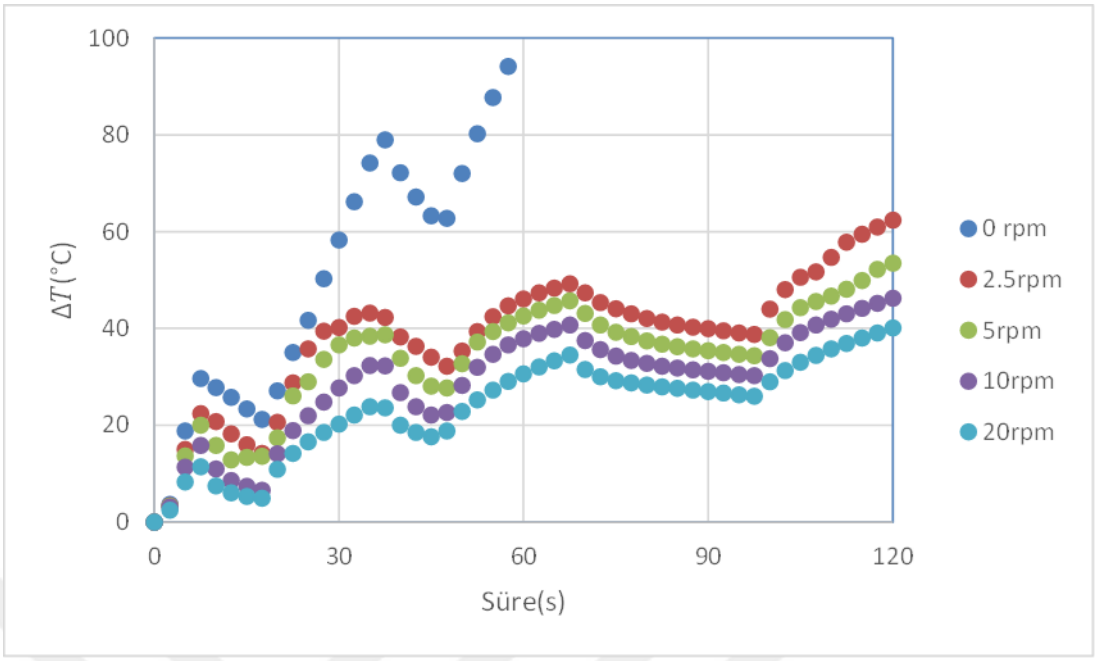
b

Şekil 4.5 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak suyun kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün orta ve dikey kesitlerinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark

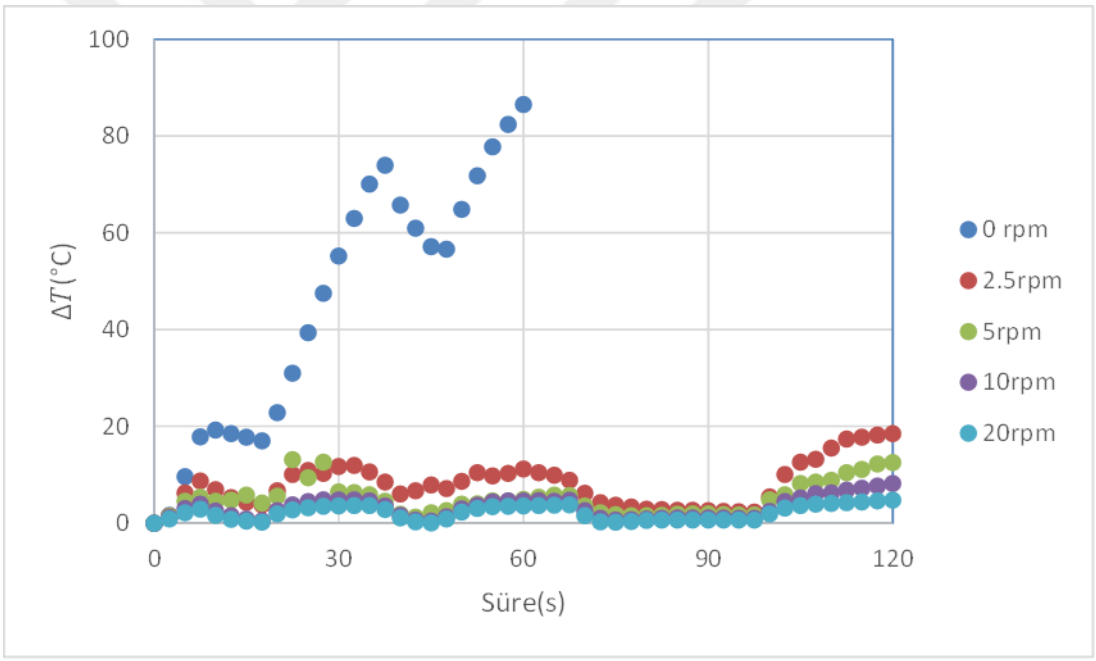
a. orta kesit, b. dikey kesit

Şekil 4.4 ve 4.5'te görüldüğü üzere ürünün su (düşük viskoziteli Newtonumsu sıvı) olması durumunda dönmenin olmadığı modelde elde edilen sıcaklık farkları çok fazla olmamaktadır. Bunun sebebi olarak da viskozitesinin düşük olması sebebiyle sıcaklık farkı oluşması durumunda ürün içerisinde meydana gelen doğal konveksiyon olayı doğrultusunda karışma sağlanmasıdır. Böylece ürün içerisinde aşırı sıcaklık farkları meydana gelmemektedir. Fakat şekil 4.6 ve 4.7'de verilen % 0,5 CMC çözeltisine ait sıcaklık farkları incelendiğinde, dönmenin olmadığı koşulda oluşan sıcaklık farkının çok yüksek olduğu gözlenmektedir. CMC çözeltisinin suya göre daha yüksek bir viskoziteye sahip olması sebebiyle doğal konveksiyon olayı kısıtlı olarak gerçekleşmekte ve dönme hızı arttıkça dönme hareketinin etkisi doğal konveksiyonu baskılamakta ve böylece sıcaklık farkının azalması daha etkin olarak gözlenmektedir.

Ürün olarak su ve % 0,5 CMC'nin kullanıldığı durumlarda laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde maksimum ve minimum sıcaklık farklarının incelendiği kesitlerde sıcaklık farkında oran olarak en az azalma suyun kullanıldığı durumda orta kesitte % 23,6 azalma ile elde edilirken tekdüzelik artışının en çok görüldüğü kesit % 0,5 CMC çözeltisinin ürün olarak kullanıldığı durumda % 95,8'lik oranla üst yüzeyde görülmüştür. Bu durumun sebebi doğal konveksiyon ile karışmanın etkin şekilde gözlendiği düşük viskoziteli ürün olarak ele alınan suda, elektrik alanın yoğun olmadığı ve hızın fazla olduğu orta bölgede dönmenin uygulanmadığı durumda bile sıcaklık farkının çok yüksek olmaması, buna karşın viskoz ürün olarak ele alınan % 0,5 CMC çözeltisinin üst kesitinde yoğun olan elektrik alana bağlı olarak dönmenin uygulanmadığı koşullarda lokal ısınmaların fazla olmasıdır.



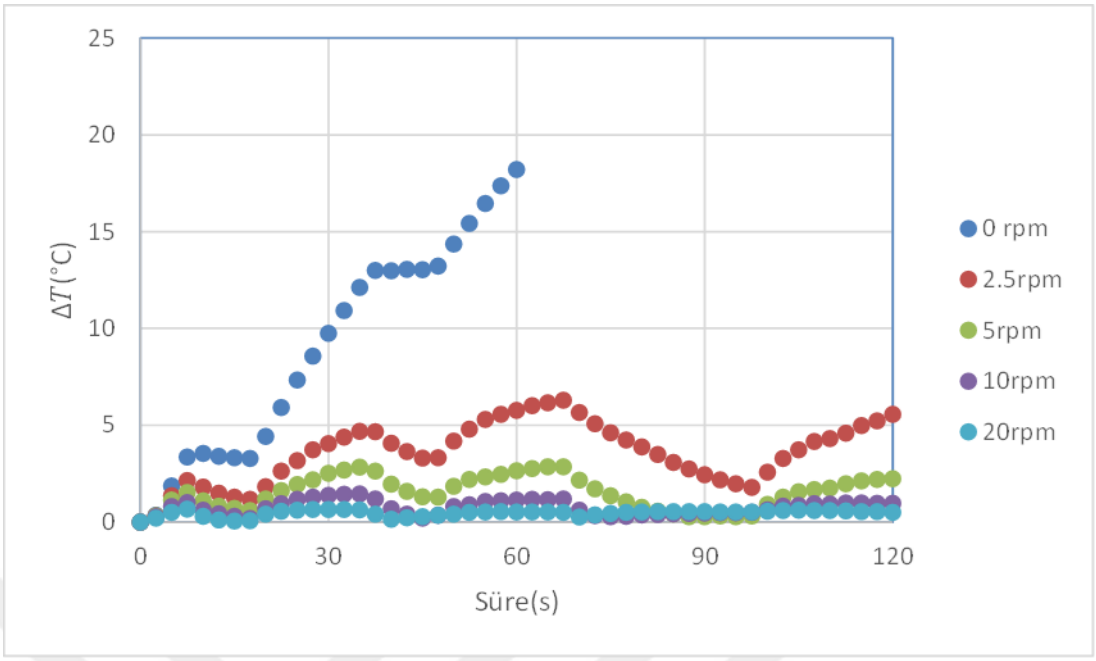
a



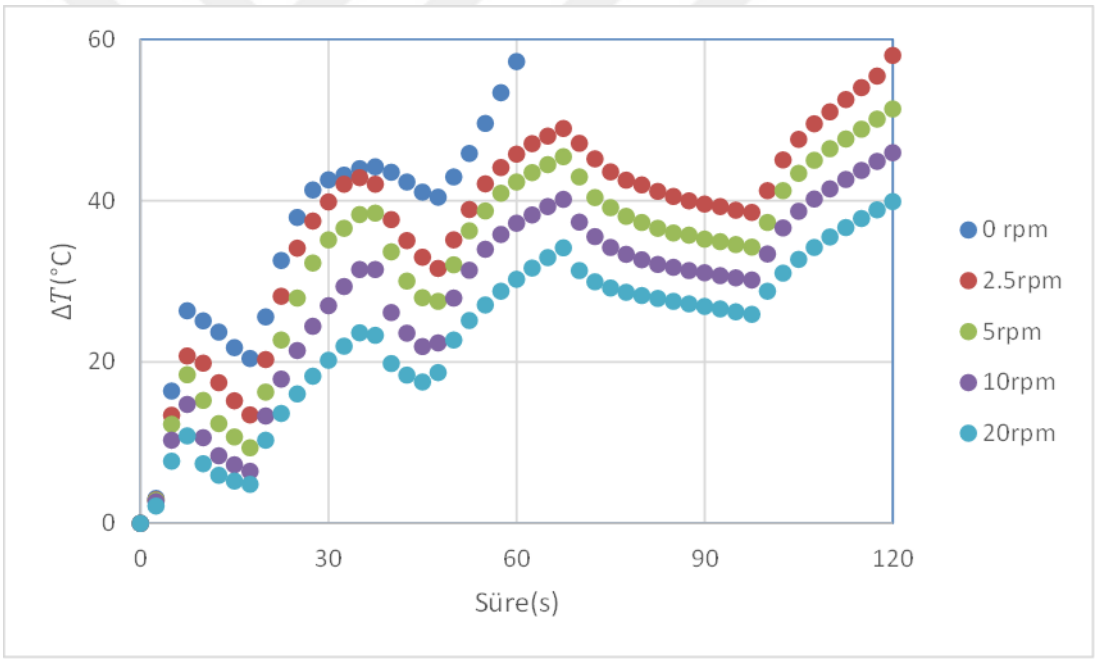
b

Şekil 4.6 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak % 0,5 CMC çözeltisi kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün toplam hacim ve üst kesitinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark

a. toplam hacim, b. üst yüzey



a



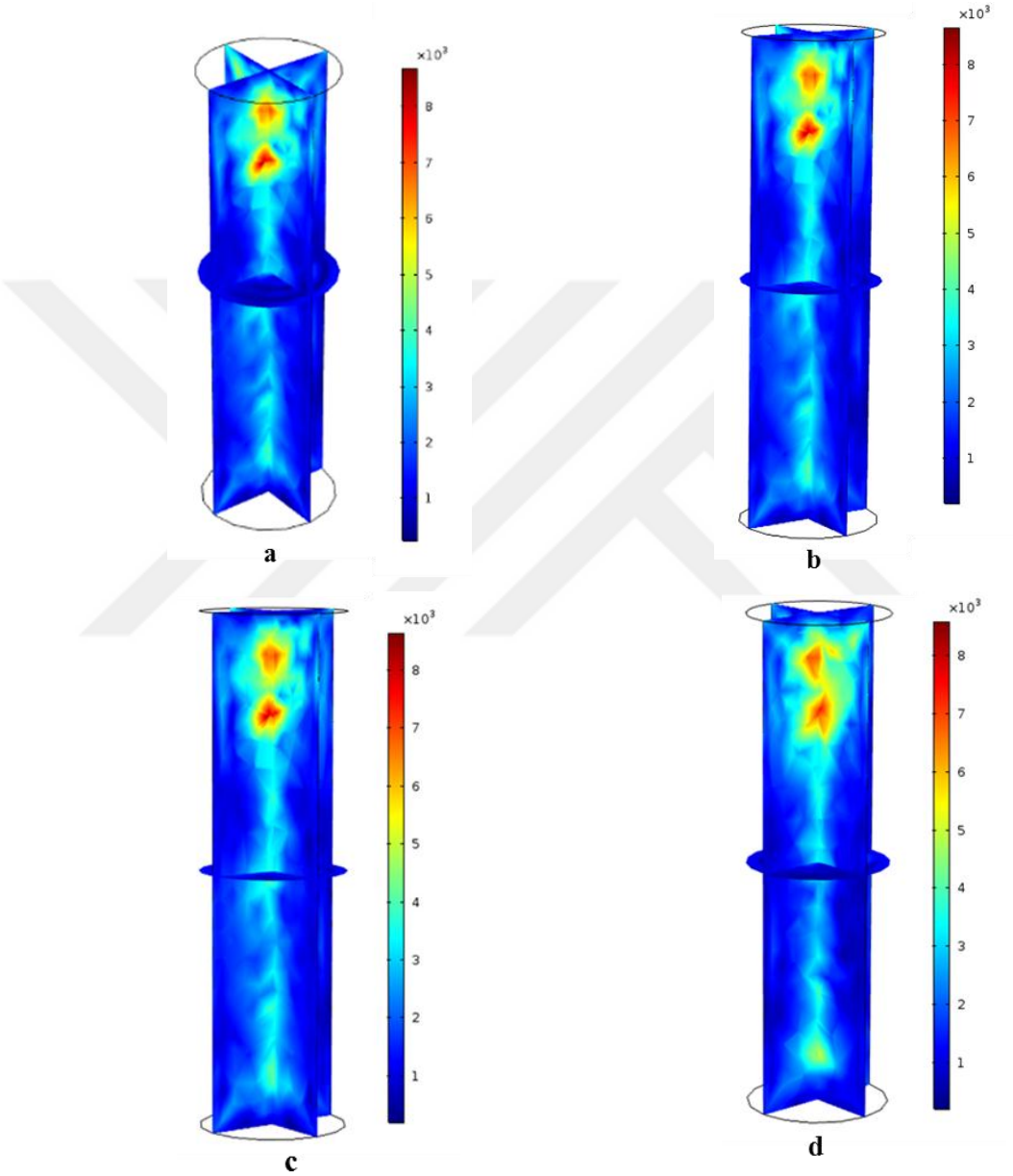
b

Şekil 4.7 Laboratuvar ölçekli sistemde ürün olarak % 0,5 CMC çözeltisi kullanılması durumunda farklı dönüş hızlarında ürün orta ve dikey kesitlerinde elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arası fark

a. orta kesit, b. dikey kesit

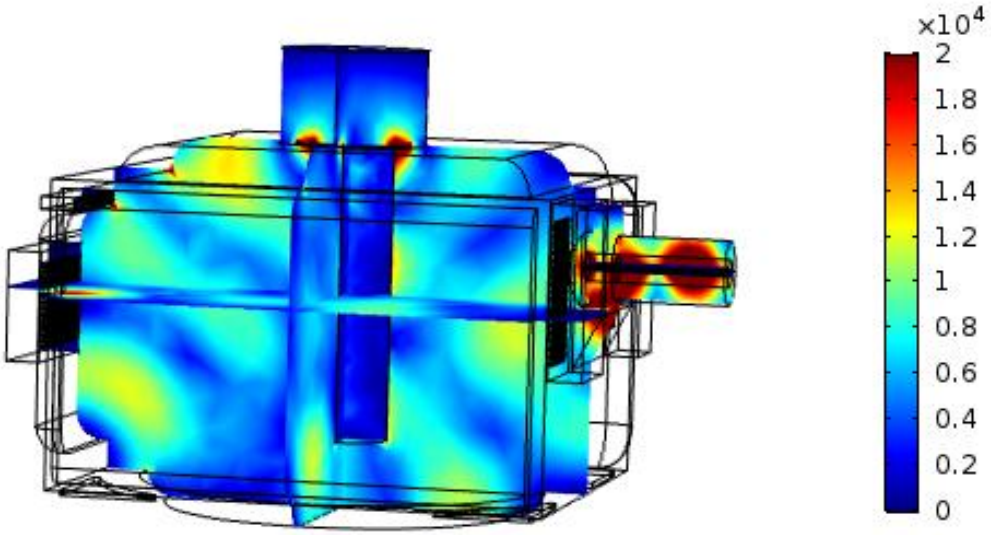
Dönme hızının artması ile elde edilen karışma tamamen sıvının karışması ile alakalı olup kavite içi elektromanyetik alan şekil 4.8'de gözleneceği üzere dönme hızı ile

birlikte değişmemektedir. Bunun sebebi geometrinin tam merkezde ve silindirik yapıda olmasıdır. Silindirik teflon borunun dönmesi, total geometride ürünün lokasyonunu ve şeklini değiştirmemektedir. Şekil 4.9'da sistem içerisinde oluşan ve farklı hızlarda değişmeyen elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



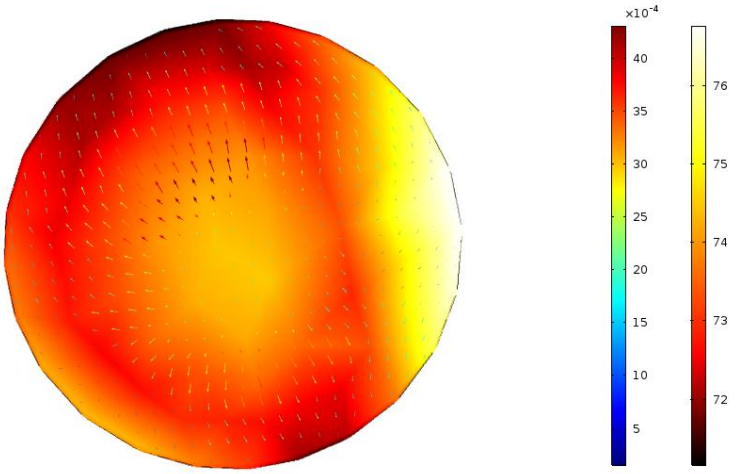
Şekil 4.8 Suya uygulanan farklı dönme hızlarında ürün ve sistem içerisinde elde edilen elektromanyetik alan

a. 0 rpm, b. 5 rpm, c. 10 rpm, d. 20 rpm

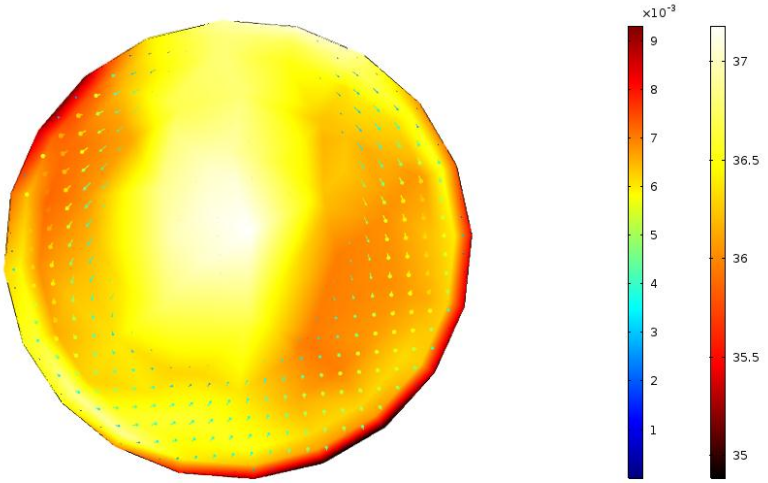


Şekil 4.9 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem içerisinde elde edilen elektrik alan dağılımı

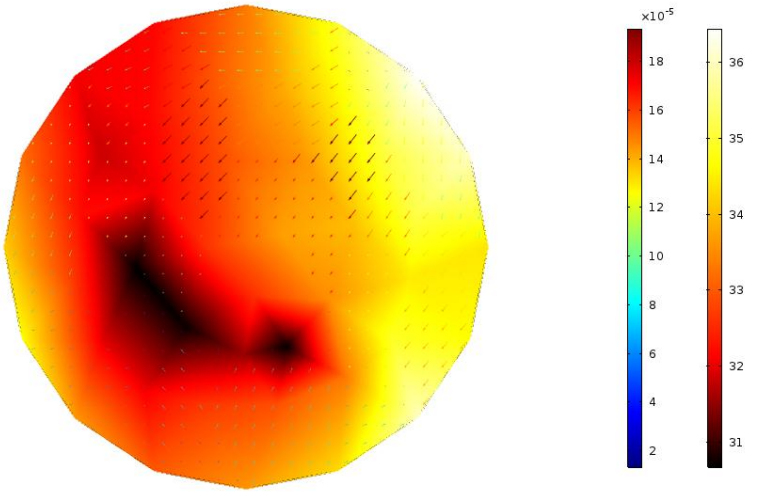
Sıvı ürünün konulduğu silindirik teflon boru sabit tutulduğunda (0 rpm) içeride oluşan hız profili ve buna bağlı olarak gerçekleşen karışma tamamen mikrodalga ile ısıtma sonucu oluşan sıcaklık değişimlerinin tetiklediği doğal konveksiyonun etkisi altındadır. Bu sebeple ürün hız profili değişimi ve sıcaklık artışında ürün viskozitesinin önemi etkin olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.10 - 4.11 sırasıyla su ve % 0,5 CMC çözeltisine ait dönme uygulaması olmadığı durumda ürün farklı kesitlerindeki sıcaklık ve hız profili oluşumunu göstermektedir. Suyun viskozitesinin daha düşük olması ürün içerisinde CMC çözeltisine göre neredeyse iki kat daha fazla hız oluşmasına neden olmuştur. Silindirik boruya dönme hareketi verildiğinde ise belirli bir dönme hızına kadar (10 rpm) suda hem dönme etkisi hem de doğal konveksiyonun etkisi ile bir karışma gözlenirken (Şekil 4.20) CMC'de, doğal konveksiyon üzerinde viskozitenin etkisine bağlı olarak, dönmenin etkisinin doğal konveksiyonu düşük dönme hızlarında (örneğin 2,5 rpm) bile domine ettiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.21). Bunun sebebi olarak ise yine suyun viskozitesinin düşüklüğüne bağlı olarak daha yüksek hızlarla doğal konveksiyon gerçekleştirmesi ve CMC çözeltisinin viskozitesinin daha yüksek olması sebebi ile bu koşullarda suda elde edilen doğal konveksiyon hızını yakalayamamasıdır. Şekil 4.12 - 4.13'te 2,5 rpm dönme hızında önceden belirtilen kesitlerde sırasıyla su ve CMC çözeltisi için elde edilen sıcaklık dağılımı ve hız profili verilmiştir.



