

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİRA PASTÖRİZASYON PROSESİ İÇİN
İNOVATİF YÖNTEMLER GELİŞTİRİLMESİ**

Ozan KARATAŞ

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Ozan KARATAŞ tarafından hazırlanan “Bira Pastörizasyon Prosesi İçin İnovatif Yöntemler Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 06/12/2019 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 : Prof. Dr. R. Ertan ANLI



Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU



Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Rahmi UYAR



Aksaray Üniversitesi Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
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.

06.12.2019



Ozan KARATAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİRA PASTÖRİZASYON PROSESİ İÇİN İNOVATİF YÖNTEMLER GELİŞTİRİLMESİ

Ozan KARATAŞ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Bira üretim prosesinde konvansiyonel olarak tünel pastörizatörlerde aşamalı olarak ürünün ısıtılması ve soğutulması prensibine dayanan pastörizasyon sırasında üründe tat ve aroma kayıpları meydana gelmektedir. Uzun proses süresini kısaltmak ve ürün içerisinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı sağlamak amacıyla bira şişelerine uygulanacak dikey-dönme (EoE) hareketinin etkisi matematiksel model çalışmaları ile incelenmiştir. Bu amaçla geliştirilen modeller deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Pastörizasyon sırasında ürüne uygulanacak olan EoE hareketinin oluşacak sıcaklık dağılımına etkisini incelemek için farklı dönüş hızlarında (1, 2.5, 5 ve 10 rpm) model çalışmaları hazırlanmıştır. Her hız için 2 tur olacak şekilde ve bunlara ek olarak 1 rpm dönüş hızı ise sürekli olarak uygulanmıştır. 1 rpm’de ürün içerisinde sıcaklığın tekdüze olması anlamında önemli bir etki sağlandığı görülmüştür. Sürekli olarak devam eden 1 rpm dikey dönme işleminin ürün içi karışmaya bağlı olarak sıcaklık dağılımının tekdüze olduğu gözlenmektedir. Artan dönüş hızlarına bağlı olarak, dönüş hareketi sırasında ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı tekdüze olmasına karşın, bu süreçte ürün içerisinde oluşan doğal konveksiyonun da etkisini kaybetmeye başladığı da gözlenmiştir.

Bu çalışmalara ilave olarak Konvansiyonel olarak uygulanan tünel pastörizasyon prosesinde karşılaşılan duyuşal özellik kayıplarından dolayı proste inovatif bir değışiklik amacıyla mikrodalga uygulama için matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 2450 MHz frekans da çalışan bir mikrodalga sistemde 350 W güç ayarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen veriler matematiksel model doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Deneysel verilerle doğrulanan matematiksel modeller kullanarak sürekli bir sistemde akışın gerçekleştiğı boru içerisine yerleştirilen bir Arşimet vidası düzeneğinin ürün sıcaklık dağılımı ve tekdüzeliğine etkisi de ayrıca incelenmiştir. Bu tasarımda kullanılan farklı dönüş hızlarının 5 rpm ve üzerinde uygulanabilmesi durumunda ürün sıcaklık dağılımının tekdüze olması konusunda önemli bir etki sağlanabileceğı belirlenmiştir. Ayrıca, Arşimet vidası kullanılmayan sistemlerde boru duvarlarına uygulanan dönme hızının ürün sıcaklık dağılımına etkisi endüstriyel sistem boyutlarında incelenmiştir.

Aralık 2019, 133 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bira, Pastörizasyon, Mikrodalga, Dielektrik Özellikler, Matematiksel Modelleme, Arşimet Vidası, Dönme Etkileri

ABSTRACT

Master Thesis

DEVELOPING INNOVATIVE METHODS FOR BEER PASTEURIZATION PROCESS

Ozan KARATAŞ

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Pasteurization process is applied as a final stage in beer production process, and it based on a gradual heating and cooling of the bottled beer in tunnel pasteurizers. In a longer process, certain aroma - flavor losses occur. To innovate this process, a vertical-rotation (EoE) was applied during the thermal processing. The objective was to obtain uniform temperature distribution within the product quickly with possible process time reduction. For this purpose, first mathematical model studies were carried out and validated with literature and experimental results. Then, the validated models were used to demonstrate the effect of EoE rotation process at 1, 2.5, 5 and 10 rpm. The EoE was first for two turns and continuously applied at 1 rpm. This rotation effect led to a significant mixing and uniform temperature distribution while the limited rotation at over 5 rpm slowed down the heating rate due to the increase in the centrifugal forces.

In addition to the tunnel pasteurization, flash pasteurization, similar to aseptic processing, is another thermal processing approach for beer production. For this case, microwave heating was applied to demonstrate the possible shorter process times. The developed model was first validated with experimental results carried out in a batch system at 350 W power setting for ≈ 300 s. The validated model was later extended to a continuous process using an Archimedes screw installation in the pipe system where the flow is expected. Effect of different rotational speeds up to 10 rpm was observed on the temperature distribution to demonstrate the significant effect of rotation on the temperature uniformity. In addition, the direct rotation effects obtained from the rotational movement of the pipe walls were also investigated in an industrial scale setting.

December 2019, 133 pages

Key Words: Beer, Pasteurization, Microwave, Dielectric Properties, Mathematical Modeling, Archimedes Screw, Rotation Effects

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Üniversite 2. Sınıfta başlayan ve tüm yüksek lisans eğitimim boyunca gerek tez konusunda gerekse çalıştığım tüm konularda desteğini, bilgisini ve fikirlerini hiç esirgemeyen, her konuda yanımda olan yolumu daima aydınlatan çok değerli hocam, danışmanım Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Tez çalışmalarım için kullandığım bira örneklerine ulaşabilmemde her türlü yardımı sağladığı ve bilgisini, desteğini benimle paylaştığı için Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölüm başkanı sayın hocam Prof. Dr. R. Ertan ANLI'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Kişisel tecrübelerini her zaman benimle paylaştığı için ve her konuda fikir danışabildiğim, saygıdeğer hocam Dr. Öğretim Üyesi Rahmi UYAR'a (Aksaray Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Okula ilk başladığım andan itibaren her zaman yanımda olan, kardeşliğini her daim gösteren, hayatım boyunca hep arkamda duran, biricik ikizim, canım kardeşim Nazan KARATAŞ'a,

Tüm üniversite hayatım boyunca yanımda olan, desteğini hiç esirgemeyen, gerek ders notlarını gerekse zamanını benimle paylaşan, daha iyi olabilmem için çabalayan sevgili kız arkadaşım Büşra EROL'a,

Üniversite 2. Sınıftan itibaren yanımda olan, başta çalışma odamızın olmamasına rağmen okulda nerede yakalarsam rahatça soru sorabildiğim, bazı zamanlarda ise bunaltabildiğim, yeri geldiğinde çok eğlenip yeri geldiğinde birlikte üzülebildiğim değerli dostum Ozan ALTIN'a,

Geldiği ilk günden beri çekiştiğim, bazen kızdığım ama daha çok kapıştığım, hırslanarak daha çok çalıştığım ve sonucunda daha çok şeyler öğrendiğim, tüm bu çekişmelere rağmen desteğini ve bilgisini hiç esirgemeyen, her an yanımda olan değerli dostum Hüseyin TOPÇAM'a,

Laboratuvar çalışmalarında iyi ve kötü durumlarda yanımda olan, her deneyime ve model çalışmalarına yardım eden Ezgi SON ve Eda ÇOŞKUN'a

Konvansiyonel sistemlerin Ansys - Fluent programı ile modellenmesi çalışmalarında yardımını ve bilgisini esirgemeyen Kübra BULDUK'a,

Tez çalışmalarım için gerekli olan bira örneklerini karşıladıkları için Anadolu Efes Ankara Fabrikası'na,

Tüm eğitim hayatım boyunca bana olan inançlarını hiç kaybetmeyen, bu yolda yürümem için bana destek olan sevgili annem Sevgi KARATAŞ ve babam Muhammet KARATAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırma 19L0443004 kapsamında Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir.