a



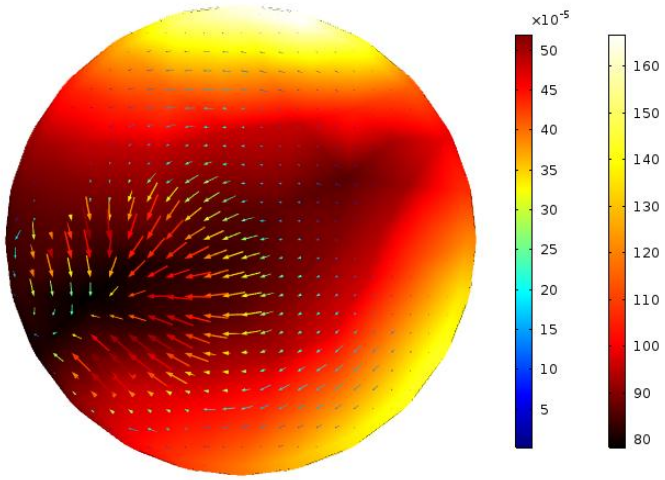
b



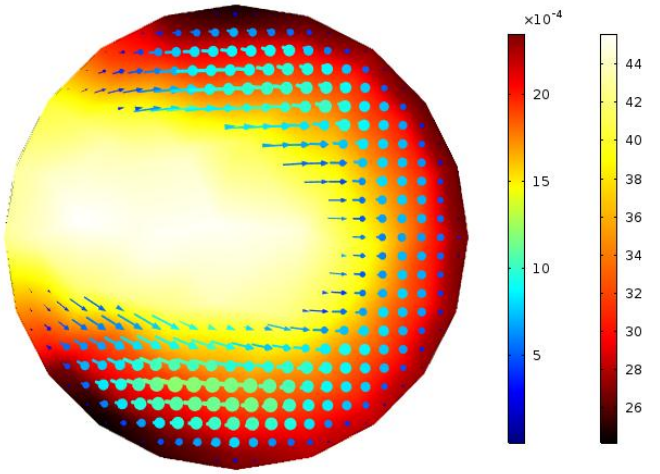
c

Şekil 4.10 Dönme uygulaması olmadığı durumda su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

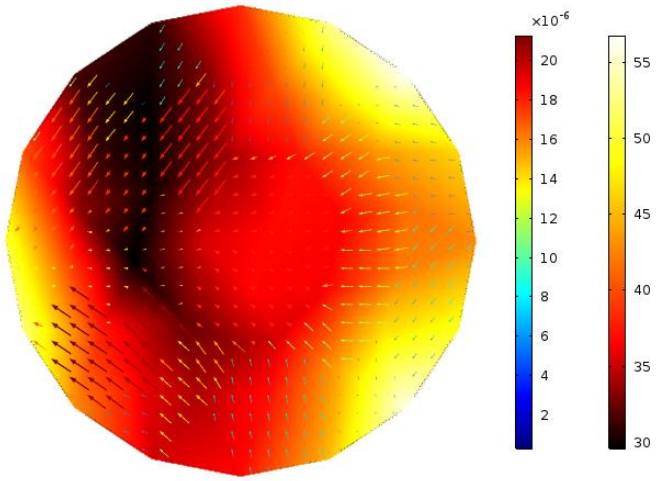
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey



a



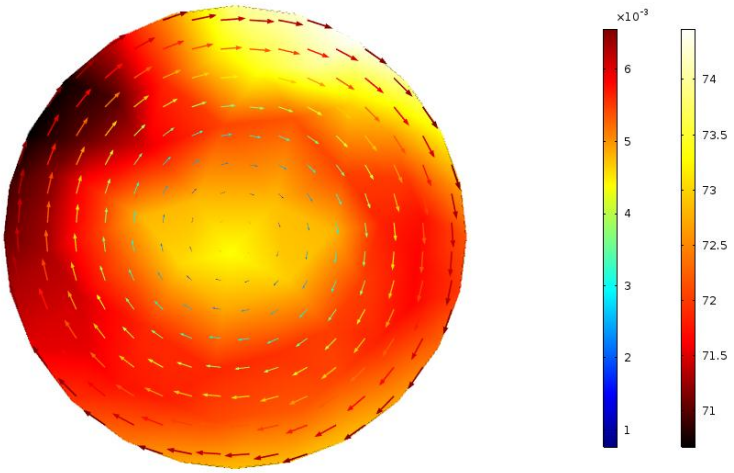
b



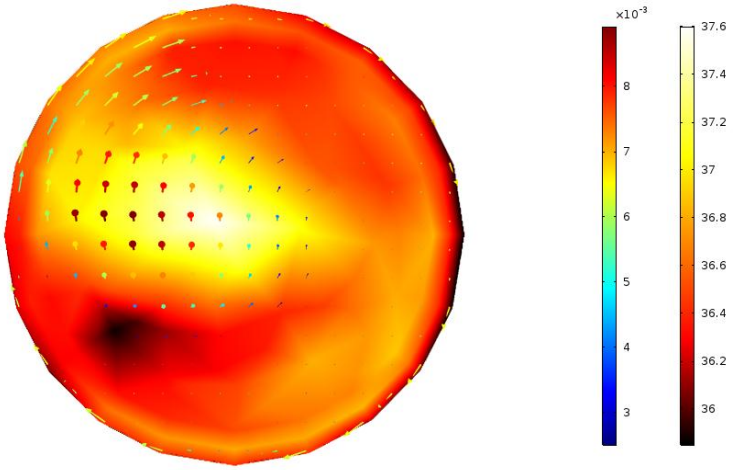
c

Şekil 4.11 Dönme uygulaması olmadığı durumda % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

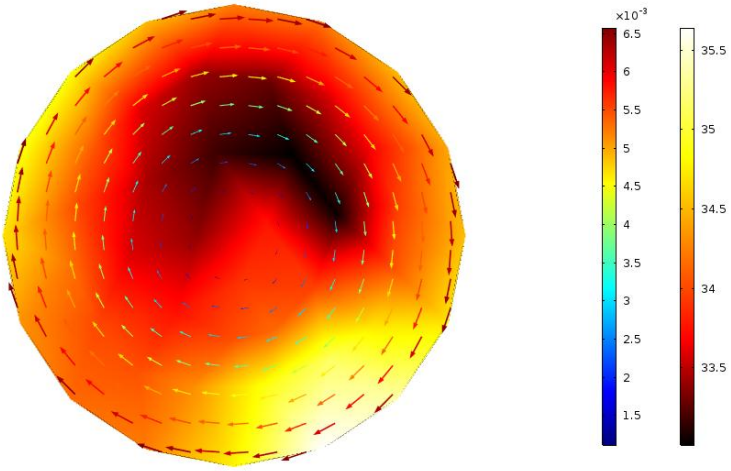
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey



a



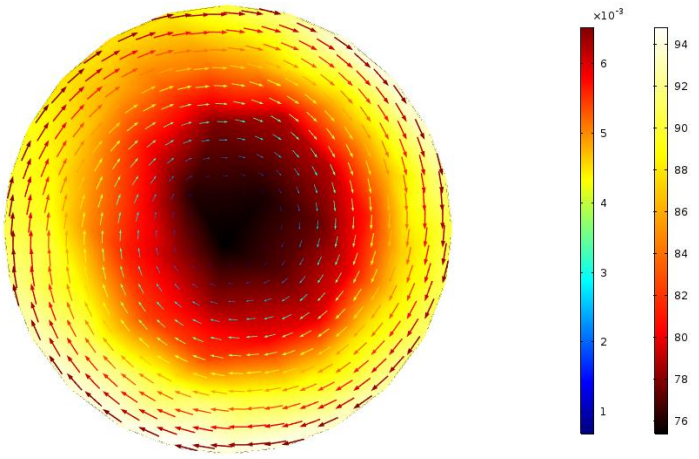
b



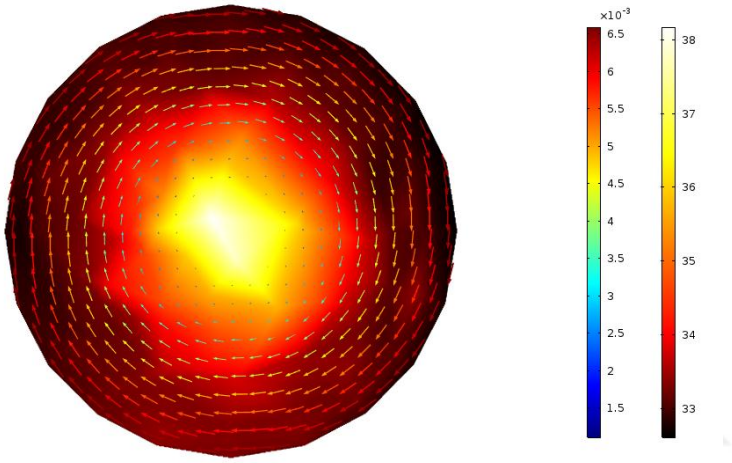
c

Şekil 4.12 Farklı kesitlerde, 2,5 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

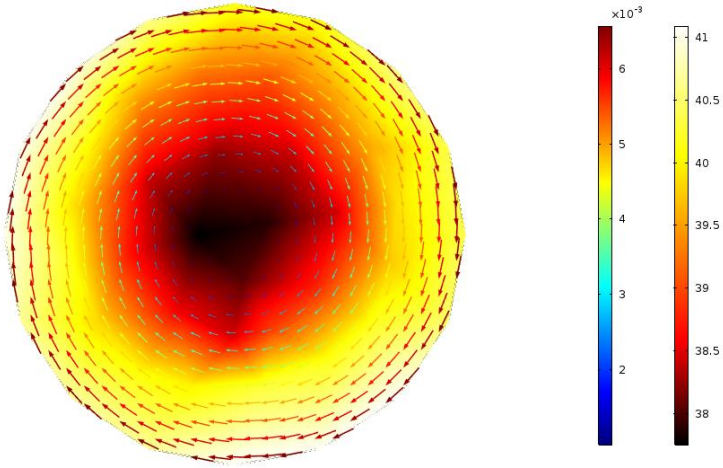
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey



a



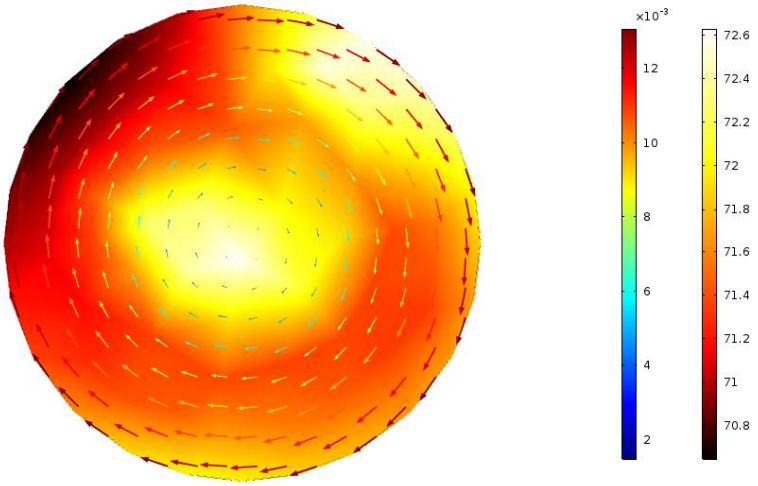
b



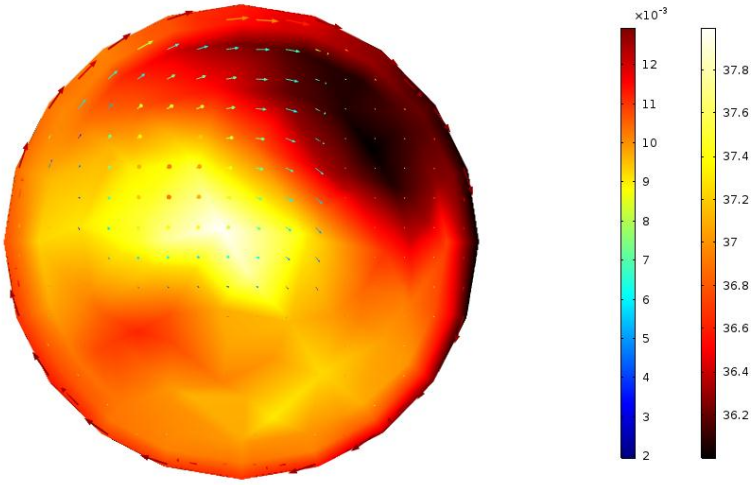
c

Şekil 4.13 Farklı kesitlerde, 2,5 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

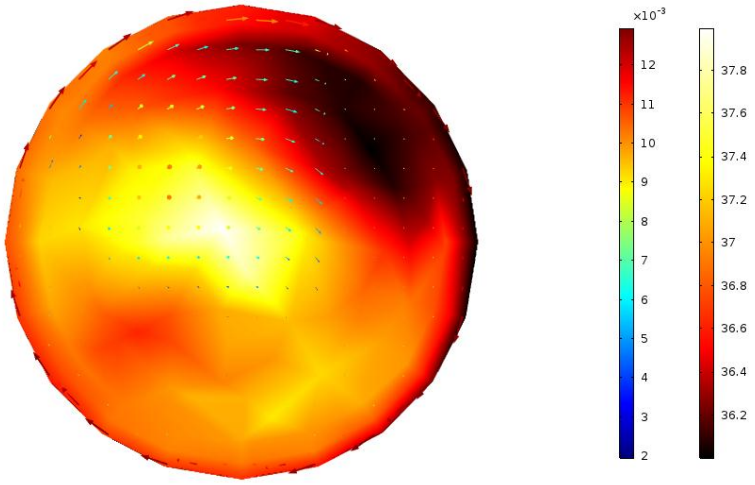
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey



a



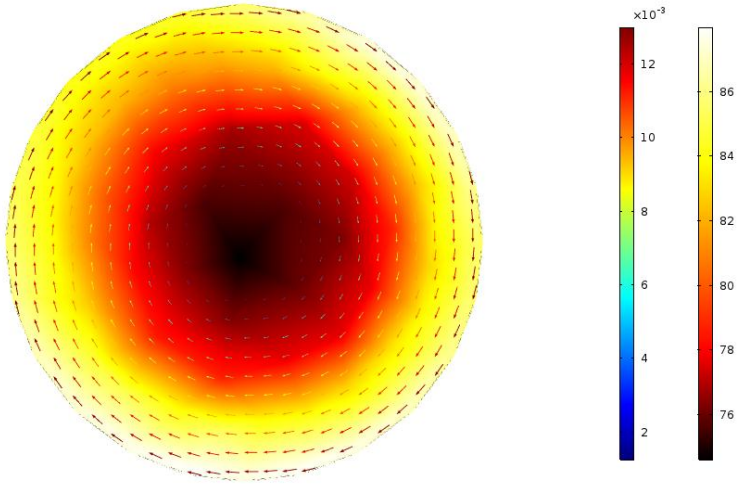
b



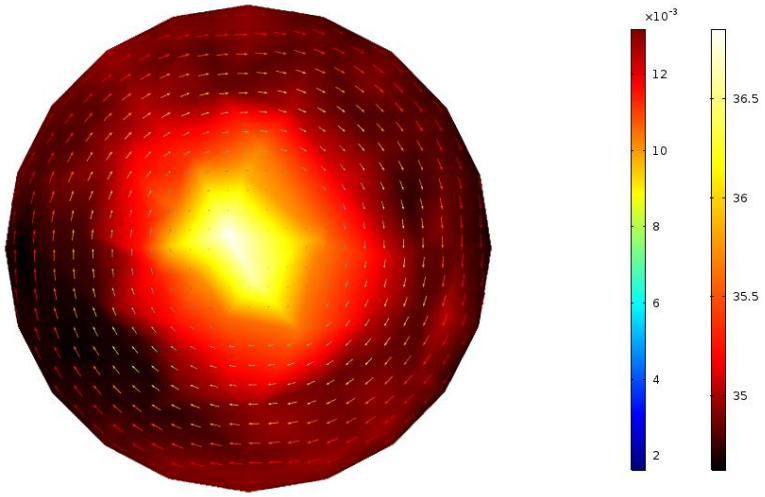
c

Şekil 4.14 Farklı kesitlerde, 5 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

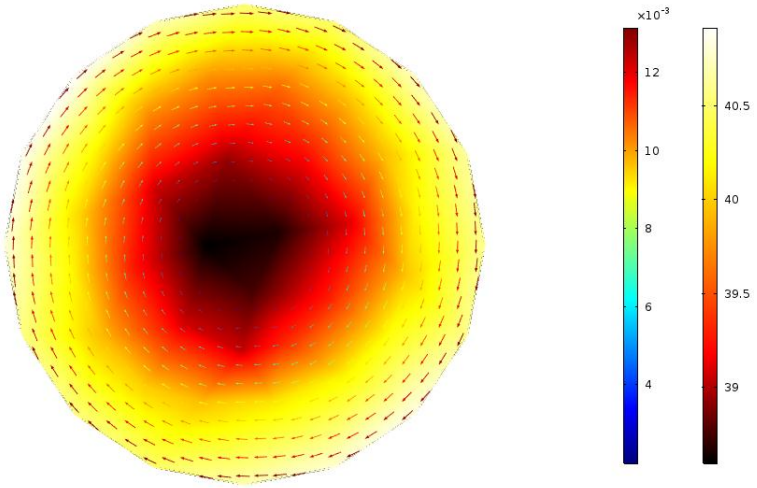
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey



a



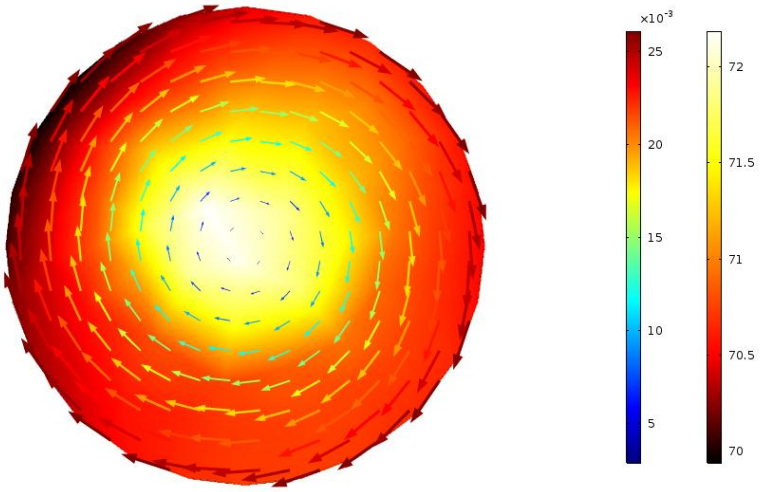
b



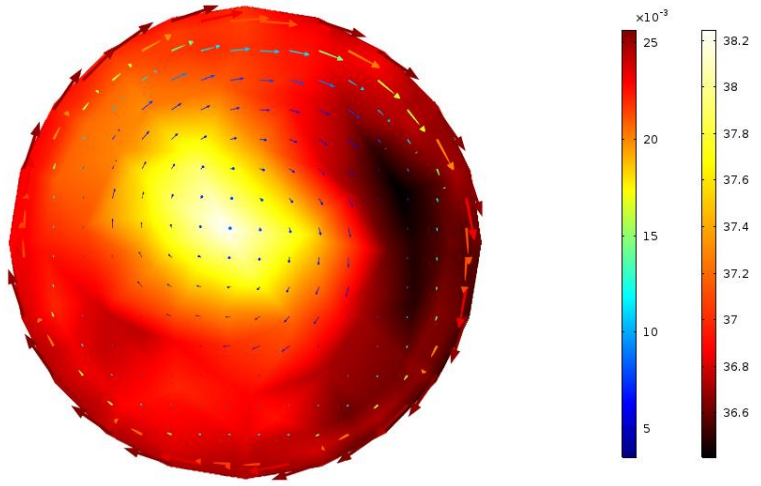
c

Şekil 4.15 Farklı kesitlerde, 5 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

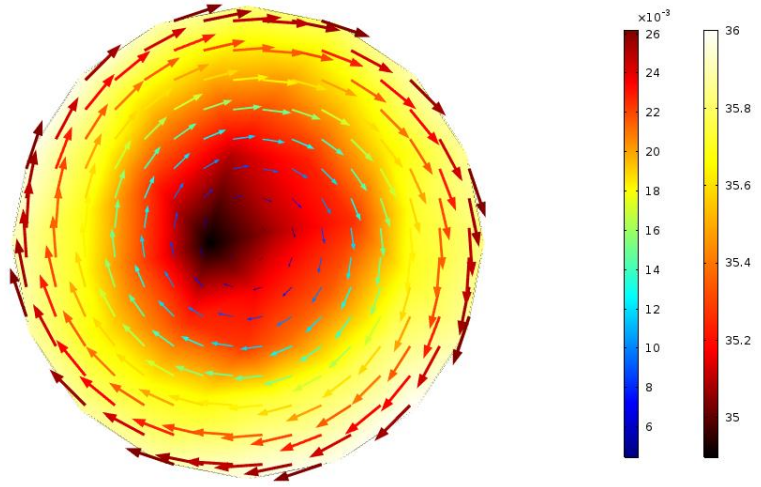
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey



a



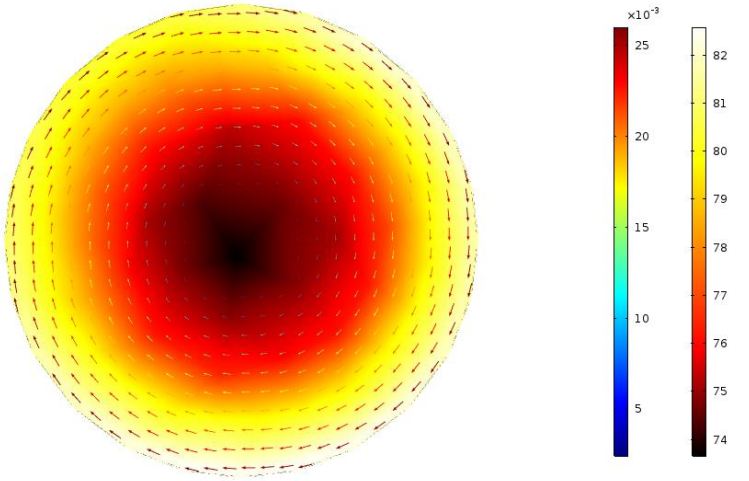
b



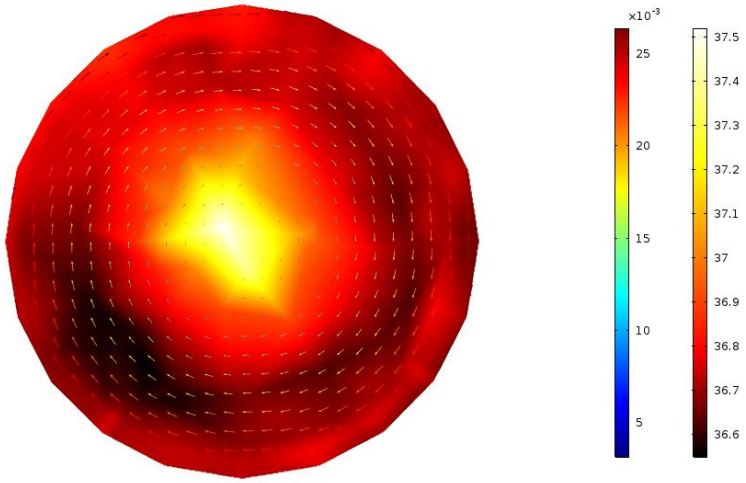
c

Şekil 4.16 Farklı kesitlerde 10 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