Ozan KARATAŞ
Ankara, Aralık 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	vii
SEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
2.1 Bira Pastörizasyonu İçin Literatürde Uygulanan İşlemler.....	6
2.2 İnovatif – Mikrodalga Prosesi İçin Literatürde Yapılmış Çalışmalar.....	12
3. MATERYAL YÖNTEM.....	18
3.1 Çalışmada Kullanılan Materyaller.....	19
3.2 Deneysel Çalışmalar.....	19
3.2.1 Konvansiyonel proses için yapılan deneysel çalışmalar.....	20
3.2.2 İnovatif – mikrodalga prosesi amacıyla gerçekleştiren deneysel çalışmalar.....	25
3.3 Matematiksel Modelleme Çalışmaları.....	28
3.3.1 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modeller.....	28
3.3.2 Dikey – dönme (EoE) prosesinin bira pastörizasyonu üzerinde etkisinin belirlenmesi kapsamında hazırlanan matematiksel modeller.....	32
3.3.3 İnovatif – mikrodalga prosesi için hazırlanan matematiksel modeller.....	33
3.4 Sistem Ağ Yapılarının Oluşturulması.....	38
3.4.1 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modellerin ağ yapıları.....	38
3.4.2 İnovatif – mikrodalga prosesi için hazırlanan matematiksel modellerin ağ yapıları.....	42
3.5 Matematiksel Model Çalışmalarında Kullanılan Eşitlikler.....	46
3.6 Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	49

3.6.1 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modellerin başlangıç ve sınır koşulları.....	49
3.6.2 Dikey – dönme (EoE) etkisinin bira pastörizasyonu üzerinde etkisinin belirlenmesi için hazırlanan matematiksel modeller için başlangıç ve sınır koşulları.....	51
3.6.3 İnovatif – mikrodalga prosesi için hazırlanan matematiksel modellerin başlangıç ve sınır koşulları.....	54
3.7 Matematiksel Modellerde Kullanılan Çözümleyiciler.....	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
4.1 Konvansiyonel Proses İçin Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları.....	57
4.1.1 Sabit dış sıcaklıkta yapılan deneysel çalışmalar ve matematiksel model doğrulama çalışmaları.....	57
4.1.2 Değişken ortam sıcaklığında yapılan deneysel çalışmalar ve matematiksel model doğrulama çalışmaları.....	60
4.1.3 Literatür verileri kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel model doğrulama çalışmaları.....	62
4.1.4 Dikey – dönme hareketinin bira pastörizasyonu üzerinde etkisini belirlenmesi için hazırlanan matematiksel modeller ve sonuçları.....	68
4.2 İnovatif – Mikrodalga Prosesi İçin Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları.....	87
4.2.1 Pastörsüz bira örneklerinin dielektrik özellikleri.....	88
4.2.2 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar ve matematiksel model çalışmaları.....	89
4.2.3 Endüstriyel mikrodalga sistem kullanılarak yapılan matematiksel model çalışmaları.....	113
5. SONUÇ.....	122
KAYNAKLAR.....	126
ÖZGEÇMİŞ.....	131

SİMGELER DİZİNİ

c	Işık hızı (2999792458 m/s)
cm	Santimetre
c_p	Özgül ısısı (J/kg.K)
D	d-değeri (dk.)
Dk.	Dakika
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
g	Yerçekimi ivmesi (m_2/s)
GHz	Giga Hertz
h	Isı transferi katsayısı ($W/m^2-^{\circ}K$)
K	Kelvin
k	Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m-^{\circ}K$)
L	Uzunluk(cm)
m	Kütle (kg)
Gr	Grashof sayısı
N_u	Nusselt sayısı
v	Çizgisel hız (m/s)
sys2.r	Comsol programında radyal yöndeki bileşen
ω	Dönme frekansı (rpm)
π	Pi sayısı
kHz	Kilo Hertz
kV	Kilo Volt
MHz	Mega Hertz
MW	Mega Watt
n	Normal
P_0	Mikrodalga gücü (W)
Q	Isı (J)