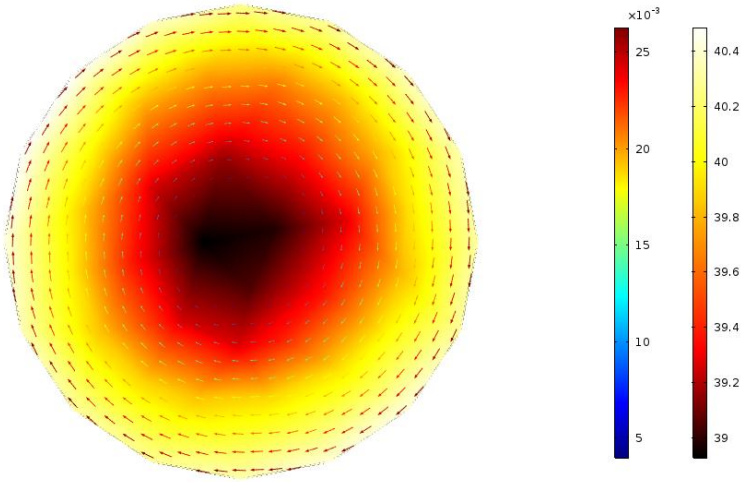
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey, d. üst yüzey



a



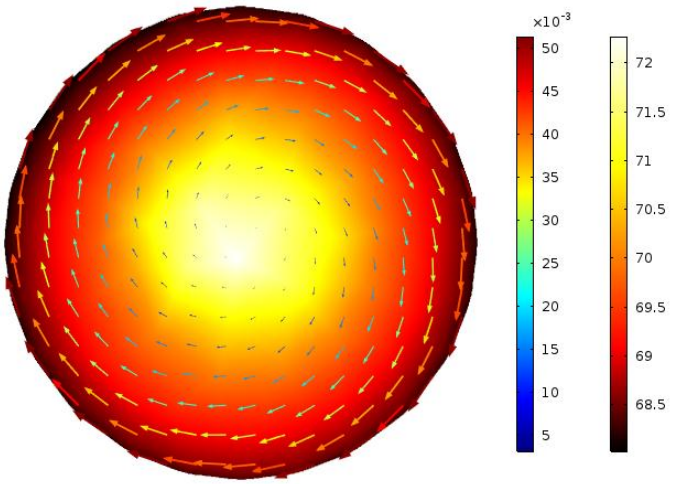
b



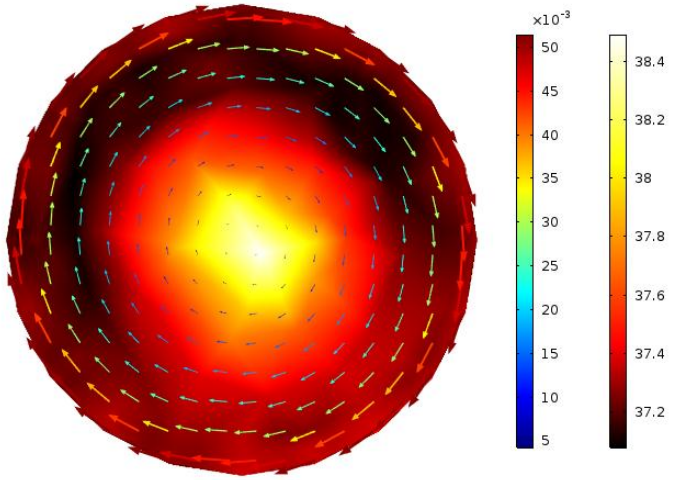
c

Şekil 4.17 Farklı kesitlerde 10 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

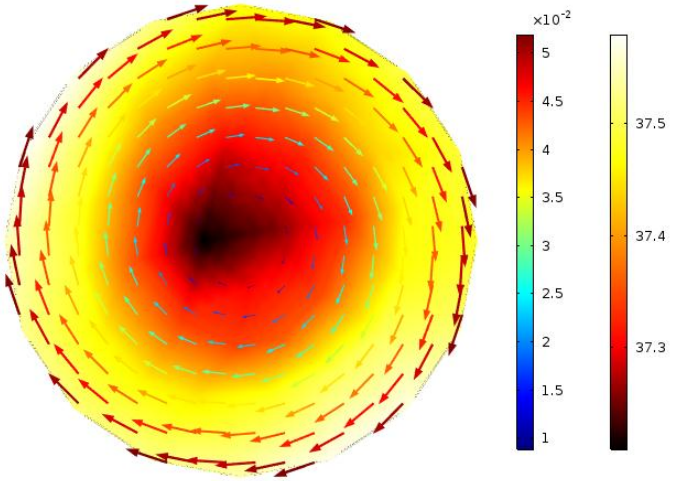
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey, d. üst yüzey



a



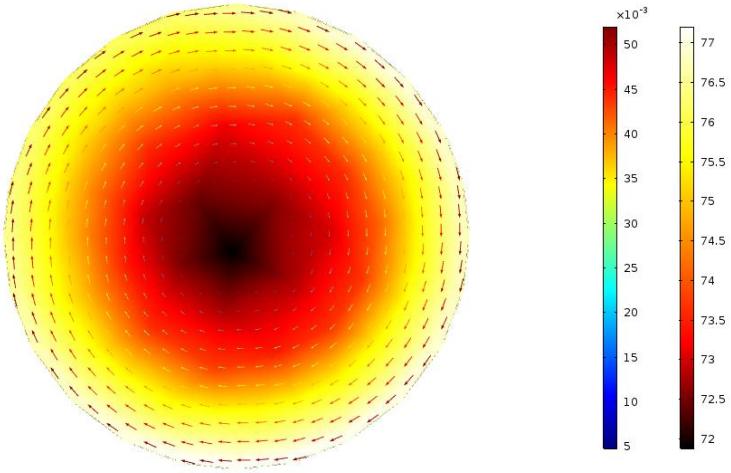
b



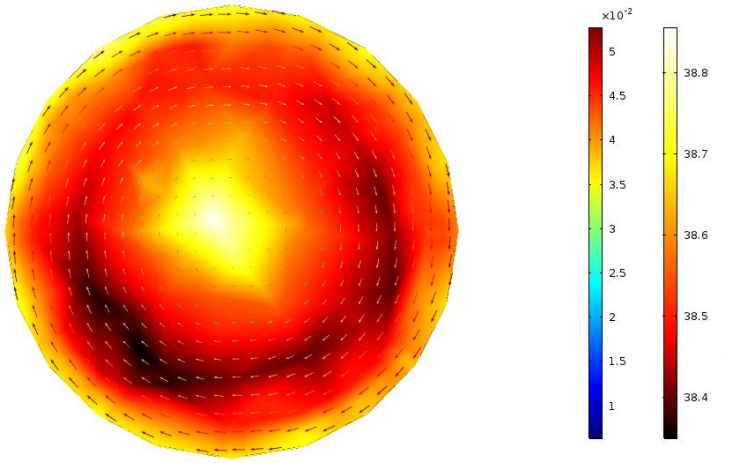
c

Şekil 4.18 Farklı kesitlerde 20 rpm dönme hızında su içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

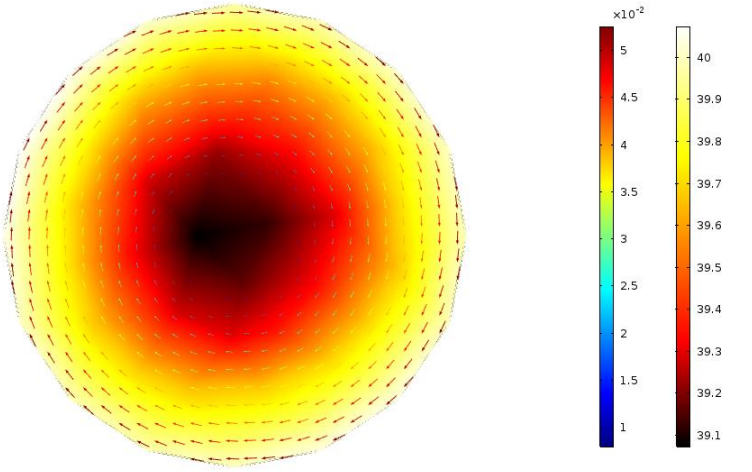
a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey, d. üst yüzey



a



b



c

Şekil 4.19 Farklı kesitlerde 20 rpm dönme hızında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen sıcaklık ve hız profilleri

a. üst yüzey, b. orta kesit, c. alt yüzey, d. üst yüzey

Dönme hızının karışmaya etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla 5, 10 ve 20 rpm (Şekil 4.14-4.19) dönme hızlarında belirtilen kesitlerde hız profili ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Elde edilen bu profil ve dağılımlardan yola çıkarak dönmenin etkisinin radyal (φ) yönde karışma üzerinde etkisinin fazla olduğu fakat r ve z yönlerinde ise viskoz kuvvetlerin etkisinin daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Farklı hızlarda verilen dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimimi etkisi ürün total hacmi içerisindeki gerçekleşen hız profiline göre de incelenmiştir. Şekil 4.20 ve 4.21'de ürün içerisinde oluşan hız profili gösterilmiştir. Burada da gözlendiği şekilde, su içerisinde viskoz kuvvetler 20 rpm'e kadar hala karışma üzerinde etkin bir rol oynarken bu durum CMC çözeltisi için 2,5 rpm'de bile çok küçük kalmaktadır.

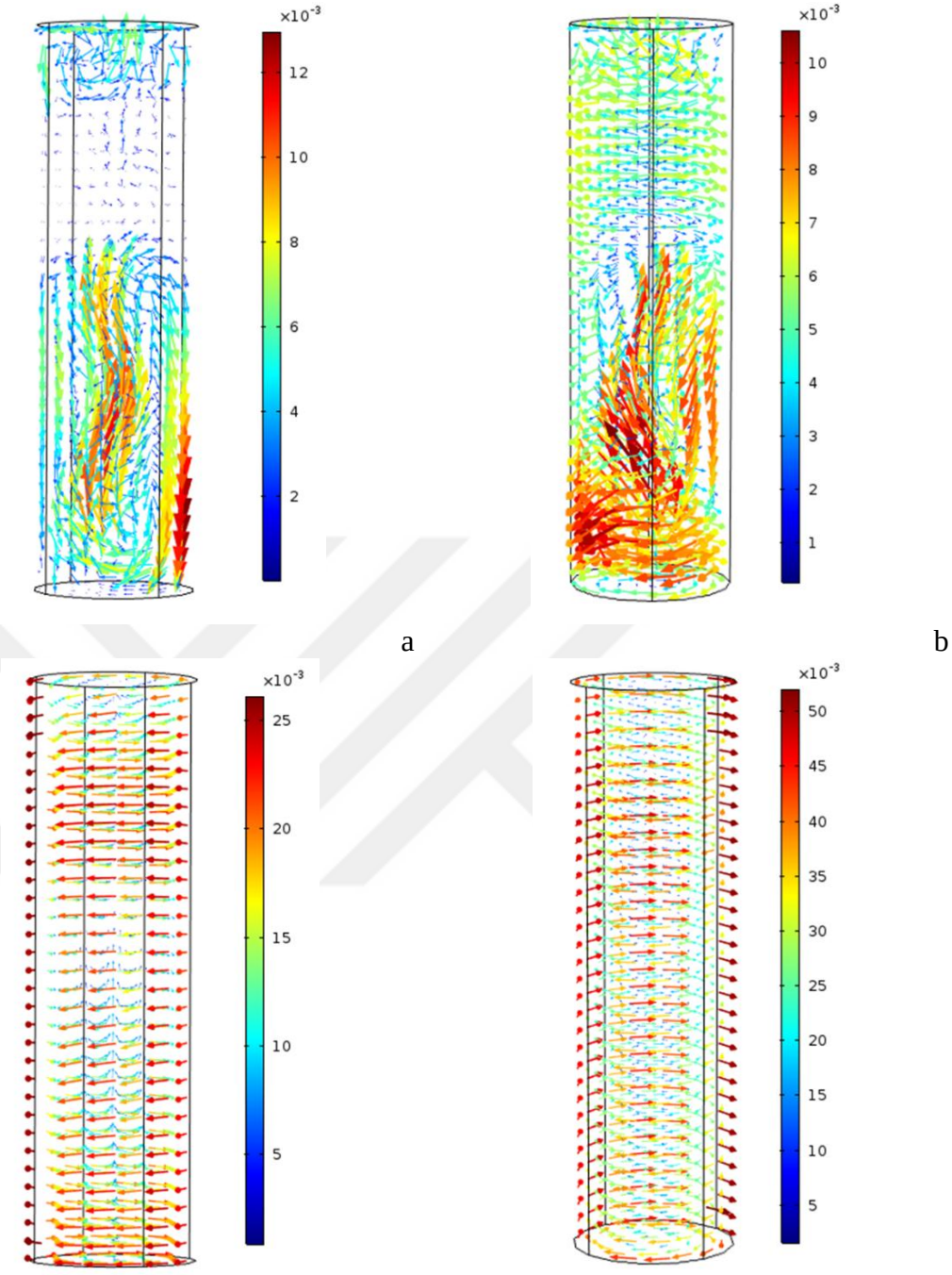
Dönme etkisinin uygulandığı sistemlerde, hem dönme hareketine bağlı olarak bir santrifüj kuvveti hem de doğal konveksiyon etkisine bağlı olarak yerçekimi kuvveti ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı (ve karışmayı) etkilemektedir. Santrifüj kuvvetinin yerçekimi kuvvetine oranı (dönme etkisine bağlı olarak oluşan rotasyonel-Rayleigh sayısının yerçekimi kuvveti etkisine bağlı olarak oluşan Rayleigh sayısına oranı) Froude sayısı (Fr) ile ifade edilmektedir (Eşitlik 4.1):

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot Q_0 \cdot t \cdot L^3}{\rho \cdot c_p \cdot \alpha \cdot \nu}$$

$$Ra_r = \frac{\left(\Omega^2 \cdot R\right) \cdot \beta \cdot Q_0 \cdot t \cdot L^3}{\rho \cdot c_p \cdot \alpha \cdot \nu} \qquad (4.1)$$

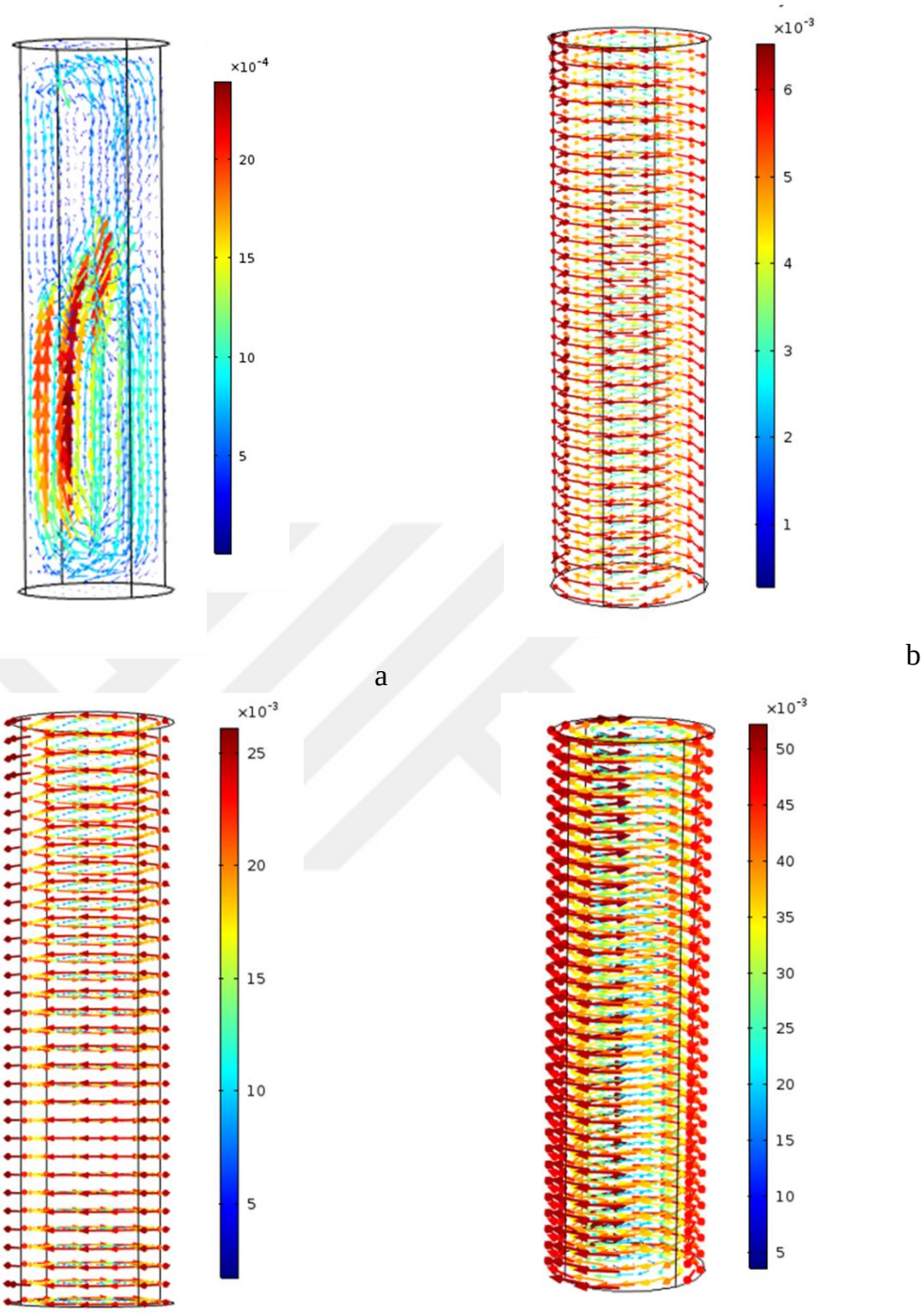
$$Fr = \frac{Ra_r}{Ra} = \frac{\Omega^2 \cdot r}{g}$$

Buna göre dönme hızına bağlı olarak Froude sayısı değişimi çizelge 4.1'de gösterilmiştir:



Şekil 4.20 Farklı dönme hızlarında su içerisinde 120 s'de elde edilen hız profili

a. 0, b. 2,5, c. 10, d.20 rpm



a b

c d

Şekil 4.21 Farklı dönme hızlarında % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde 120 s'de elde edilen hız profili

a. 0, b. 2,5, c. 10, d.20 rpm

Çizelge 4.1 Sistem dönme hızına bağlı olarak Froude sayısı değişimi

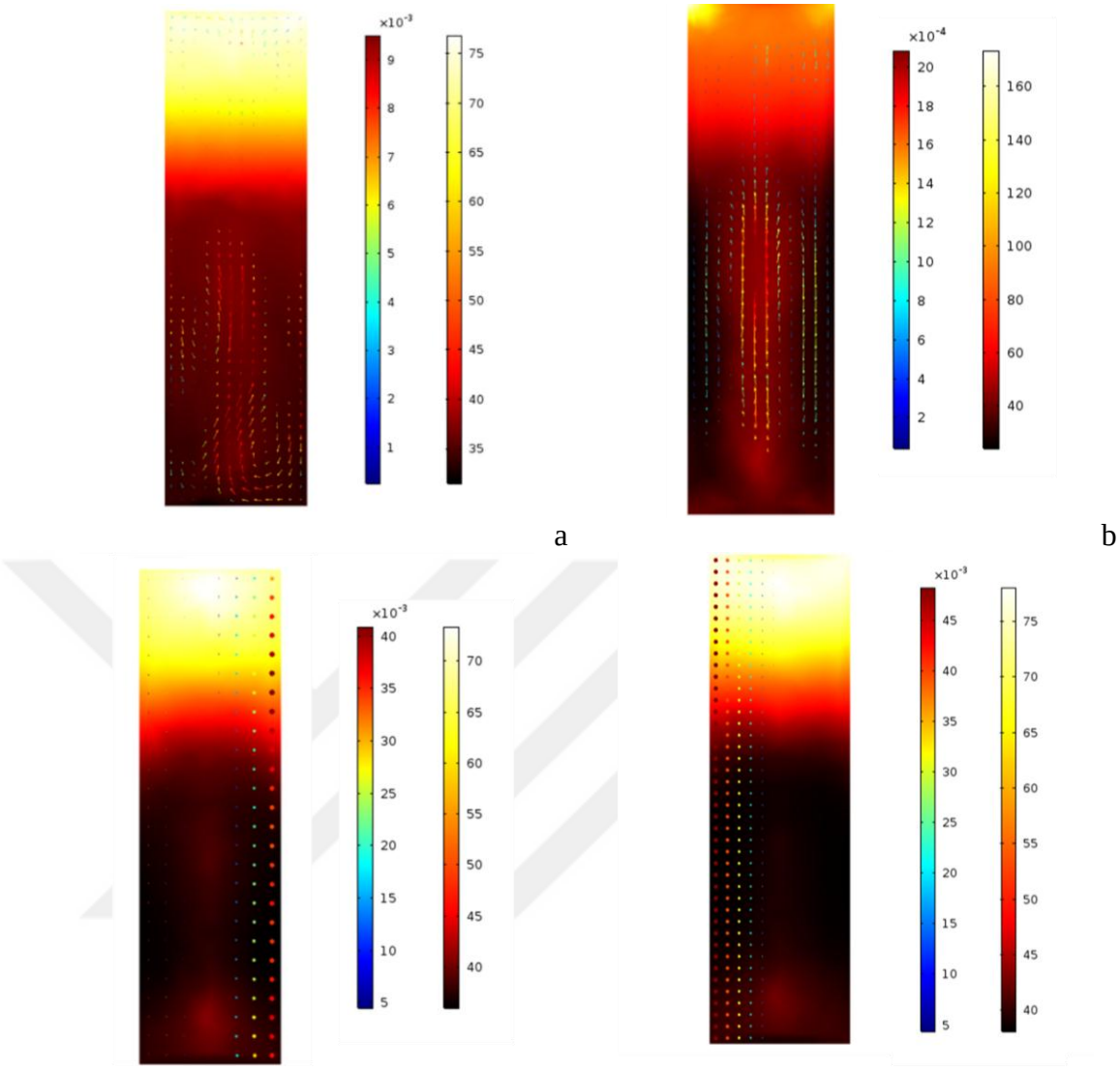
Dönme frekansı (rpm)	$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{60}$ (1/s)	Fr×100
0	0	0
2,5	0,262	0,017
5	0,524	0,070
10	1,047	0,279
20	2,094	1,118

0 - 20 rpm aralığında Froude sayısı değişimi (Fr×100) 0,017-1,118 arasındadır. Bu değerler dönme hızının artmasına rağmen yerçekimi kuvvetine karşı önemli bir etki oluşmadığını göstermektedir (Chatterjee vd. 2007). Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de su ve % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde farklı kesitlerde meydana gelen sıcaklık farkı incelendiğinde (Şekil 4.5.b ve 4.7.b), dikey kesit de radyal kesitlere göre daha fazla bir fark oluştuğu gözlenmektedir. Bu durum, hem sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı (Şekil 4.8'de gözlediği gibi sistem dikey kesit üst bölgelerinde daha yoğun bir elektrik alan oluşumu vardır) hem de yerçekimi kuvvetinin yüksek dönme hızlarında bile gözlenen baskın etkisi ile açıklanabilmektedir.

Şekil 4.22 su ve CMC çözeltisinde, dikey kesitte 0 ve 20 rpm dönme hızlarında oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. Ancak, dönme hızı ile oluşan santrifüj kuvvetlerini etkisi radyal kesitlerde net bir karışmayı da sağlamaktadır. Bu kapsamda sürekli sistemlerde dönme uygulamasının ürün sıcaklık tekdüzeliğini arttıracağı belirlenmiştir.

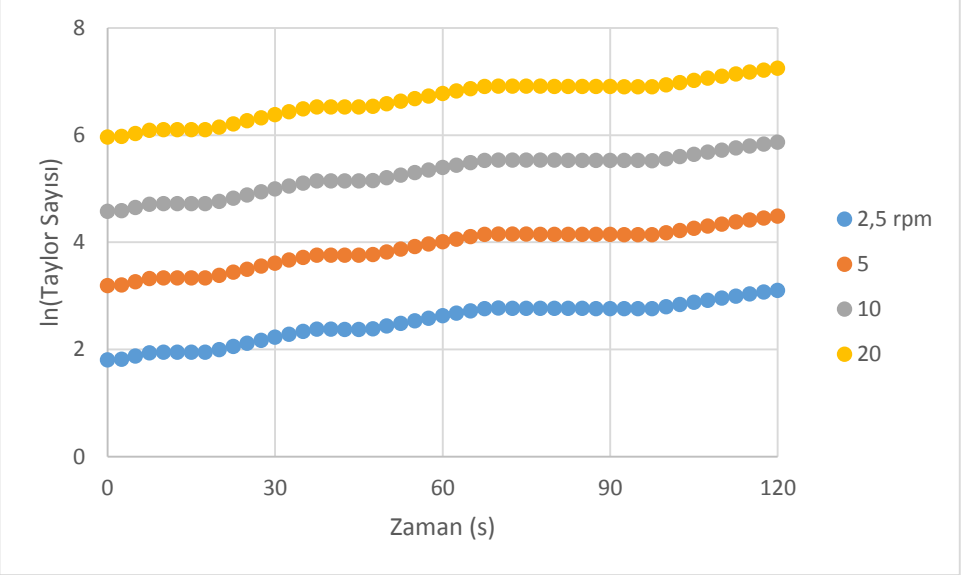
Sıcaklık dağılımında dönme etkisinin yanında ürün viskozite etkisinin de belirlenmesi amacıyla Taylor sayısında meydana gelen değişim kullanılmaktadır:

$$Ta = \frac{\omega^2 r^4}{\upsilon^2} \tag{4.2}$$

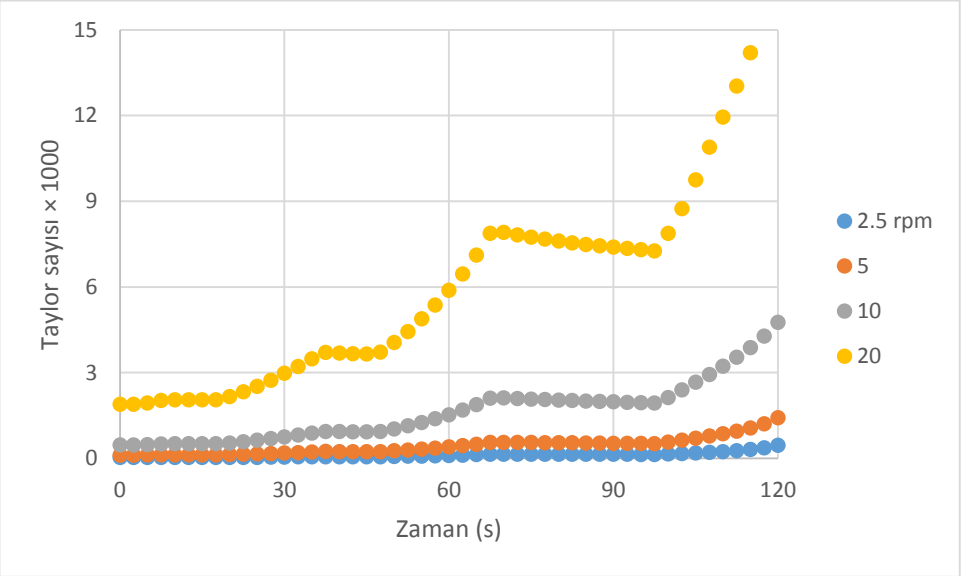


Şekil 4.22 Su ve % 0,5 CMC çözeltisinde dikey kesitte 0 ve 20 rpm dönme hızlarında oluşan sıcaklık dağılımı

a.0 rpm su, b. 0 rpm CMC çözeltisi, c.20 rpm su, d. 20 rpm CMC çözeltisi



Şekil 4.23 Proses sürecinde su içerisinde meydana gelen Taylor sayısı değişimi



Şekil 4.24 Proses sürecinde % 0,5 CMC içerisinde meydana gelen Taylor sayısı değişimi

Şekil 4.23 - 4.24'te proses süresince su ve % 0,5 CMC çözeltisi içerisinde Taylor sayısında meydana gelen değişim (ln(Ta)-t) ve (Ta-t) olarak gözlenmektedir. Mikrodalga uygulama sırasında kullanılan dur-kalk döngüsüne bağlı olarak, mikrodalga gücü uygulanmadığı sürelerde, sıcaklık değişimi sabit olduğundan ve buna bağlı olarak da kinematik viskozite değişmediğinden Taylor sayısı da sabit kalmıştır. Bu kapsamda, dönme hızı artışı ürün içi sıcaklık dağılımı tekdüzeliğini arttırmaktadır. Taylor sayısında

meydana gelen değişim, belirtildiği gibi, sistem içerisinde oluşan rotasyonel kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı olarak açıklanmaktadır.

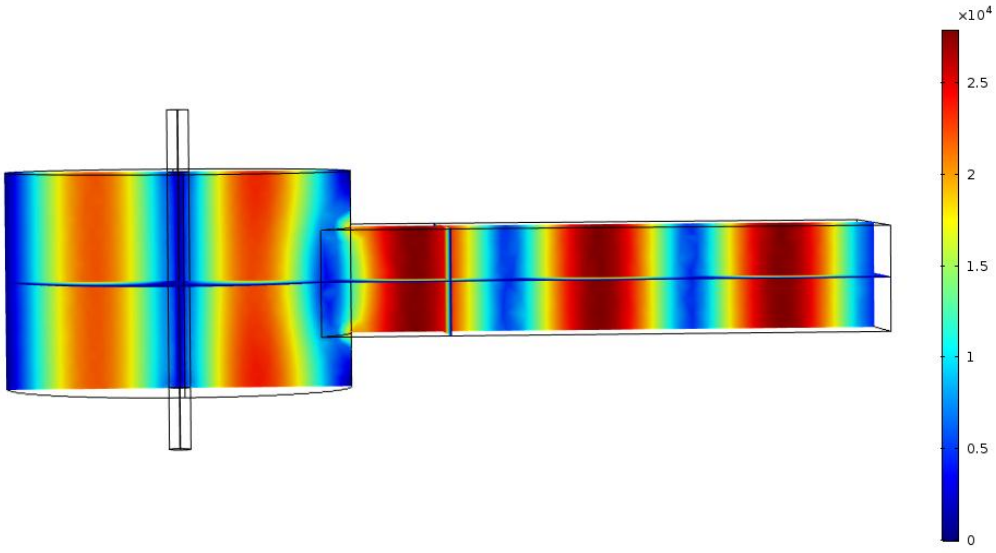
Ürün içerisinde doğal konveksiyon oluşumu ve doğal konveksiyona bağlı olarak meydana gelen hız profilini dolayısıyla da doğal konveksiyonla ısı transferini etkileyen en önemli özellik viskozitedir. % 0,5 CMC çözeltisinin viskozite değişimine bağlı olarak sıcaklık tekdüzeliği suya göre çok daha düşük olmaktadır. Bu durum şekil 4.4-4.7'de net olarak gözlenirken; su ve % 0,5 CMC'de doğal konveksiyon ve uygulanan dönme hızına bağlı olarak oluşan hız profilleri de şekil 4.20 - 4.21'de gösterilmiştir. Burada, 2,5 rpm dönme hızı uygulamasında suda halen net bir doğal konveksiyona bağlı hız oluşumu gözlenirken CMC'de dönme hızının baskınlığı ortaya çıkmaktadır. Suda ise bu durum 10 rpm dönme hızından sonra gözlenmektedir. Dönme etkisinin sistem içerisindeki ısı transferi ve sıcaklık dağılımına etkisi Tutar ve Erdoğdu tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada detaylı olarak verilmektedir.

4.2 Endüstriyel Ölçekte Sürekli-Akış Mikrodalga Sistem

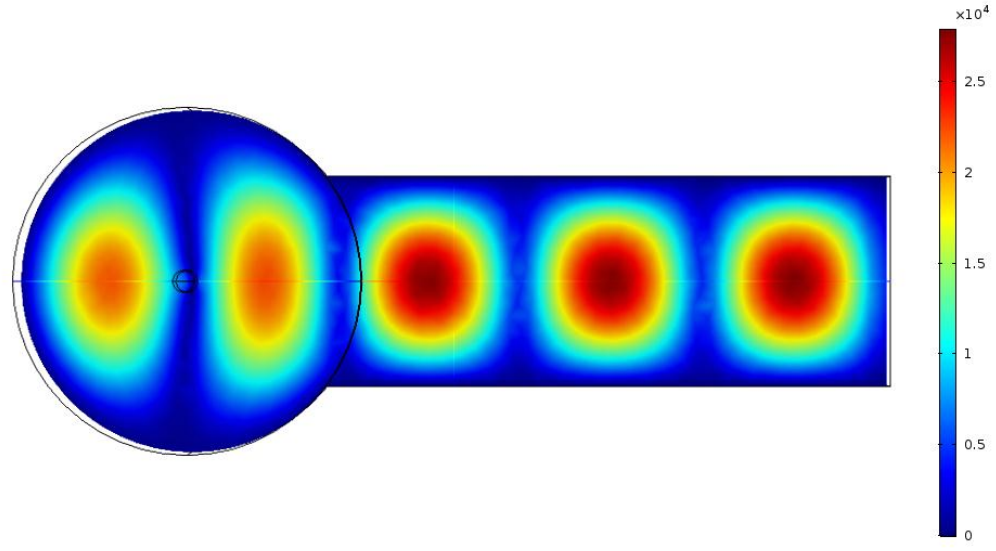
Materyal ve yöntem bölümünde de açıklandığı endüstriyel sistem, 20,3 cm çaplı kavite, 67,3 cm genişliğe, 24,8 cm derinliğe ve 12,4 cm uzunluğa sahip bir dalga kılavuzu ve 2,54 cm (1 inç) çaplı boru içeren bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu sistemin başlangıç geometrik özellikleri literatürde de genel olarak kullanılan tasarım özelliklerine göre planlanmış ve bu sistem de proses edilecek ürün olarak tüm sıvı yumurta kullanılmıştır. Pastörizasyon normu olarak da ürünün sistem çıkışında 60 °C sıcaklığa ulaşması hedeflenmiştir. Bu sistem tasarım çalışmalarında öncelikle kullanılan mikrodalga gücü olarak 4000 W seçilmiş ve sistemin 915 MHz frekansta çalıştığı kabul edilmiştir. Bu sistemde gerçekleşen matematiksel model çalışması sonucunda sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılım şekil 4.25'te gösterilmektedir. Elde edilen elektrik alana bağlı olarak ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı ve hız profili ise şekil 4.26 - 4.27'de görülmektedir.

Sistem çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı ise şekil 4.28 boru çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Gözlendiği şekilde boru çıkışında ürün sıcaklık

değişimi, sistem çıkışında boru kesitinde oluşan elektrik alan dağılımına bağlı olarak, 60-65 °C arasındadır.



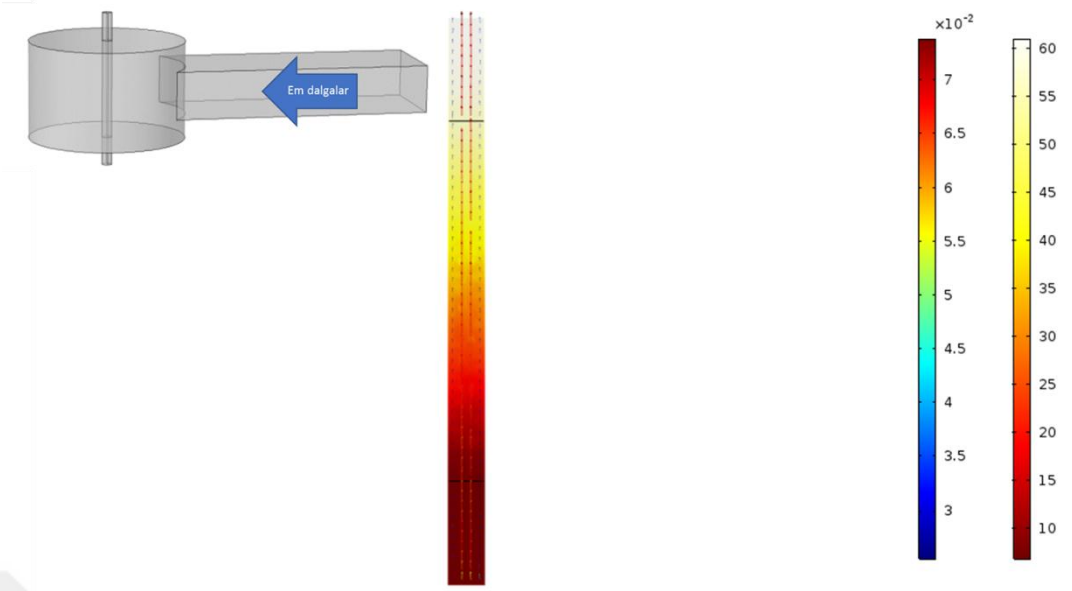
a



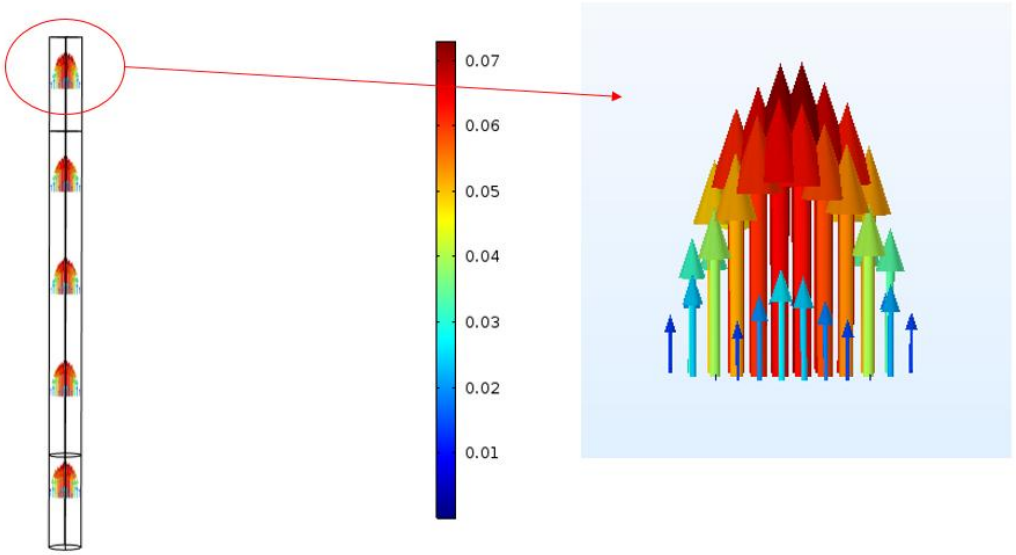
b

Şekil 4.25 Endüstriyel sistem mikrodalga tasarımı sırasında kavite içerisinde elde edilen elektrik alan dağılımı

a. kavite içi dikey kesit, b. kavite içi yatay kesit



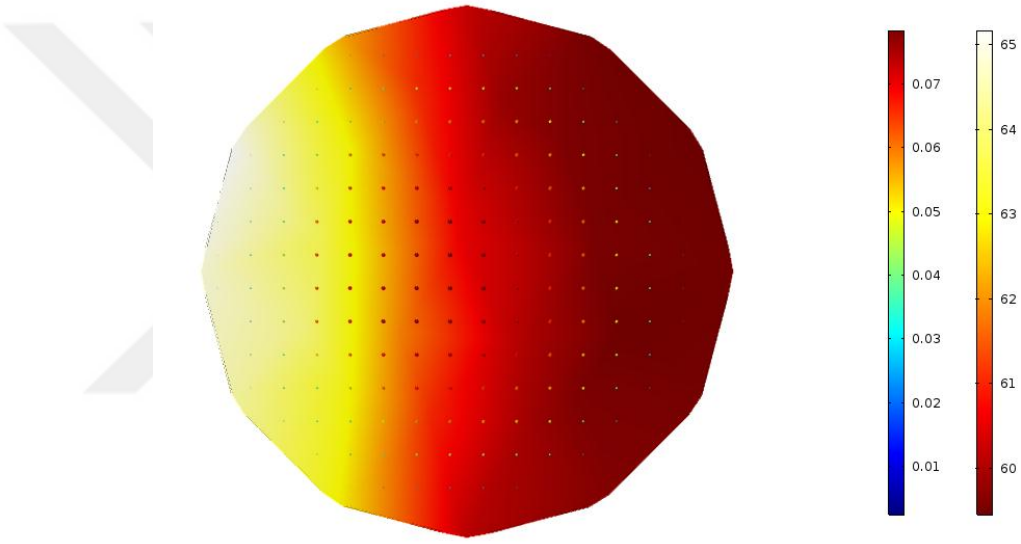
Şekil 4.26 Endüstriyel sistem içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımı (v=1,196 L/dk.)



Şekil 4.27 Endüstriyel sistem içerisinde elde edilen hız profili (v=1,196 L/dk.)

Ürün içerisinde meydana gelen ve homojen olmayan (literatürde genel olarak kabul edilen yaklaşımdan farklı olarak boru merkezinde daha az yoğun oluşan) elektrik alan dağılımına bağlı olarak gerçekleşen sıcaklık farkı endüstriyel uygulamalarda halen gözlenen ürün kayıplarının bir ispatıdır. Genel kanıya göre elektrik alanın ürün merkezinde yoğun olması beklenirken, sürekli akış mikrodalga sistemlerinin avantajı olarak da açıklanan bu durumun aksine bir elektrik alan ve sıcaklık dağılımı ortaya

çıkmaktadır. Bu oluşumun, laminer akış profilinde boru merkezinde daha hızlı akan ürünün yeterli proses edilmesi için, konvansiyel sistemlere göre literatürde de belirtilen bir avantaj sağlamadığı net olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat sistem tasarımında rol alan birçok parametreye (kavite geometrisi, ürün akışının gerçekleştiği borunun geometrisi, ürünün dielektrik özellikleri gibi) bağlı olarak değişen elektrik alan dağılımı direkt olarak ürün sıcaklık dağılımını da etkilemektedir. Bu durum, endüstriyel sistemlerde farklı bir proses (sistem içerisinde akan ürüne uygulanacak dönme hareketi gibi) ya da sistem tasarım ve optimizasyon çalışmalarının gerekliliğini göstermektedir.

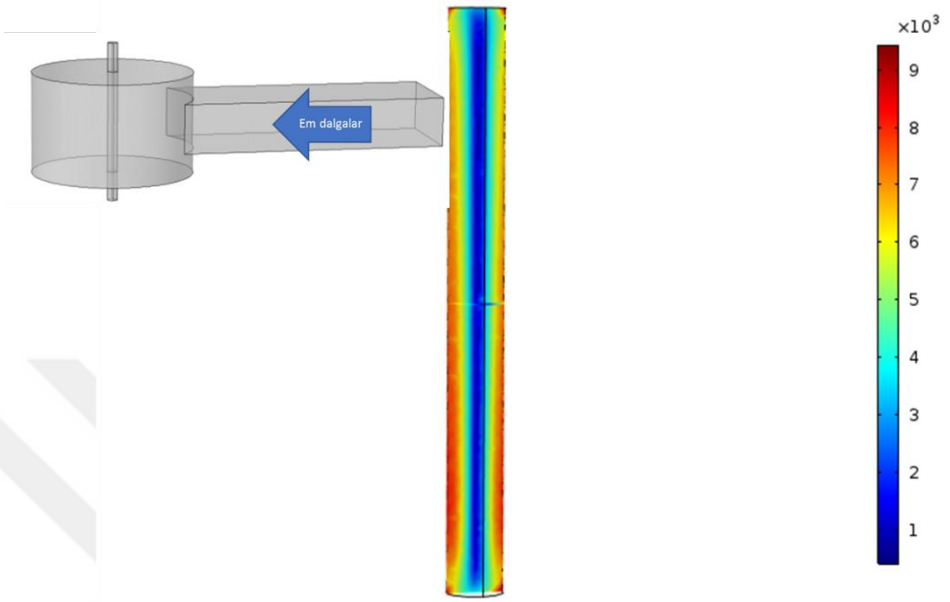


Şekil 4.28 Endüstriyel sistem çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı (V=0,05 m/s)

4.2.1 Endüstriyel sistemde dönme hızının sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi

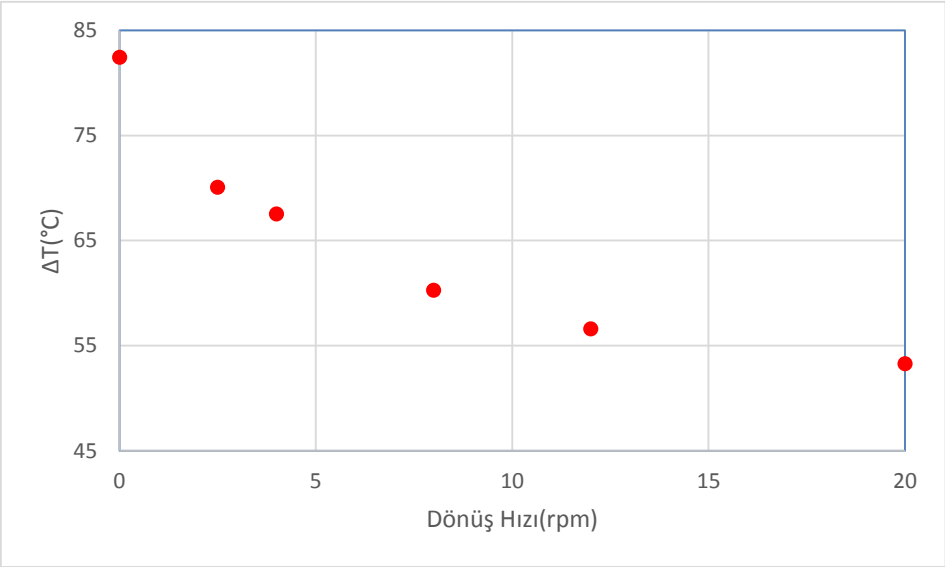
Yukarıda açıklandığı şekilde, sürekli akış endüstriyel sistemlerde oluşan elektrik alan dağılımı ve ürün sıcaklık dağılımı temelinde, proses sonunda meydana gelen ve istenmeyen ürün sıcaklık farklarının azaltılması amacıyla ürüne uygulanan dönme hareketinin etkisi bu bölümde incelenmiştir. Bu amaçla 2,5, 4, 8, 12 ve 20 rpm dönüş hızları kullanılmıştır. Ürün akışının gerçekleştiği boru, literatür çalışmalarında da uygulandığı şekilde, sistem kavitesinin merkezinde konumlandırıldığından ve boru

sadece kendi etrafında döndürüldüğünden beklenildiği üzere sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı dönme hızından etkilenmemiştir (Şekil 4.29).

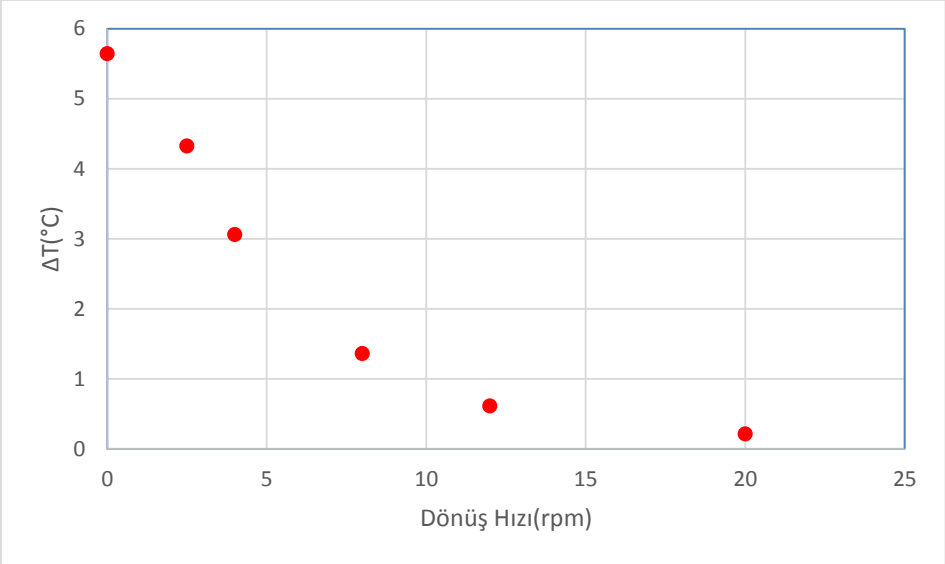


Şekil 4.29 Endüstriyel sistemde ürün içerisinde elde edilen elektrik alan

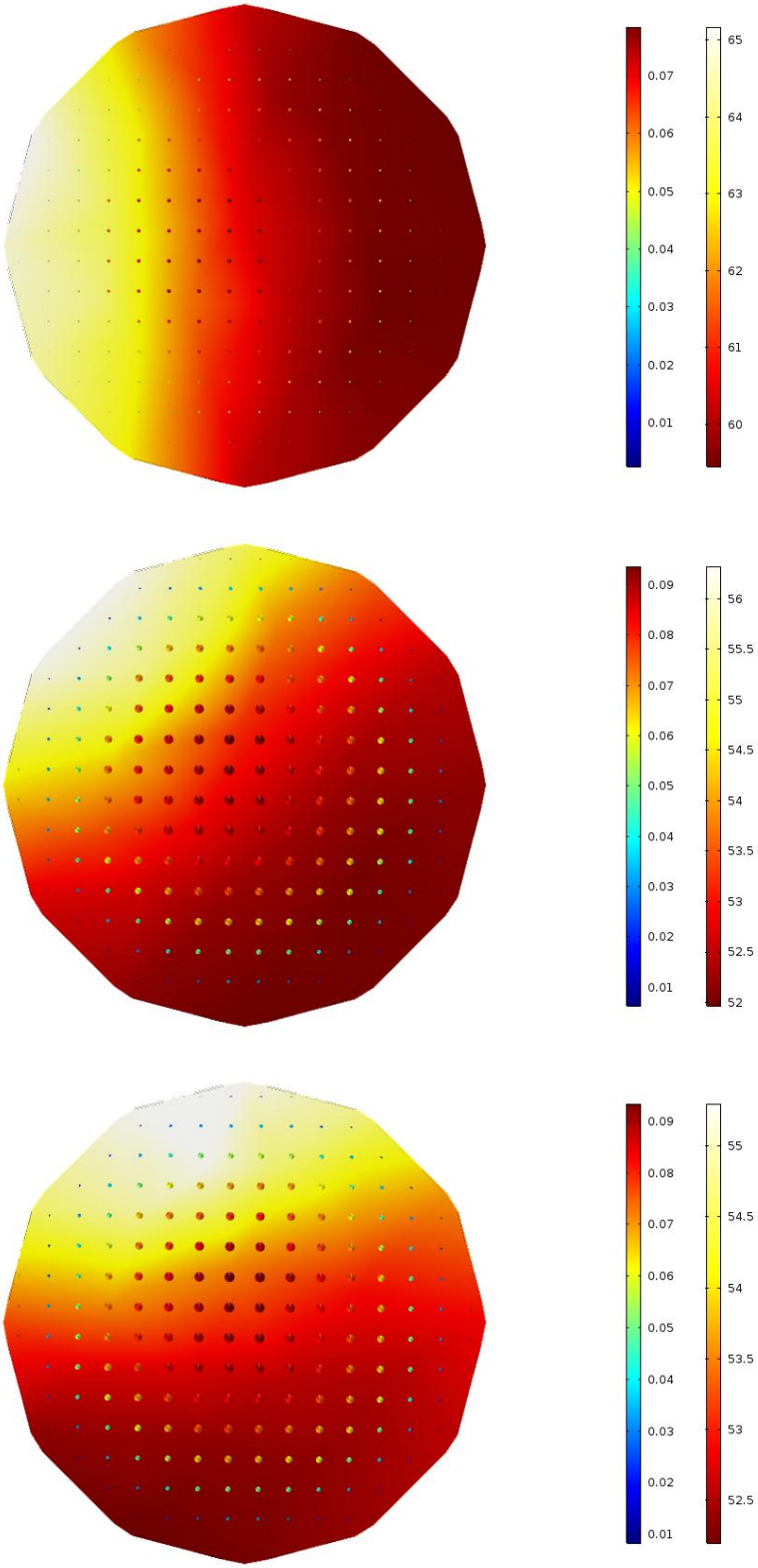
Sistem içerisinde sürekli akış gerçekleştiği için dönme etkisiyle de oluşan santrifüj kuvveti ürün sıcaklık dağılımını etkileyen kuvvet olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4.30 farklı dönme hızlarında ürün hacminde elde edilen sıcaklık farkını (oluşan maksimum sıcaklık ile ürün giriş sıcaklığı, 4 °C arasındaki fark); şekil 4.31'de ise boru çıkışında elde edilen maksimum ve minimum sıcaklıklar arasındaki farkı göstermektedir. Gözlendiği gibi uygulanan dönme hızının ürün sıcaklık tekdüzeliği üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Uygulanan dönme hızlarında boru çıkışında elde edilen sıcaklık ve hız profili şekil 4.32 ve 4.33'te sistem içerisinde oluşan hız profili ise şekil 4.34 ve 4.35'te gösterilmektedir. Dönme hareketinin uygulanmadığı koşula göre 20 rpm dönme hızı uygulandığı durumda boru çıkış yüzeyindeki sıcaklık farkı her ne kadar % 96,2 azalsa da 8 rpm 'den sonra dönme hızı etkisinin azaldığı net olarak gözlenmektedir.



Şekil 4.30 Farklı dönüş hızlarında ürün hacmi içerisinde elde edilen sıcaklık farkları

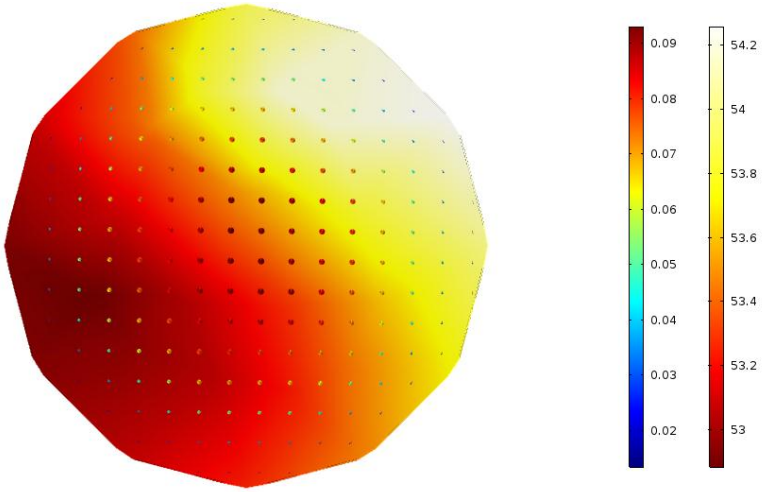


Şekil 4.31 Farklı dönüş hızlarında sistemden çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık farkları

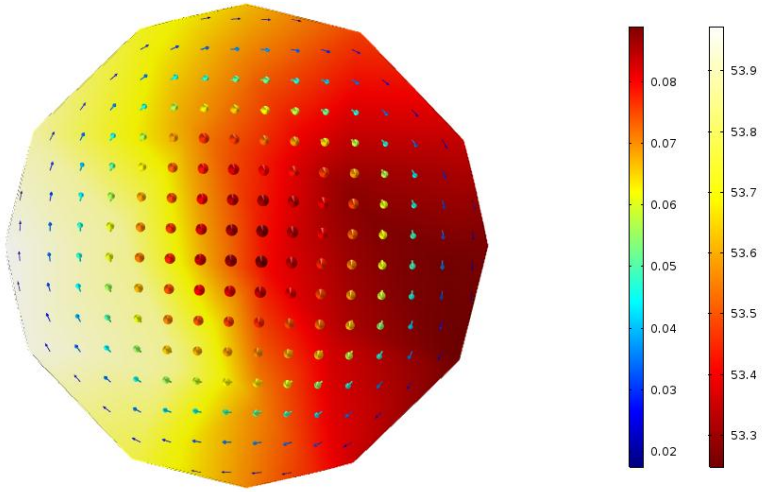


Şekil 4.32 0, 2,5 ve 4 rpm dönme hızlarında boru çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve hız profili değişimi

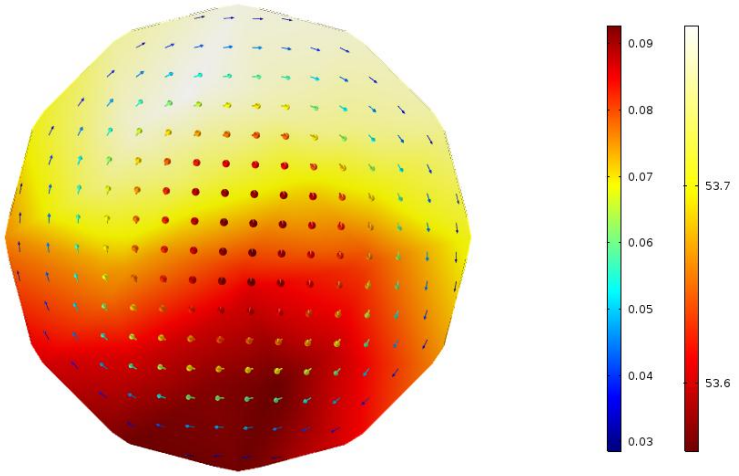
a. 0, b. 2,5, c. 4 rpm



a



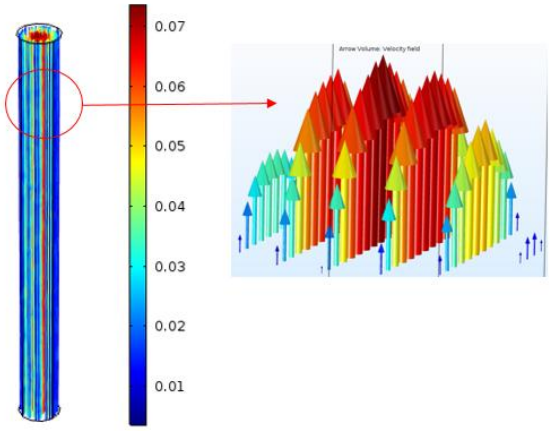
b



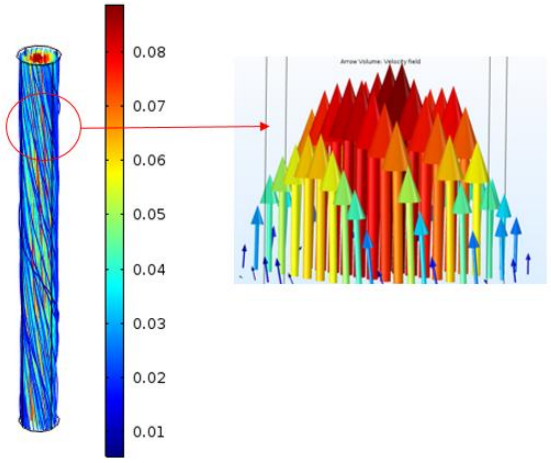
c

Şekil 4.33 8, 12 ve 20 rpm dönme hızlarında boru çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve hız profili değişimi

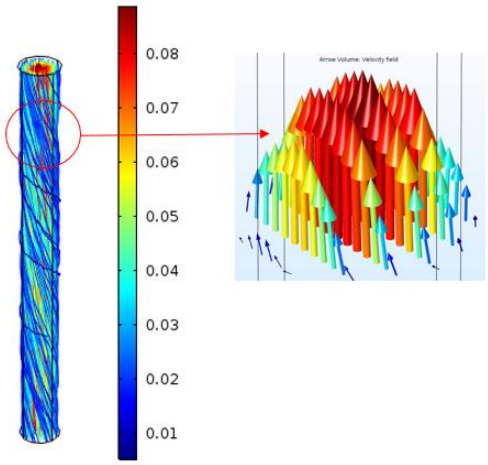
a. 8, b. 12, c.20 rpm



a



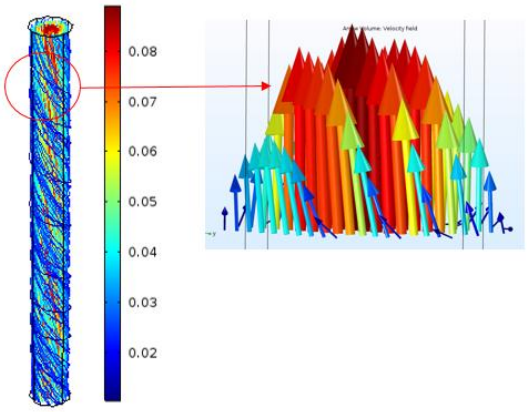
b



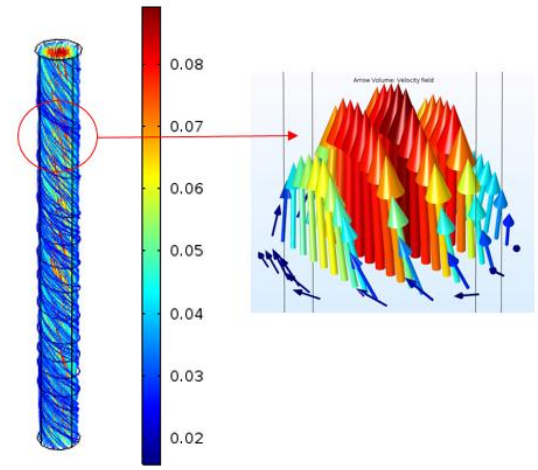
c

Şekil 4.34 0, 2,5 ve 4 rpm dönme hızlarında sistem içerisinde oluşan hız profili değişimi

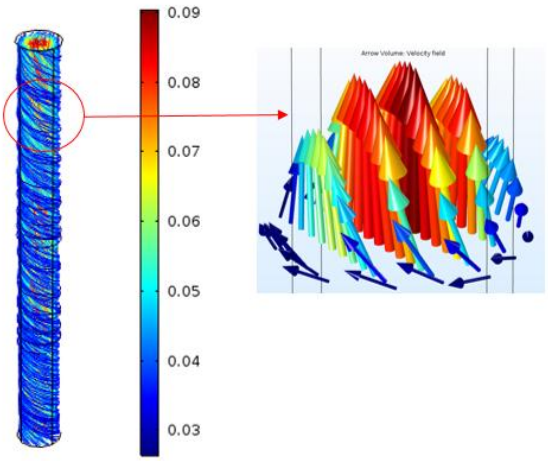
a. 0, b. 2,5, c. 4 rpm



a



b



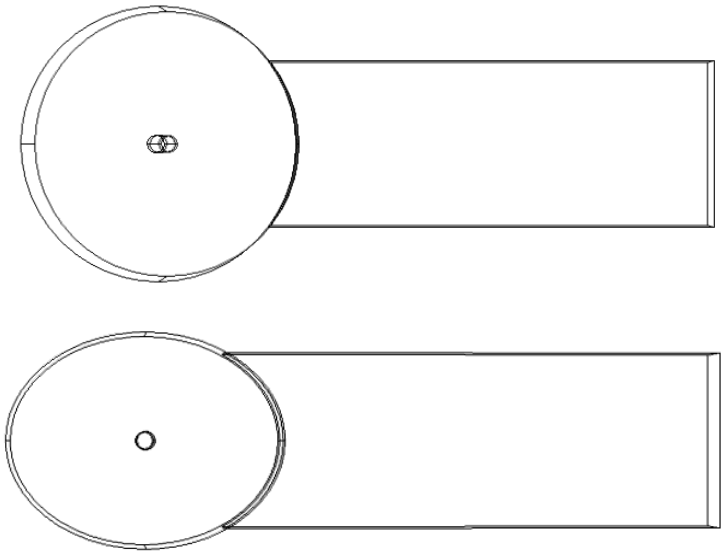
c

Şekil 4.35 8, 12 ve 20 rpm dönme hızlarında sistem içerisinde oluşan hız profili değişimi

a. 8, b. 12, c.20 rpm

4.2.2 Optimum proses için endüstriyel sistem geometri optimizasyonu

Kullanılan sürekli akış mikrodalga sistemde, kullanılan mikrodalga güçten maksimum verim alabilmek -ürün tarafından maksimum absorbsiyonun sağlanması- amacıyla, öncelikle sistem geometrisi optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde açıklandığı şekilde kavite geometrisi optimizasyon öncesi durumda küçük ve büyük yarıçapları eşit olan bir elips kabul edilmiş ve bu elipsi oluşturan a ve b yarıeksenleri optimizasyon sırasında kontrol parametreleri olarak kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak sistematik bir şekilde oluşturulan farklı elips geometrileri kullanılarak kavite içerisinde oluşan elektrik alanın ürün tarafından maksimum absorbsiyonunun sağlandığı durum optimum geometri olarak kabul edilmiştir. Geometri optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen eliptik geometrinin a ve b-yarıeksenler, sırasıyla 0,195 m ve 0,151 m olarak bulunmuştur. Şekil 4.36 optimizasyon sonucu elde edilen kavite geometrisini gösterirken; şekiller 4.37 ve 4.38'de sırasıyla ürün içerisinde oluşan elektrik alan ve ürün içerisinde elde edilen sıcaklık profilleri optimizasyon öncesi ve sonrası durum için gösterilmektedir. Şekil 4.37 incelendiğinde renk skalasından da anlaşılacağı üzere kavite içerisinde oluşan maksimum elektrik alan miktarı azalmasına rağmen asıl önemli olan sonuç ürün tarafından absorbe edilen ve ısı enerjisine dönüştürülen elektrık alan miktarı olduğundan bu değer incelenmiş ve optimizasyon öncesi ürünün yaklaşık olarak 30 MW/m^3 enerji absorbe ettiği belirlenirken optimizasyon sonucu yaklaşık olarak 63 MW/m^3 ($\approx$ % 52 artış) enerji absorbe ettiği belirlenmiştir. Şekil 4.38'de elde edilen yüksek sıcaklık artışı tamamen ürün tarafından gerçekleştirilen mikrodalga enerji absorbsiyonunun ne kadar arttırılabildiğini göstermektedir.

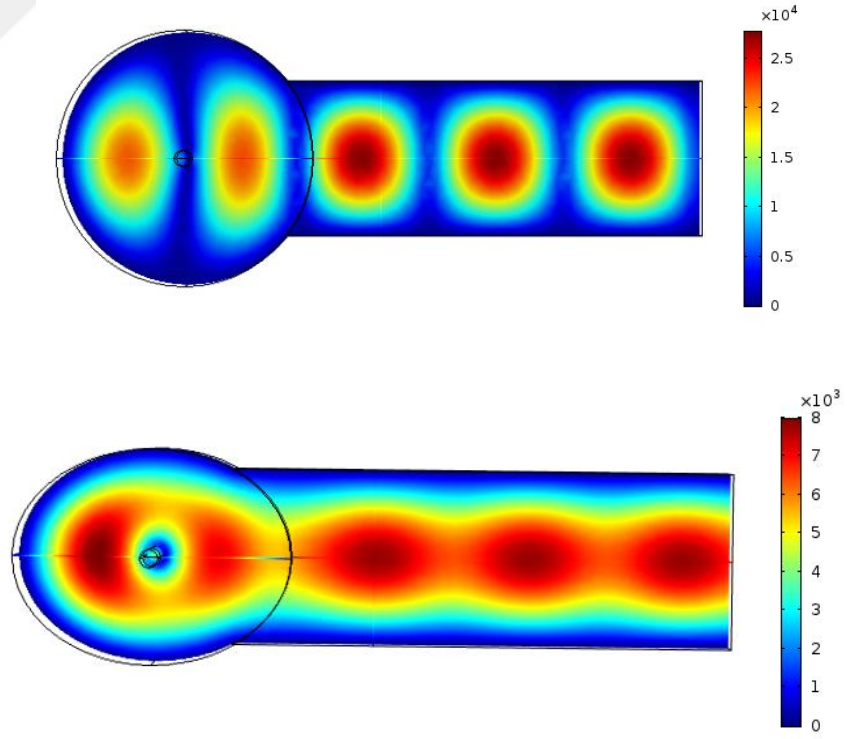


a

b

Şekil 4.36 Optimizasyon çalışmaları sırasında kullanılan sistem geometrisi

a. optimizasyon öncesi, b. Optimizasyon sonrası

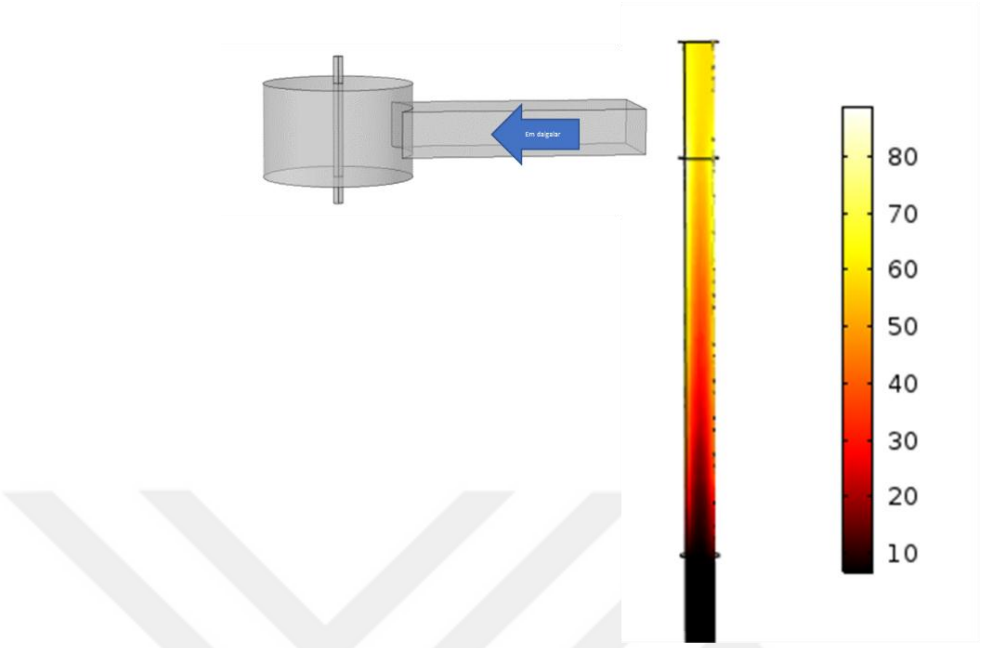


a

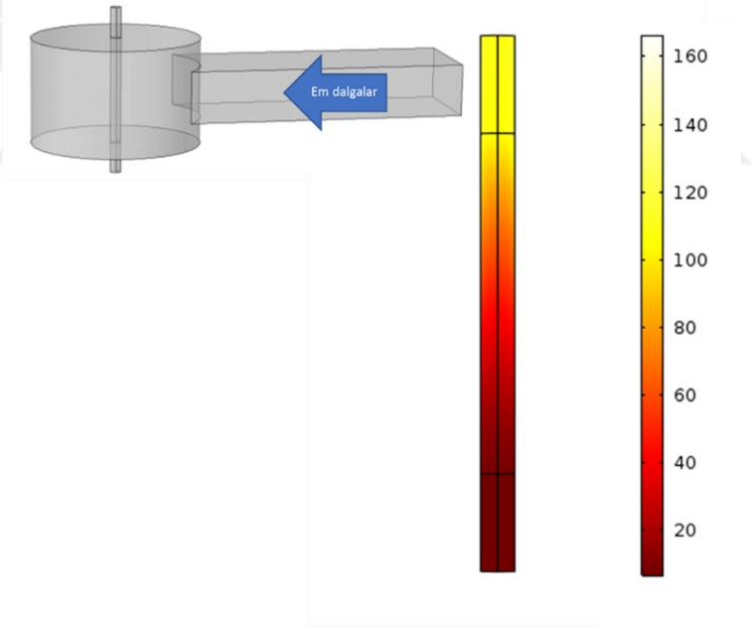
b

Şekil 4.37 Optimizasyon çalışmaları sırasında elde edilen elektrik alan

a. optimizasyon öncesi, b. Optimizasyon sonrası



a



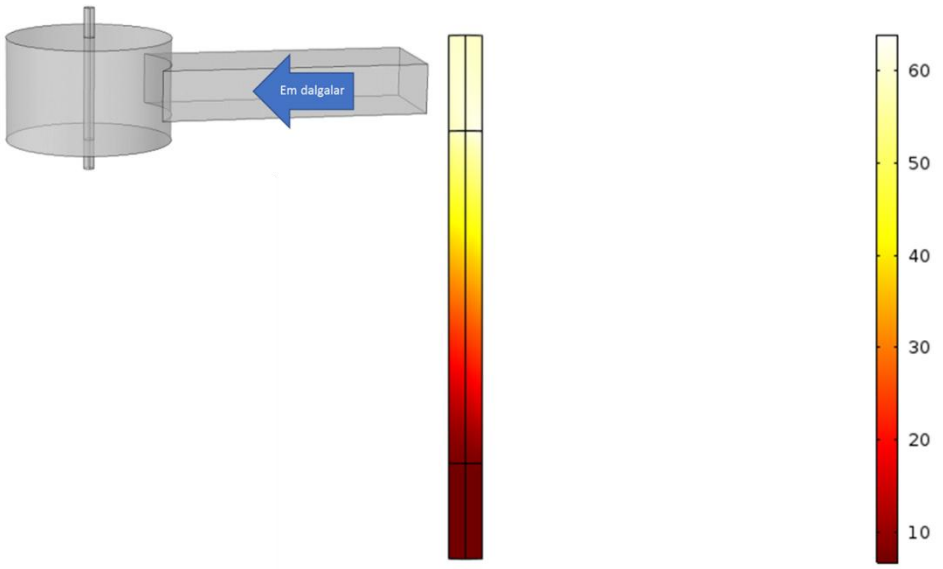
b

Şekil 4.38 Optimizasyon çalışmaları sırasında elde edilen sıcaklık dağılımı

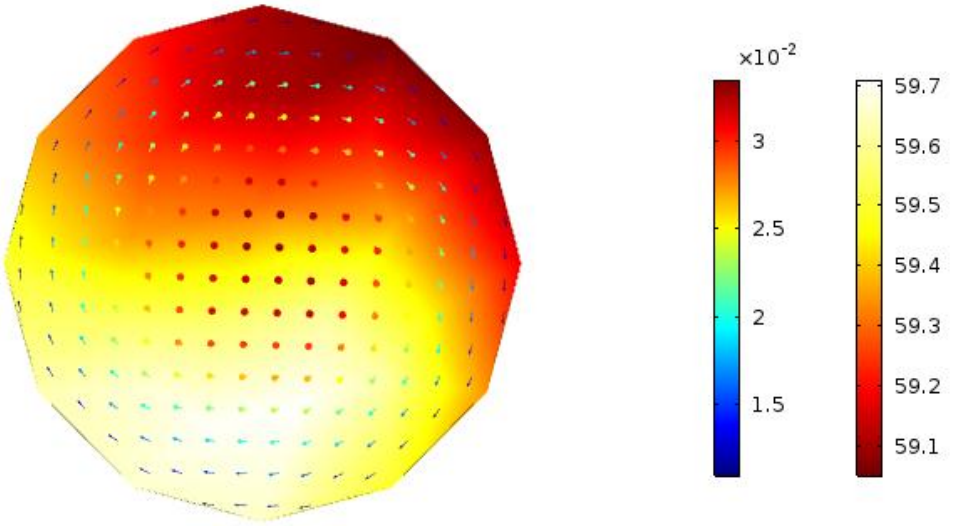
a. optimizasyon öncesi, b. optimizasyon sonrası

4.2.3 Optimize edilmiş geometride sıcaklık tekdüzeliğinin sağlanabilmesi için mikrodalga uygulama gücü ve ürün akış hızının optimize edilmesi

Şekil 4.38'de görüldüğü üzere sistem, geometri optimizasyonun da amaçlandığı gibi, maksimum enerjiyi absorbe etmekte fakat buna ek olarak istenmeyen bir durum olan ürün sıcaklık artışı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle endüstriyel kullanıma uygun bir sistem için, sistem çıkışında üründe sıcaklık tekdüzeliğinin sağlanması gereklidir. Bu kapsamda, dönme uygulamasının ürün sıcaklık dağılımına etkisi net bir şekilde gösterildiğinden, 8 rpm dönme hızında mikrodalga uygulama gücü ve ürünün sisteme giriş hızının belirlenmesi amacıyla optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen mikrodalga gücü 776.48 W ve ürünün sisteme giriş hızı 0,0174 m/s (0,416 L/dk.) olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda sistem çıkışında ürün maksimum ve minimum sıcaklık farkı 0,66 °C, ürünün çıkış ortalama sıcaklığı 59,4 °C ve ürün içerisinde elde edilen maksimum sıcaklık ise 63,9 °C olarak belirlenmiştir. Şekil 4.39'da hacimsel sıcaklık dağılımı ve şekil 4.40'da ürün çıkış noktasında elde edilen sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.39 Mikrodalga gücü ve ürün akış hızı optimize edilmiş 8 rpm dönme hızı uygulanan sistemde elde edilen hacimsel sıcaklık dağılımı



Şekil 4.40 Mikrodalga gücü (776,48 W) ve ürün akış hızı (0,416 L/dk.) optimize edilmiş ve 8 rpm dönme hızı uygulanan sistemde ürün çıkış noktasında elde edilen sıcaklık dağılımı

8 rpm dönme hızında; sistem geometrisi, uygulanan mikrodalga gücü, ürün giriş hızı kapsamında optimizasyon çalışması tamamlandıktan sonra ürün çıkış sıcaklığı temelinde pastörizasyon değeri (Eşitlik 3.5) belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.41 belirlenen optimum koşullar ve 8 rpm dönme hızında elde edilen sıcaklık değişimi ve buna bağlı olarak hesaplanan letalite değeri $\left(10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}}\right)$ görülmektedir.

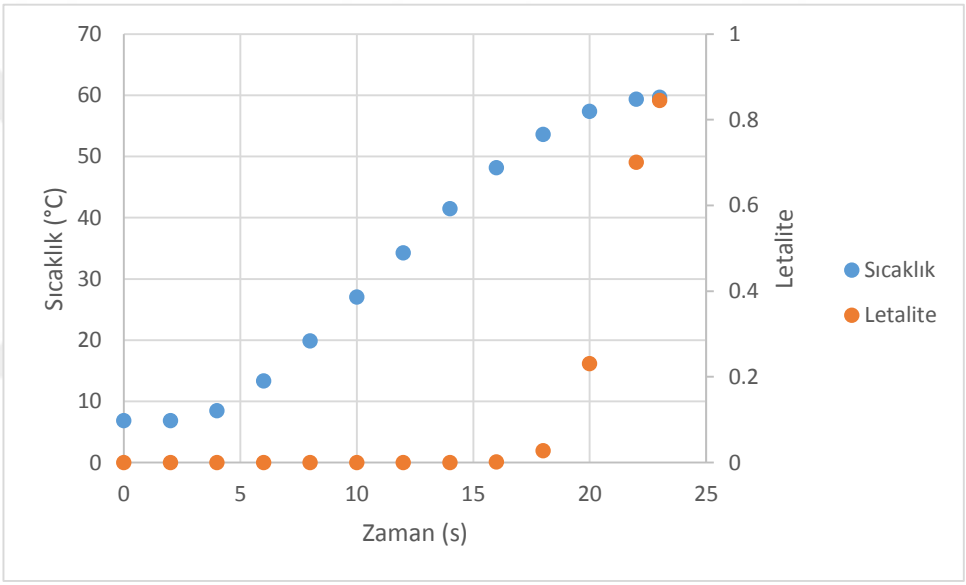
Burada kullanılan ürünün sistemden çıkış sıcaklık değişimini, optimizasyon çalışmaları yatışkın koşullarda gerçekleştiğinden, zamana bağlı olarak belirleyebilmek amacıyla yatışkın olmayan koşullarda bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Sistem içerisinde kullanılan toplam boru uzunluğu 40 cm ve optimum ürün akış hızı 0,0174 m/s olduğundan, beklendiği üzere ürünün sistemde kalış (yani yatışkın koşulda sıcaklık dağılımı elde edebilmek amacıyla yatışkın olmayan simülasyon çalışmasında kullanılması gereken) süresi $\left(\frac{0,40}{0.0174} \approx 23\right)$ s'dir. Bu durumda şekil 4.41'de gösterilen letalite değişim grafiğinin altında kalan alan $\left(\int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt = 2\right)$ s'dir. Bu değere göre bu süre sonunda *S.*Enteritidis sayısında beklenen azalma 0,2 log evresi olarak

gerçekleşecektir (*S.*Enteritidis için 60 °C'de D-değeri, Jin vd. (2008) tarafından 0,17 dk. olarak verilmektedir):

$$F = D \cdot \log\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

$$2 = (0{,}17 \cdot 60) \cdot \log\left(\frac{N_0}{N}\right) \Rightarrow$$

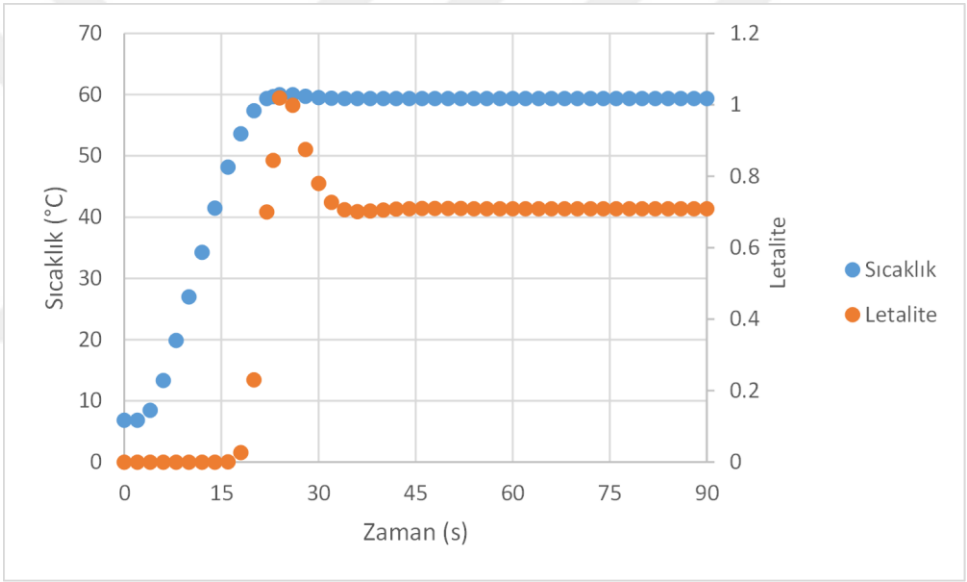
$$\log\left(\frac{N_0}{N}\right) \approx 0{,}2$$



Şekil 4.41 Belirlenen optimum koşullar ve 8 rpm dönme hızında elde edilen sıcaklık değişimi ve buna bağlı olarak hesaplanan letalite değeri değişimi

Buna göre yeterli 5 log evrelik azalma sağlanması için ürünün sistemden çıktıktan sonra (60 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda üründe denatürasyon başlama ihtimalinden dolayı sistemde uygulanan mikrodalga gücünün arttırılması ya da ürün hızının azaltılması pastörizasyon değerinin arttırılması için bir seçenek değildir (Hou vd. 1996, James vd. 2002).) bir tutma tüpünde soğutma öncesi yeterli pastörizasyon değeri sağlanana kadar tutulması gereklidir. Yumurta pastörizasyonu kapsamında yapılan çalışmalarda pastörizasyon ortamı sıcaklığı genel olarak 53,3 ve 61 °C arasında değişmektedir (Geveke vd. 2016).

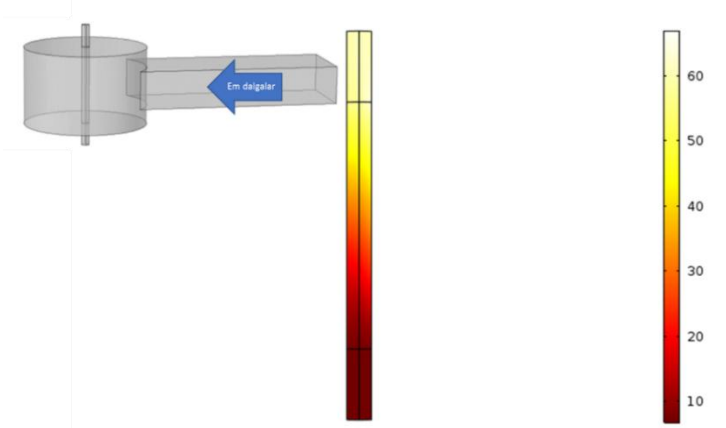
Bu durumda letalite bazında yapılan analiz sonucuna göre toplam tutma süresinin 90-23=67 s olması durumunda elde edilecek pastörizasyon değeri 51.1 s ve buna göre oluşacak log devre azalma miktarı da 5 olacaktır. Bu durumda $67\,s \times 0,0174 \frac{m}{s} = \approx 1.17\,m$ uzunluğunda izole edilmiş bir tutma tüpünün sisteme bağlanması yeterli olacaktır. Şekil 4.42 tutma tüpünde kullanılması durumunda ürün sıcaklık ve letalite değişimini göstermekte olup 23. s'den sonra letalite değerinde gözlenen düşme sistem çıkışı ile tutma tüpü arasındaki meydana gelebilecek sınır koşuluna bağlı olarak ürün sıcaklığında meydana gelen değişim sonucunda gerçekleşmiştir.



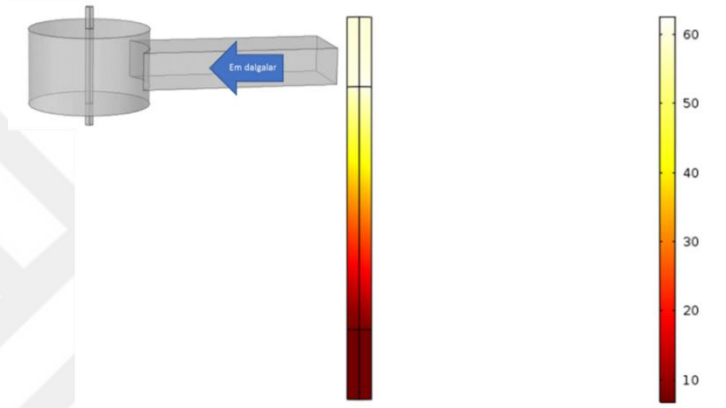
Şekil 4.42 Mikrodalga sistem sonrası tutma tüpü kullanıldığı durumda üründe meydana gelen sıcaklık ve letalite değeri değişimi

4.2.4 Optimize edilmiş sistemde farklı dönme hızlarının sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi

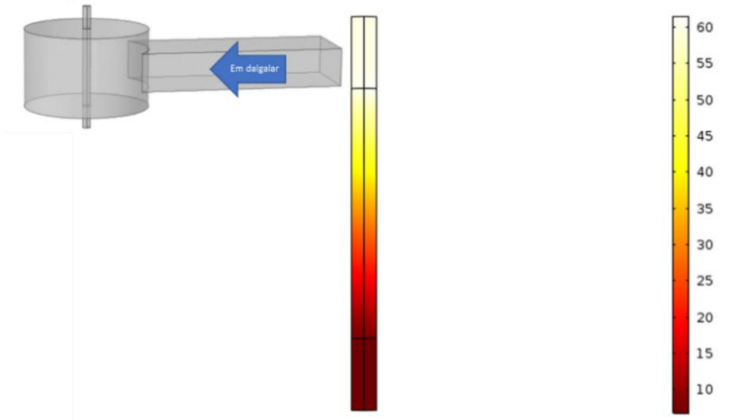
Maksimum enerji absorbe etmesi için optimize edilen geometride, 8 rpm için çıkış sıcaklık dağılımında tekdüzeliği sağlama amacıyla yapılan optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen sistem gücü ve akış hızı değerleri kullanılarak farklı dönme hızlarında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak 8 rpm de elde edilen değerlerin diğer dönme hızlarında da optimizasyon koşullarını sağladığı belirlenmiştir..



a



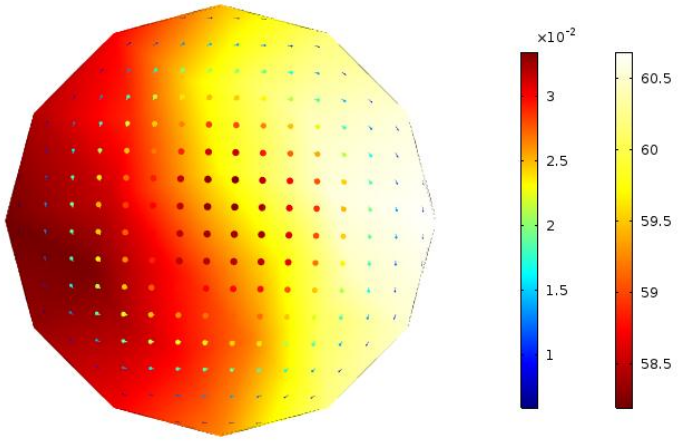
b



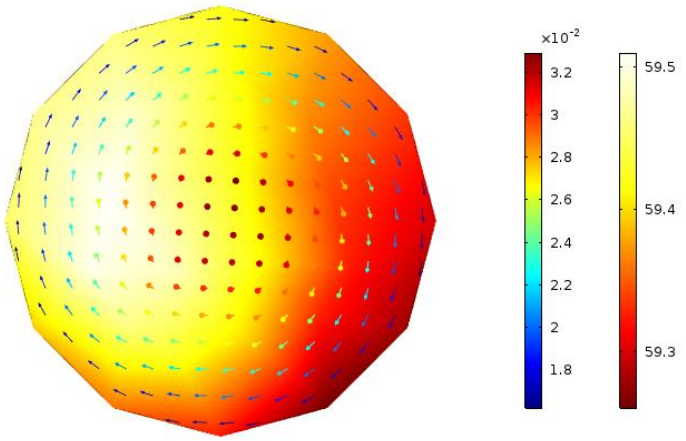
c

Şekil 4.43 Farklı dönme hızlarında elde edilen hacimsel sıcaklık dağılımları

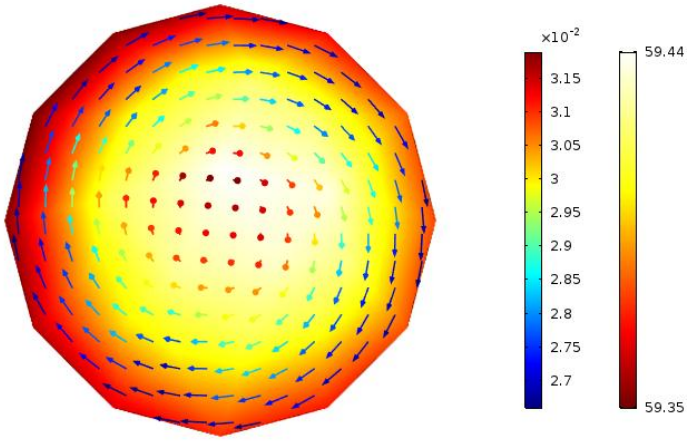
a. 4, b. 12, c. 20 rpm



a



b



c

Şekil 4.44 Farklı dönme hızlarında elde edilen boru çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımları

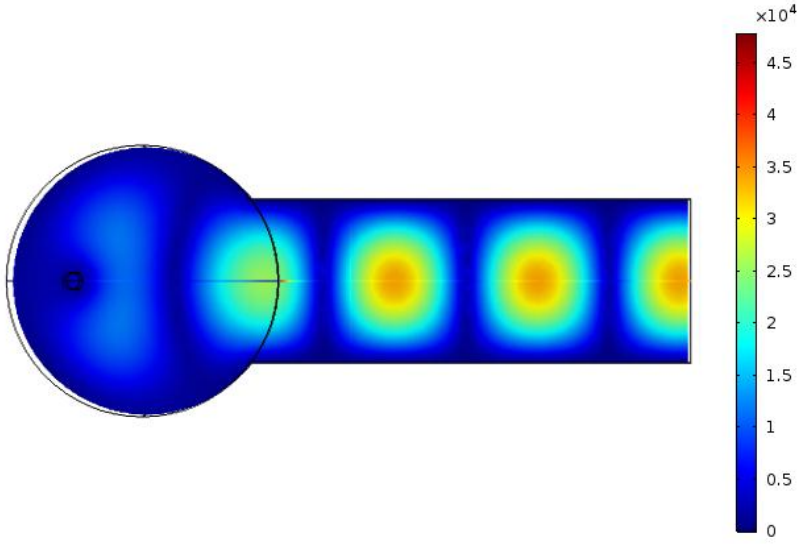
a. 4, b. 12, 20 rpm

Ancak, 4 rpm dönme hızında ürün içerisinde oluşan maksimum sıcaklık 65 °C'nin altına belirlenen optimum güç ve hız koşullarında düşürülememiş ve 4 rpm 'de gerçekleştirilen optimizasyon denemesinde de istenen sonuç sağlanamamıştır. Bu durumda ürün içerisinde elde edilen maksimum sıcaklık 67,05 °C olup 65 °C sıcaklığı aşan ürün miktarı toplam hacmin % 4,8'i kadar olmuştur (bu dönme hızının uygulandığı proses koşullarında % 4,8 kayıp olacaktır). 4, 12 ve 20 rpm dönme hızlarında elde edilen sıcaklık dağılımı şekil 4.43 ve 4.44'te gösterilmektedir

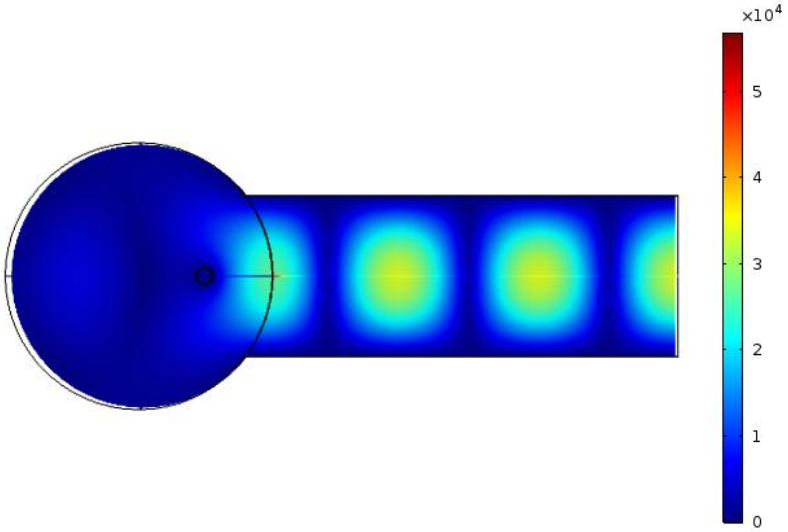
4.2.5 Endüstriyel ölçekli sistemde; sıcaklık dağılımına, akışın gerçekleştiği boru sayısı ve konumunun etkisi

Materyal ve yöntem bölümünde açıklandığı şekilde sistem içerisindeki boru lokasyonu ve sayısı kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımını etkileyerek boru/borular içerisindeki sıcaklık dağılımını değiştirmektedir. Bu amaçla hazırlanan sistemde tek boru için, borunun önde veya arkada olmasının elektromanyetik alan üzerine etkisi şekil 4.45'te ve buna bağlı olarak elde edilen hacimsel sıcaklık dağılımı ve sistem çıkışında elde edilen sıcaklık dağılımı da şekil 4.46 ve 4.47'de gösterilmiştir.

Üretim kapasitesinin artırılması hedef alınarak tasarlanan 3-borulu, 4-borulu ve 5-borulu sistemlerde de boruların lokasyonu ve içerideki ürün hacmindeki değişim sebebiyle farklı elektromanyetik alanlar ve farklı sıcaklık dağılımları elde edilmektedir. Şekil 4.48 ve 4.49'da bu sistemlerin elektromanyetik alan dağılımları karşılaştırılırken şekil 4.50'de buna bağlı olarak elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır.



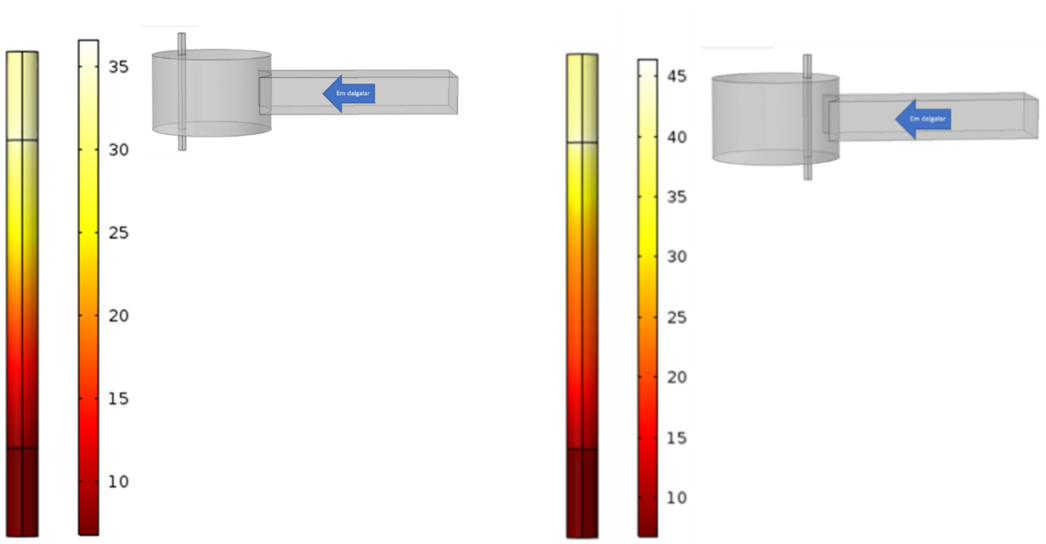
a



b

Şekil 4.45 Tek borulu endüstriyel sistemde boru lokasyonunun elektromanyetik alan dağılımı üzerine etkisi

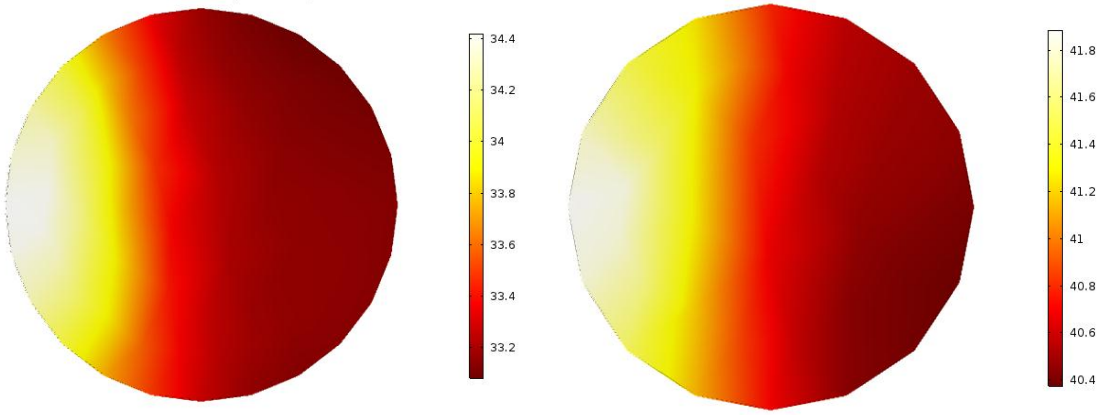
a. önde, b. arkada



a b

Şekil 4.46 Tek borulu endüstriyel sistemde boru lokasyonunun hacimsel sıcaklık dağılımı üzerine etkisi

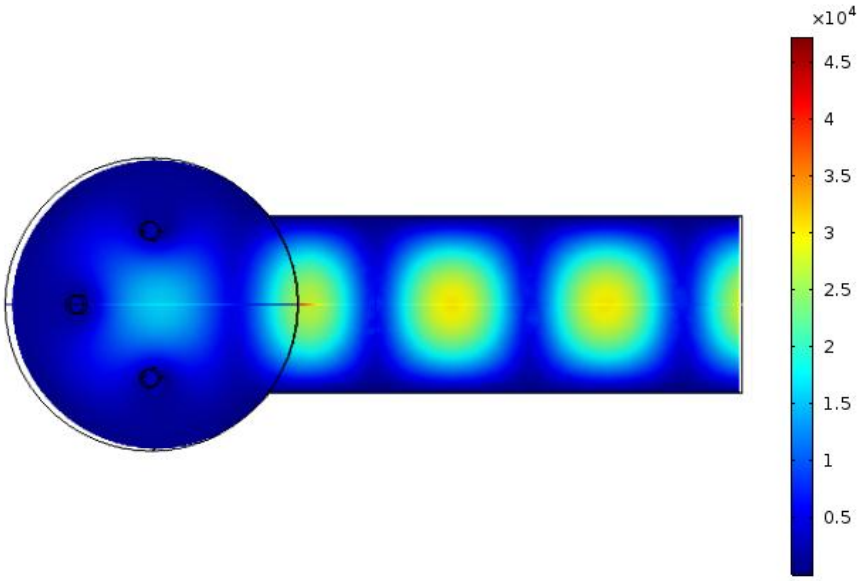
a. Ön taraf hacimsel sıcaklık dağılımı, b. arka taraf hacimsel sıcaklık dağılımı



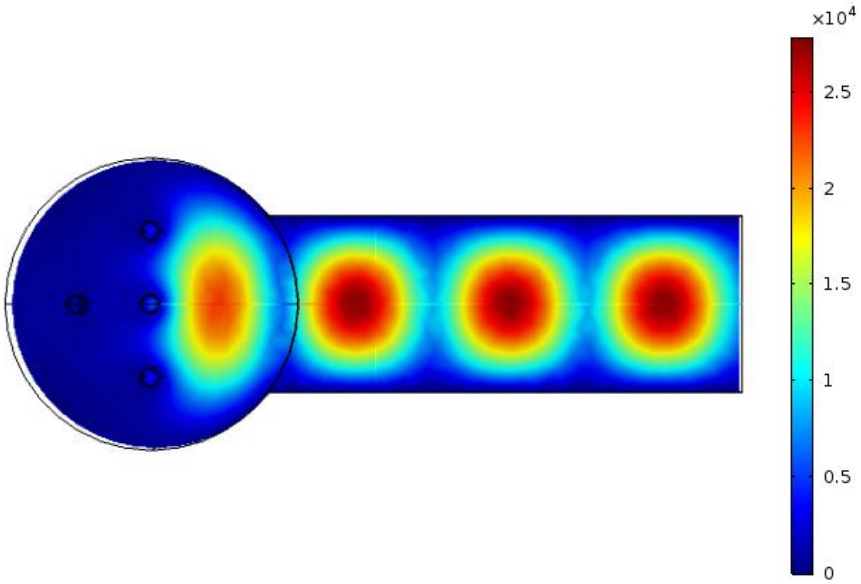
a b

Şekil 4.47 Tek borulu endüstriyel sistemde boru lokasyonunun sistem çıkışı sıcaklık dağılımı üzerine etkisi

a. ön taraf sistemden çıkış kesitinde sıcaklık dağılımı, b. arka taraf sistemden çıkış kesitinde sıcaklık dağılımı)



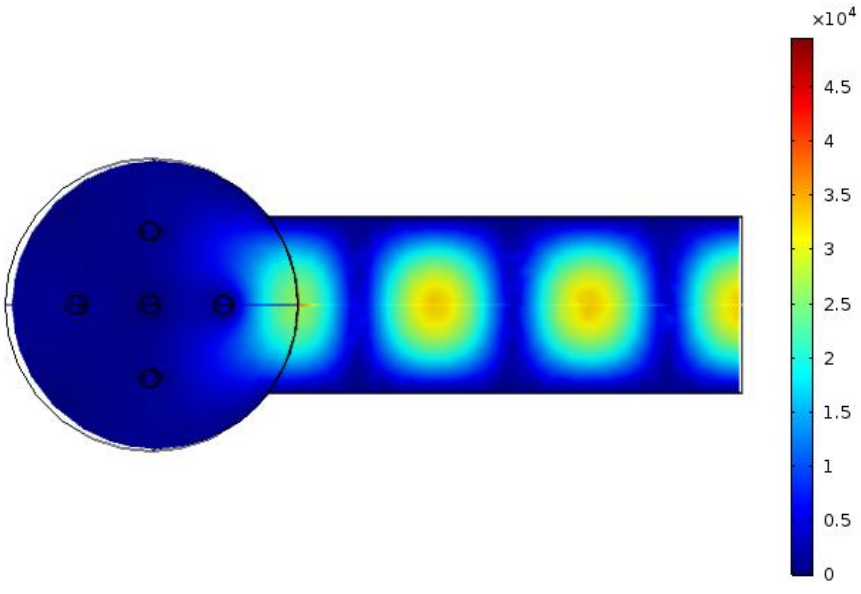
a



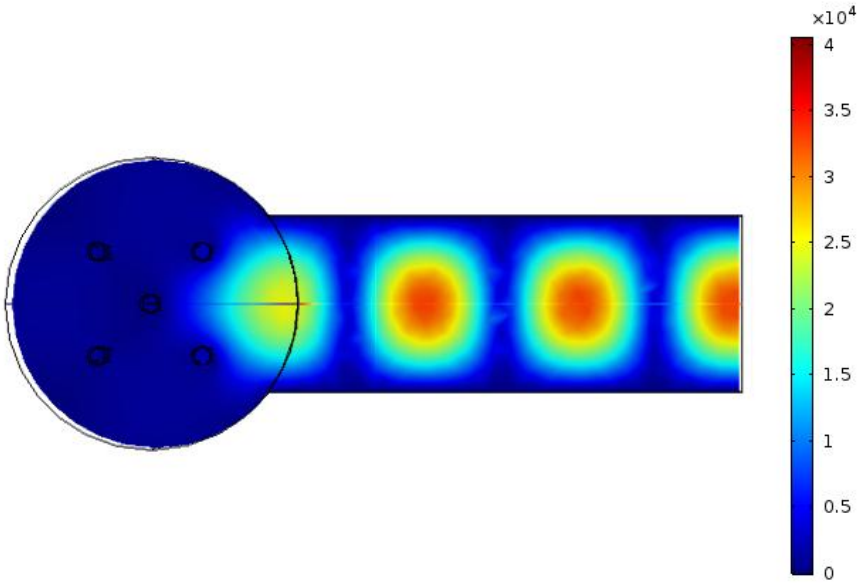
b

Şekil 4.48 3 ve 4 borulu sistemlerde elektromanyetik alan dağılımı

a. 3 borulu sistem, b. 4 borulu sistem



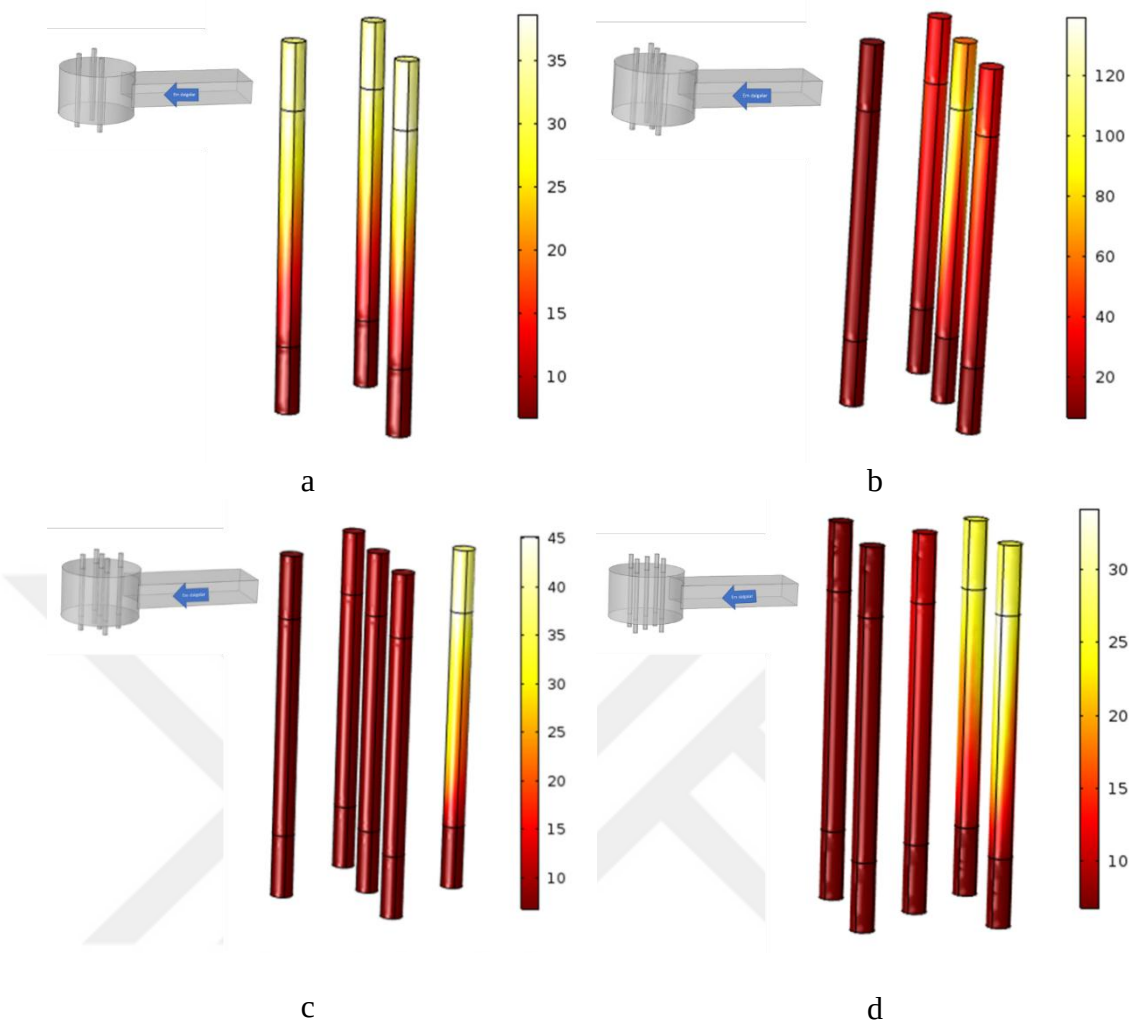
a



b

Şekil 4.49 5 borulu iki farklı sistemde elektrik alan dağılımı

a. 5 borulu sistemde birinci düzen, b. 5 borulu sistem ikinci düzen

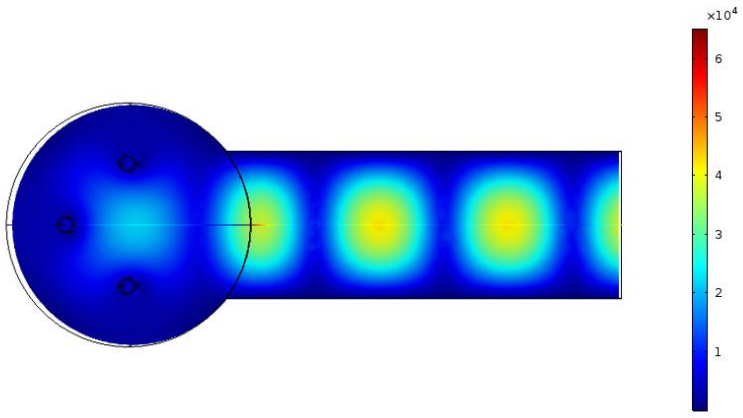


a b

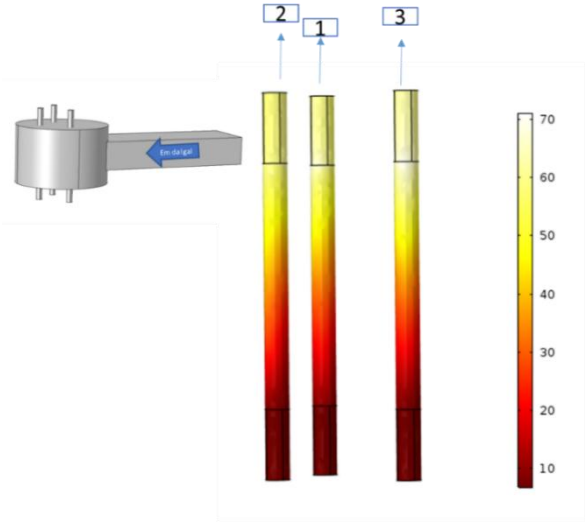
c d

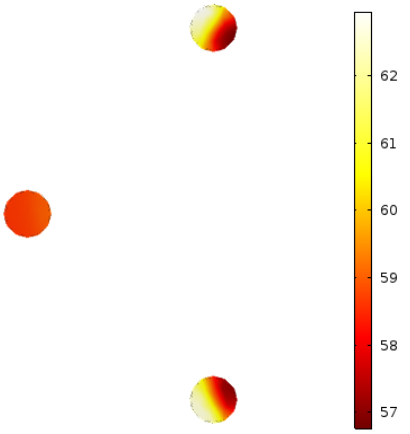
Şekil 4.50 Boru sayısı ve lokasyonunun sıcaklık dağılımı üzerine etkisi

a. 3 borulu sistem, b. 4 borulu sistem, c. 5 borulu sistemde birinci düzen, d. 5 borulu sistem ikinci düzen)

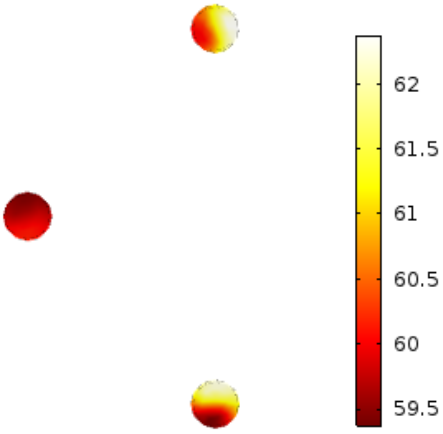


Şekil 4.51 Gücü artırılan 3 borulu sistemde elde edilen elektrik alan dağılımı





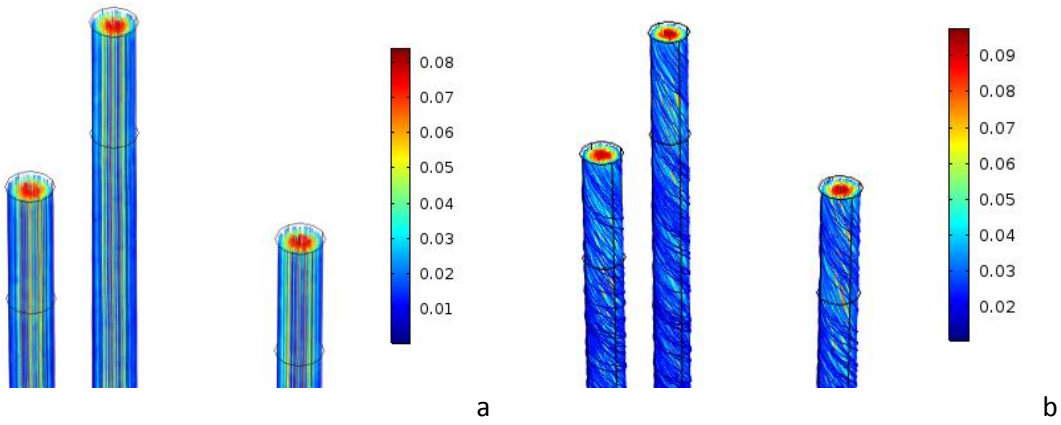
a



b

Şekil 4.52 Gücü artırılan 3 borulu endüstriyel sistemde elde edilen sıcaklık dağılımı

a. dönmenin uygulanmadığı durum, b, 8 rpm dönme hızının uygulandığı durum



Şekil 4.53 Gücü artırılan 3 borulu endüstriyel sistemde elde edilen hız profili

a. dönmenin uygulanmadığı, b. 8 rpm dönme hızının uygulandığı durum

3 borunun kullanıldığı endüstriyel sistemde, şekil 4.50'den görsel olarak da anlaşılacağı üzere farklı borular arası sıcaklık farkı diğer sistemlere göre daha düşüktür. Bu sistemin ilk tasarımında kullanılan mikrodalga gücü (5 kW) ürünün istenilen çıkış sıcaklığına erişmesi için yeterli olmadığından aynı sistemde daha yüksek mikrodalga gücü (9,75 kW) kullanılmıştır. Bu sistemde gösterilen boru çıkışında 1, 2 ve 3 numaralı borular için sırasıyla ortalama 59,97, 58,77 ve 59,96 °C elde edilmiştir. Sistem çıkışında maksimum ve minimum sıcaklık değerlerindeki fark ise 6,2, 4,3 ve 5,3 °C olarak ortaya çıkmıştır. Sistem içerisinde elde edilen elektrik alan ve sıcaklık dağılımı sırasıyla şekil 4.51 ve 4.52'de gösterilmiştir. Şekil 4.52.a'da da net olarak gösterildiği şekilde sistem çıkışında ürünün 60 °C'nin üstünde sıcaklıkta olan bölgeleri bulunmaktadır. Bu nedenle, bu durumun da ortadan kaldırılabilmesi amacıyla, kullanılan endüstriyel sistemde belirlenmiş olan 8 rpm dönme hızının uygulanması durumunda ise sistem çıkış sıcaklık ortalama değerleri 61,2, 59,8, 60,9 °C ve sıcaklık farkları ise 2,3, 0,7, 3,0 °C olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2.b). Ancak, dönme hareketinin uygulandığı durumda, akış sırasındaki hız profili ve buna bağlı olarak elektrik alan ve sıcaklık dağılımı değiştiğinden istenilen çıkış sıcaklığına ulaşabilmek için 11,875 kW mikrodalga gücü kullanılmıştır. Dönme hareketinin uygulanması ve dönme hareketinin uygulandığı durumlarda elde edilen hız profilleri ise şekil 4.53'te gösterilmektedir. Ürün giriş hızı olarak 0,05 m/s olan bu durumda, z-yönünde oluşan ortalama ve maksimum hız sırasıyla 0,036 ve 0,080 m/s olarak elde edilmiştir. Giriş ortalama hızının 0,05 m/s

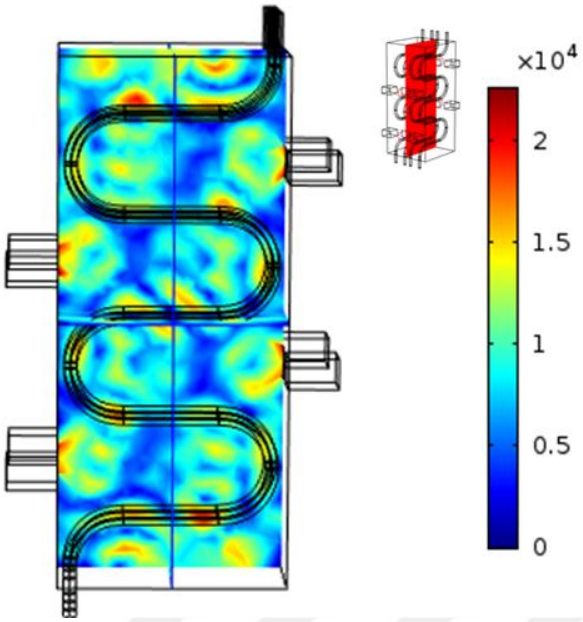
olması durumunda boru merkezinde maksimum hız değerinin 0,1 m/s olması beklenirken, bu değerin altında oluşum direkt olarak akış çözümünde kullanılan ağ yapısı ile ilgili olarak ortaya çıkmıştır. Daha yoğun ağ yapılarında çözüm süresi çok fazla uzadığından ve bu ağ yapısıyla dönme hızının sıcaklık dağılımına etkisi gösterildiğinden daha yoğun ağ yağısı çözümleri kullanılmamıştır. 8 rpm dönme hızının uygulandığı durumda ise z-yönünde ortalama ve maksimum hız 0,042 ve 0,095 olarak elde edilmiştir. Ürün içerisinde oluşan hız profilinin bu şekilde değişiklik göstermesi beklendiği gibi ürünün sistem içerisinde kalma süresini de azalttığından istenilen sıcaklık değerine ulaşabilmek için gerekli mikrodalga gücü arttırılmıştır.

4.2.6 Endüstriyel skalada alternatif sistem tasarımı

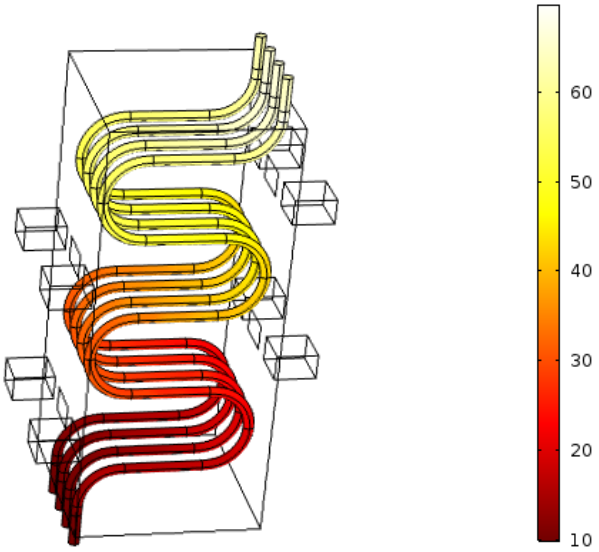
Endüstri için tasarlanan sistemde daha önceden de belirtildiği gibi 2450 MHz frekansla çalışan magnetron tarafından 2500 W gücün sisteme verildiği varsayılmıştır. Bu sistemde elde edilen elektrik alan ve buna bağlı olarak sistem içerisindeki ürünlerde elde edilen sıcaklık dağılımı şekil 4.54'te gösterilmiştir.

Materyal metot kısmında bahsedildiği gibi borular arası uzaklık, çıkış sıcaklığının bütün borularda aynı olması için optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda borular arası elde edilen uzaklık sırasıyla X1 için 0.142 m ve X2 için 0.033 m olarak belirlenmiş ve bu uzaklık değerlerinde boruların çıkış noktaları arası sıcaklık farkı 0.135 °C olarak bulunmuştur. Bu optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen elektrik alan ve sıcaklık dağılımı şekil 4.55'te gösterilmiştir.

Elde edilen yeni geometri çıkış sıcaklığı 60°C olacak ve içeride oluşan maksimum sıcaklık 65°C'yi geçmemesi amacıyla mikrodalga gücü ve akış hızı değiştirilerek optimize edilmiş ve bunun sonucunda sistem için optimum güç ve ürün giriş hızı sırasıyla 2302 W ve 0,256 m/s olarak bulunmuştur. Bu sistemde elde edilen sıcaklık dağılımı ise şekil 4.56'da verilmiştir.



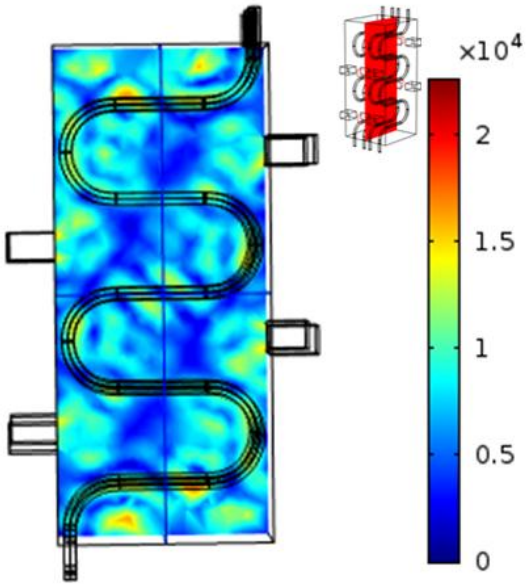
a



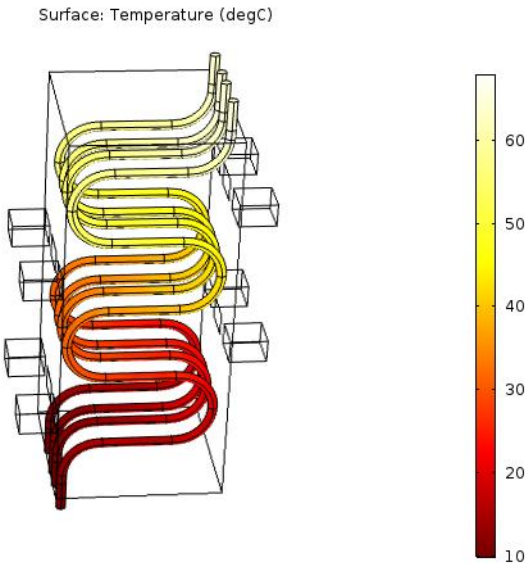
b

Şekil 4.54 Tasarlanan alternatif sistem içerisinde 2500 W değerinde elde elektrik alan ve sıcaklık dağlımı

a. elektrik alan, b. sıcaklık dağılımı



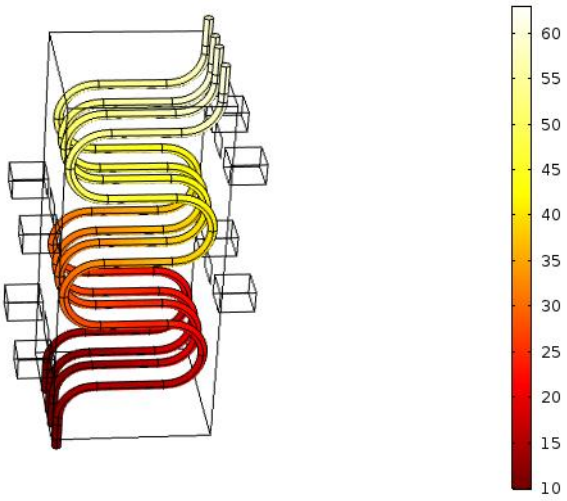
a



b

Şekil 4.55 Borular arası uzaklığın optimize edildiği sistemde elde edilen elektrik alan ve sıcaklık dağılımı

a. elektrik alan, b. sıcaklık dağılımı



Şekil 4.56 Sistem gücü ve giriş hızı optimize edilmiş sistemde elde edilen elektrik alan ve sıcaklık dağılımı

a. elektrik alan, b. sıcaklık dağılımı

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında laboratuvar ve endüstriyel ölçekte mikrodalga sistemde sıvı ürünlerin prosesi matematiksel olarak modellenmiş, geliştirilen modeller laboratuvar ölçekte deneysel olarak doğrulanmış ve bu modeller kullanılarak farklı sistem tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında izlenen adımlar ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmektedir:

- Laboratuvar ölçekli ve endüstriyel ölçekli sistemlerde sıvı ürünlerin mikrodalga prosesinde sistem içi elektrik alan ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi amacıyla matematiksel model çalışmaları Comsol çoklu fizik programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu modeller laboratuvar ölçekli sistemde deneysel olarak doğrulanmış| deneysel doğrulama çalışmalarında ürün olarak saf su ve % 0,5 CMC çözeltisi kullanılmıştır. Bu çalışmalar 2,5 rpm dönme hızında gerçekleştirilmiştir.

- Deneysel verilerle doğrulanan model kullanılarak, mikrodalga sistemlerde akışın olduğu boruya uygulanacak dönme hareketinin sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliğine etkisi incelenmiştir. Su ve % 0,5 CMC çözeltisi kullanıldığı durumlarda ürün içerisinden alınan farklı kesitlerdee ve uygulanan dönme frekansına bağlı olarak kesit içi sıcaklık farklarında (maksimum ve minimum sıcaklık farkı) 0 ile 20 rpm dönme frekansı aralığında % 23,6-95,8 arasında azalma elde edilerek dönme uygulamasının sıcaklık tekdüzeliği üzerine etkisi gösterilmiştir.

- Tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilen endüstriyel sistemde ürün olarak sıvı tüm yumurta kullanıldığı durumda uygulanan dönme hareketi frekansının, boru çıkışı olarak kabul edilen kesitte, ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliği üzerine etkisi incelenmiş ve 0 ile 20 rpm dönme frekansı aralığında çıkış kesitindeki sıcaklık farkında % 23,3-96,2 arasında azalmanın sağlanabileceği gösterilmiştir.

- Endüstriyel sürekli akış mikrodalga sistemde ürünün absorbladığı enerji miktarının artırılması ve daha verilmli bir proses tasarımı için kavite geometri optimizasyon çalışmaları yapılmış ve silindirik (20,3 cm yarıçap) kavite geometrisi yerine eliptik kavite geometrisi (19,50 ve 15,12 cm yarıçaplarında= kullanmanın bu açıdan önemli bir değişiklik sağlayacağı belirlenmiştir. Optimal geometride ürün tarafından absorbe edilen ortalama enerji miktarının (W/m^3) ≈ % 52 oranında artabileceği de bu tasarımda gösterilmiştir.

- Optimal geometrili endüstriyel ölçekli sürekli akış mikrodalga sisteminde çıkış sıcaklığının istenilen seviyede olması ve tekdüze olması amacıyla sisteme ürün giriş hızı ve mikrodalga gücü optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda ürün giriş hızı 0,0174 m/s (0,416 L/dk - 653 kg/gün) olarak belirlenirken mikrodalga gücü de 776,48 W olarak elde edilmiştir. Bu koşullarda ürün ortalama çıkış sıcaklığı 59,4 °C olarak elde edmiş ve sistem çıkışında maksimum sıcaklık ile minimum sıcaklık arası fark 0,66 °C olarak hesaplanmıştır. Bu sistemde ürün 23s'de kararlı koşula ulaşmakta ve sistemden çıkan ürünün 67 s süresince bir tutma tüpünde tutulması sonucunda *S. enteritidis* yükünde 5 log evrelik bir azalma sağlanabileceği de ayrıca hesaplanmıştır.

- Başlangıçta planlanan silindirk kaviteli sistemde sistem içi boru lokasyonunun ürün ısınma üzerine etkisi incelenmiş ve borunun ürün merkezinde daha fazla enerji absorbe ettiği belirlenmiştir. Sonrasında ürün kapasitesi artırma amacıyla 3, 4 ve 5 borulu sistemlerde elektrik alan ve sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi amacıyla simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışma sonucunda 3 boru kullanılan sistemin borular arası sıcaklık farkı temel alındığında endüstriyel uygulama için daha uygun bir tasarım olduğuna karar verilmiş ve bu sistemde ürün çıkış sıcaklığının ve tekdüzeliğinin dönme hareketi uygulamasıyla iyileştirilmesi amacıyla simülasyon çalışmalarıyapılmıştır. Sonuç olarak 11,875 kW mikrodalga gücünde 0,05 m/s (her boru için 1,196 L/dk - toplamda 3 boru için 5,6 ton/gün) hızla sisteme giriş yapan 8 rpm dönme frekansında 3 borunun çıkışındaki ürün sıcaklığının maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın 3 °C'nin altında olacağı belirlenmiştir.

- Endüstride kullanılan ve farklı bir tasarımı olan özel bir sürekli akış mikrodalga sisteminin sanal tasarımı ürün olarak % 0,5 CMC kullanıldığı durum için yapılmıştır. Sistem içerisinde ürünün akışının gerçekleştiği 4 helikal boru olduğu varsayılan bu sistemde, borular arası uzaklığın, ürün çıkış sıcaklık farkının azaltılması için, belirlenmesi amacıyla optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak bu sistemde ürünün (% 0,5 CMC) çıkış sıcaklığının istenilen düzeyde olması amacıyla ürün giriş hızı ve mikrodalga gücü optimize edilmiş ve sistemde uygulanması gereken başlangıç gücü 8 port için toplamda 18,416 kW ve ürün giriş hızı her boru için 0,05 m/s (4 boru için toplamda 4,78 L/dk) olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda 18,416 kW mikrodalga gücünde çalışan sistemin 6,8 ton/gün kapasitede ürün (% 0,5 CMC) proses edebileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Anonim. 2016. Yumurta Tavukçuluğu Verileri. Yumurta Üreticileri Merkez Birliği, Ankara

Anonim. 2018. Web Sitesi: http://mikrodalga.com.tr/index.php/2018/07/25/kuru-cilek-ve-kuru-armut/ Erişim Tarihi: 13.1.2019.

Anonymous. 2006. Risk Assessments for *Salmonella enteritidis* in Shell Eggs and *Salmonella* spp. in Egg Products. FSIS-USDA, Omaha, NV, USA.

Anonymous. 2015. Web Sitesi: http://www.pstcc.edu/departments/natural_behavioral_sciences/Web%20Physics/Chapter%20034.htm Erişim Tarihi: 02.12.2018

Anonymous. 2018. Web Sitesi: http://cem.com/media/contenttype/media/literature/525_ApNote_Disc_Teach_GEN1.pdf Erişim Tarihi: 01.12.2018.

Anonymous. 2018. Web Sitesi: http://flowjet.pl/en/aktualnosci/ Erişim Tarihi: 01.12.2018.

Anonymous. 2018. Web Sitesi: https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/ Erişim Tarihi: 22.10.2018.

Basak, T. and Meenakshi, A. 2006. A theoretical analysis on microwave heating of food slabs attached with ceramic plates: Role of distributed microwave incidence. Food research international, 39(8), 932-944.

Berk, Z. 2018. Food process engineering and technology. Academic Press.

Bozkurt, H. and İçier, F. 2011. The change of apparent viscosity of liquid qhole egg during ohmic and conventional heating. Journal of Food Process Engineering, 35, 120-133.

Bradshaw, S.M., Van Wyk, E.J. and De Swardt, J.B. 1998. Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (South Africa), 98(4), 201-210.

Campanone, L.A. and Zaritzky, N.E. 2005. Mathematical analysis of microwave heating process, Journal of Food Engineering, 69, 359-368.

Castelain, C. and Legentilhomme, P. 2006. Residence time distribution of a purely viscous non-Newtonian fluid in helically coiled or spatially chaotic flows. Chemical Engineering Journal, 120, 181-191.

Chatterjee, S., Basak, T. and Das, S.K. 2007. Microwave driven convection in a rotating cylindrical cavity: a numerical study. Journal of Food Engineering, 79, 1269-1279.

Coimbra, J.S., Gabas, A.L., Minim, L. A., Rojas, E.E.G., Telis, V.R. and Telis-Romero, J. 2006. Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products. Journal of Food Engineering, 74, 186-190

Coronel, P., Simunovic, J. and Sandeep, K.P. 2005. Determination of the feasibility of processing food materials using continuous flow tubular microwave heating by solving the penetration equation of microwave energy. Institute of Food Technoligsts Annual Meeting, New Orleans, LA. Paper Number: 52-6.

Coronel, P., Simunovic, J., Sandeep, K.P. and Stewart, H. 2003. Continuous flow microwave processing of pumpable foods: Dielectric measurement and classification. Institute of Food Technologists Annual Meeting, Chicago, IL. Paper Number: 92B-14

Coronel, P., Simunovic, J. and Sandeep, K.P. 2003b. Temperature profiles within milk after heating in a continuous-flow tubular microwave system operation at 915 MHz. Journal of Food Science, 68, 1976-1981.

Coronel, P., Simunovic, J., Sandeep, K.P., Cartwright, G.D. and Kumar, P. 2008. Sterilization solutions for aseptic processing using a continuous flow microwave system. Journal of Food Engineering, 85(4), 528-536.

Cuccurullo, G. and Giordano, L. 2015. Numerical vs experimental continuous pipe flow in microwave heating. Advances in Environmental and Geological Science and Engineerig, sayfa 457-463.

D'Addio, L., Carotenuto, C., Di Natale, F. and Nigro, R. 2013. Heating and cooling of hazelnut paste in alternate blades scraped surface heat exchangers. Journal of food engineering, 115(2), 182-189.

Datta, A., Prosetya, H. and Hu, W. 1992. Mathematical modeling of batch heating of liquids in a microwave cavity. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 27, 38-48.

Datta, A.K., Sumnu, G. and Raghavan, G. S. V. 2005. Dielectric properties of foods. Engineering properties of foods, 501-566.

Dawoud, M.M. 2003. High frequency radiation and human exposure. In Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003),1-7

Decareau, R.V. 1985. Microwaves in the food processing industry. Academic Press, 234, New York.

Dincov, D.D. and Parrott, K.A. 2004. Computational analysis of microwave heating pattern in resonant multimode cavities, ACM Symposium on Applied Computing. 14-17 March. Nicosia, Cyprus.

Ditchfield, C., Tadini, C.C., Singh, R.K. and Toledo, R.T. 2006. Velocity and temperature profiles, heat transfer coefficients and residence time distribution of

a temperature dependent Herschel-Bulkley fluid in a tubular heat exchanger. Journal of food engineering, 76(4), 632-638.

Erdogdu, F., Tutar, M., Sarghini, F. and Skipnes, D. 2017. Effects of viscosity and agitation rate on temperature and flow field in cans during reciprocal agitation. Journal of Food Engineering, 213, 76-88.

Erdogdu, F., Karatas, O. and Sarghini, F. 2018. A Short Update on Heat Transfer Modelling for Computational Food Processing in Conventional and Innovative Processing. Current Opinion in Food Science.

Gentry, T.S. and Roberts, J.S. 2005. Design and evaluation of a continuous flow microwave pasteurization system for apple cider, Lebensmittel Wissechauft and Technologie, 38, 227-238.

Geveke, D.J., Gurtler, J.B., Jones, D.R. and Bigley, B.W. 2016. Inactivation of *Salmonella* in shell eggs by hot water immersion and its effect on quality. Journal of Food Science, 81, M709-M714.

Góngora-Nieto, M.M., Pedrow, P.D., Swanson, B.G. ve Barbosa-Cánovas, G.V. 2003. Energy analysis of liquid whole egg pasteurized by pulsed electric fields. Journal of Food Engineering, 57(3), 209-216.

Gregory, A.P. and Clarke, R.N. 2006. A review of RF and microwave techniques for dielectric measurements on polar liquids. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 13(4), 727-743.

Hamid-Samimi, M., Swartzel, K.R. and Ball JR, H.R. 1984. Flow behavior of liquid whole egg during thermal treatments. Journal of Food Science. 49: 132-136.

Hebbar, H.U. and Rastogi, N.K. 2012. Microwave heating of fluid foods. In Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods, Cullen, P. J. Cullen, Tiwari, B. K. and Valdramidis, V. (eds), Academic Press, 369-409, San Diego.

Heperkan, D. ve Gökler, O. Kabuklu Yumurtada Patojen Riskleri ve Muhafaza Yöntemleri, http://www.dunyagida.com.tr/haber/kabuklu-yumurtada-patojen-riskleri-ve-muhafaza-yontemleri/1929, Erişim Tarihi: 09.06.2018

Hou, H., Singh, R.K., Muriana, P.M. and Stadelman, W.J., 1996. Pasteurization of shell eggs. Food Microbiology, 13, 93-101.

Howard, Z.R., O'Bryan, C.A., Crandall, P.G. and Ricke, S.C. 2012. *Salmonella enteritidis* in shell eggs: current ıssues and prospects for control. Food Research International, 45, 755-764.

James, C., Lechevalier, V. and Ketteringham, L. 2002. Surface pasteurizaton of shell eggs. Journal of Food Engienering, 53, 193-197.

Jia, X. 1993. Experimental and numerical study of microwave power distributions in a microwave heating applicator. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 28(1) ,25-31.

Jin, T., Zhang, H., Boyd, G. and Tang, J. 2008. Thermal resistance of *Salmonella enteritidis* and *Escherichia coli* K12 in liquid egg determined by thermal-death time disks. Journal of Food Engineering. 84: 608-614.

King, E. E. and Barclay, D. 2003. Microwave-based extraction, In: Sample Preparation for Trace Element Analysis. Mester, Z. and Sturgeon, R (eds), Elsevier, 257-300, Amsterdam.

Kingston (Skip), H.M. and Haswell, S.J. 1997. Microwave-Enhanced Chemistry-Fundamentals, Sample Preparation and Applications, American Chemical Society, 772, Washington.

Kumar, P., Coronel, P., Truong, V.D., Simunovic, J., Swartzel, K. R., Sandeep, K. P. and Cartwright, G. 2008. Overcoming issues associated with the scale-up of a continuous flow microwave system for aseptic processing of vegetable purees. Food research international, 41(5), 454-461.

Liu, S., Fukuoka, M. and Sakai, N. 2013. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. Journal of Food Engineering, 115(1), 49-62.

Lokhande, M.P., Arbad, B.R., Landge, M.G. and Mekrotra, S.C. 1996. Dielectric properties of albumin and yolk avian egg. Indian Journal of Biochemistry and Biophysics, 33, 156-158.

Mello, P.A., Barin, J.S. and Guarnieri, R.A. 2014. Microwave Heating. In: Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Analysis.Flores, E. M. M.(ed), Elsevier, 59-75, USA.

Mermelstein, N.H. 2001. Pasteurization of shell eggs. Food Technology, 55(12), 72-73, 79.

Metaxas, A. C. 1991. Microwave heating. Power Engineering Journal, 5(5), 237-247.

Metaxas, A. C. and Meredith, R. J., 1983. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus, 357, London.

Muira, N., Yagihara, S. and Mashimo, S. 2003. Microwave dielectric properties of solid and liquid foods investigated by time-domain reflectometry. Journal of Food Science, 68(4), 1396-1403.

Nasrollahzadeh, F., Varidi, M., Koocheki, A. and Hadizadeh, F. 2017. Effect of microwave and conventional heating on structural, functional and antioxidant properties of bovine serum albumin-maltodextrin conjugates through Maillard reaction. Food Research International, 100, 289-297.

Nelder, J.A. and Mead, R. 1965. A simplex method for function minimization. The computer journal, 7(4), 308-313.

Nikdel, S., Chen, C.S., Parish, M. E., MacKellar, D.G. and Friedrich, L.M. 1993. Pasteurization of citrus juice with microwave energy in a continuous-flow unit. Journal of agricultural and food chemistry, 41(11), 2116-2119.

Pedreño-Molina, J.L., Monzó-Cabrera, J. and Catalá-Civera, J.M. 2007. Sample movement optimization for uniform heating in microwave heating ovens. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 17(2), 142-152.

Plaza-Gonzalez, P., Monzó-Cabrera, J., Catalá-Civera, J.M. and Sánchez-Hernández, D. 2004. New approach for the prediction of the electric field distribution in multimode microwave-heating applicators with mode stirrers, IEEE Trans. Magn., 40 (3), 1672-1678.

Prosetya, H. and Datta, A. 1991. Barch microwave heating of liquids: an experimental study. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 26, 215-226.

Raaholt, B.W., Isaksson, S., Hamberg, L., Fhager, A. and Hamnerius, Y. 2016. Continuous tubular microwave heating of homogeneous foods: evaluation of heating uniformity. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 50, 43-65.

Raghavan, G.V., Orsat, V. and Meda, V. 2005. Microwave processing of foods. Stewart Postharvest Review, 3(2), 1-7.

Salvi, D., Boldor, D., Aita, G.M. and Sabliov, C.M. 2011. COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids. Journal of food engineering, 104(3), 422-429.

Salvi, D., Ortego, J., Arauz, C., Sabliov, C.M. and Boldor, D. 2009. Experimental study of the effect of dielectric and physical properties on temperature distribution in fluids during continuous flow microwave heating. Journal of food engineering, 93(2), 149-157.

Scalzo, A.M, Dickerson, R.W. Jr., Peeler, J.T. and Read, R.B. Jr. 1970. The viscosity of egg and egg products. Food Technology, 24, 1301.

Sierra, I. and Vidal-Valverde, C. 2000. Influence of heating conditions in continuous-flow microwave or tubular exchange systems on the vitamin B_1 and B_2 content of milk. INRA, EDP Sciences, 80, 601-608.

Sperati C.A. and Starkweather H.W. 1961. Fluorine-containing polymers. II. Polytetrafluoroethylene. In: Fortschritte Der Hochpolymeren-Forschung. Advances in Polymer Science, vol 2/4. Springer, Berlin.

Stratakos, A.C., Delgado-Pando, G., Linton, M., Patterson, M.F. and Koidis, A. 2016. Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. Food chemistry, 190, 622-628.

Tajchakavit, S., Ramaswamy, H.S. and Fustier, P. 1998. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating. Food Research International, 31, 713-722.

Tang, J. and Resurreccion, F.P. 2009. Electromagnetic basis of microwave heating, In: Development of packaging and products for use in microwave ovens. Lorence, M.and Pesheck, P. (eds), CRC Press, 3-38, USA.

Telis-Romero, J., Thomaz, C.E.P., Bernardi, M., Telis, V.R.N. and Gabas, A.L. 2006. Rheological properties and fluid dynamics of egg yolk. Journal of Food Engineering, 74, 191-197.

Tuta, S. and Palazoğlu, T.K. 2017. Finite element modeling of continuous-flow microwave heating of fluid foods and experimental validation. Journal of Food Engineering, 192, 79-92.

Tutar, M. and Erdogdu, F. 2012. Numerical simulation for heat transfer and velocity field characteristics of two-phase flow systems in axially rotating horizontal cans. Journal of Food engineering, 111(2), 366-385.

Venkatesh, M.S. and Raghavan, G.S.V. 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. Biosystems Engineering. 88(1): 1-18.

Visser J. and Jeurnink Th. J.M. 1997. Fouling of heat exchangers in the dairy industry. Experimental Thermal and Fluid Science, 14, 407-424.

Vollmer, M. 2004. Physics of the microwave oven. Physics Education, 39(1), 74.

Wang, J., Tang, J., Wang, Y. and Swanson, B. 2009. Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments. LWT-Food Science and Technology, 42(7), 1204-1212.

Wang, J., Tang, J., Wang, Y. and Swanson, B. 2009. Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments. LWT-Food Science and Technology, 42(7), 1204-1212

Wang, Y., Wig, T.D., Tang, J. and Hallberg, L.M. 2003. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization.

Wei, W., Yin, H.M. and Tang, J. 2012. An optimal control problem for microwave heating. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 75(4), 2024-2036.

Yin, C. 2012. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. Bioresource technology, 120, 273-284.

Yousefi, T., Mousavi, S.A., Saghir, M.Z. and Farahbakhsh, B. 2013. An investigation on the microwave heating of flowing water: A numerical study. International Journal of Thermal Sciences, 71, 118-127.

Zhang, W., Liu, F., Nindo, C. and Tang, J. 2013. Physical properties of egg whites and whole eggs relevant to microwave pasteurization. Journal of Food Engineering, 118(1), 62-69.

Zhou, L., Puri, V.M., Anantheswaran, R.C. and Yeh, G. 1995. Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating—Model development and validation. Journal of food engineering, 25(4), 509-529.

Zhu, J., Kuznetsov, A.V. and Sandeep, K.P. 2007. Mathematical modeling of continuous flow microwave heating of liquids (effects of dielectric properties and design parameters). International Journal of Thermal Sciences, 46, 328-341.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüseyin TOPÇAM

Doğum Yeri : Altındağ / ANKARA

Doğum Tarihi : 21/06/1993

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Etimesgut Anadolu Lisesi (2011)

Lisans : Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü (2016)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2016 - Ocak 2019)

Uluslararası Kongre:

Erdogdu, F., Topcam, H., Altin, O., Karatas, O., Tutar, M., Tokur, B. and Sarghini, F. 2018. "Determination of optimal rotation rate of toroidal cans during axial rotation process: a computational study for viscosity effects," 32nd EFFoST International Conference, Nantes, France. **Poster** presentation. P1.195.

Erdogdu, F., **Topcam, H.**, Karatas, O., Altin, O., Tutar, M., Tokur, B. and Sarghini, F. 2018. "Mathematical modeling of temperature distribution and velocity profile in toroidal cans during thermal processing with horizontal-axial rotation," ICFP-2018 - XIIIth International Conference of Food Physicists, Antalya, Turkey. **Oral** presentation. O14.

Topcam, H. and **Erdogdu, F.** 2018. "Industrial designs for microwave pasteurization of liquid foods: a computational study," FoodSim 2018, Ghent, Belguim. Oral Presentation (In the proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling in the Food and Bio-Industry, pp. 166-170). **Oral** presentation.

Erdogdu, F., Topcam, H., Altin, O., Verhayen, D., Van Impe, J., Seow, T.K., Skipnes, D. and Skara, T. 2018. "Characterization of fish based model food systems for microwave heating modeling," FoodSim 2018, Ghent, Belguim. Oral Presentation (In the proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling in the Food and Bio-Industry, pp. 235-239). **Oral** presentation.

Topcam, H., Erol, B., Karatas, O. and **Erdogdu, F.** 2017. "Rotation rate and viscosity effects on temperature uniformity of microwave processed liquids: mathematical modeling for design and optimization of an industrial scale process," 31th EFFoST International Conference, Sitges, Spain. **Oral** presentation. O19.4.

Kitap Bölümü

Erdogdu, F., Topcam, H., Sargini, F., ve Marra, F. 2018. CFD modeling of natural-convection heating processes. In: *Computational Fluid Dynamics in Food Processing 2e.* Ed. Sun, D-W. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, Chapter 15.