r	Yarıçap (cm)
r_a	a yarı büyük eksen
Ra	Rayleigh sayısı
Ra_r	Rotasyonel Rayleigh sayısı
r_b	b yarı küçük eksen
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)
ρ	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
CO ₂	Karbondioksit
RF	Radyofrekansı
HPH	Yüksek basınçlı homojenizasyon
HPP	Yüksek hidrostatik basınç
PEF	Darbeli elektrik alan
DPCD	Sürekli yoğun faz CO ₂ uygulaması
ITU	International Telecommunication Union
PTFE	Politetrafloroetilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından tünel pastörizasyon sisteminde kullanılan zaman – sıcaklık parametreleri.....	7
Şekil 2.2	Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından geliştirilen matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses sürecinde değişimi.....	8
Şekil 2.3	Zhu vd. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada geliştirdiği deney düzeneği ve matematiksel model.....	16
Şekil 2.4	Zhu vd. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmadan alınan sıcaklık ölçümleri.....	17
Şekil 2.5	Zhu vd. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada çıkış noktasından alınan sıcaklık profillerinin vidalı ve vidasız olarak gösterilmesi. (a) Su, (b) Etilen gliserol, (c) Gliserol.....	17
Şekil 3.1	Tez çalışmasında kullanılan pastörsüz bira örnekleri.....	21
Şekil 3.2	Deneyisel çalışmalarda kullanılan su banyosu.....	22
Şekil 3.3	(a) Sıcaklık veri toplama sistemi, Cole-Parmer 18200-75 ve (b) K-tipi ısı çiftleri.....	22
Şekil 3.4	Sabit sıcaklıkta sıcak su banyosu ile yapılan deneyler sırasında alınan sıcaklık ölçüm noktalarının ürün içerisindeki konumu.....	24
Şekil 3.5	Bira şişesi içerisinde su kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ürün sıcaklık ölçümünün yapılması amacıyla kurulan deney düzeneği.....	24
Şekil 3.6	Deneyisel çalışmalarda kullanılan laboratuvar ölçekli LG MS2022D model mikrodalga fırın.....	25
Şekil 3.7	(a) Fiso-UMI 4-kanallı sıcaklık veri toplama sistemi ve (b) Fiber optik probalar.....	26
Şekil 3.8	LG Mikrodalga fırında 350W güç ayarı ile yapılan deney çalışmasında alınan sıcaklık ölçüm noktasının sistem içerisindeki konumu.....	26
Şekil 3.9	Bira örneklerinin dielektrik özelliklerini ölçmek amacıyla kullanılan Network analiz sistemi.....	27
Şekil 3.10	Bira şişesi (a) model görüntüsü, (b) geometrik ölçüleri ve (c) materyal tanımlamaları.....	29
Şekil 3.11	Mikrodalga simülasyonları için hazırlanan model geometrisi.....	34
Şekil 3.12	Deneyisel çalışmalarda kullanılan LG MS2022D model mikrodalga fırında bulunan coaxial-tipi magnetron.....	35

Şekil 3.13	Tekdüze ısınmayı sağlamak için teflon silindirik tüp içerisine yerleştirilen Arşimet vidası.....	36
Şekil 3.14	Arşimet vidalı sürekli mikrodalga sistem geometrisi.....	36
Şekil 3.15	Endüstriyel mikrodalga sistemde Arşimet vidasız (a) ve Arşimet vidalı (b) model geometrileri.....	37
Şekil 3.16	Konvansiyonel proses için hazırlanan 2-boyutlu simetri eksenli modellere ait ağ yapısı.....	40
Şekil 3.17	3-boyutlu modellere ait ağ yapısı.....	40
Şekil 3.18	2-boyutlu modeller için kullanılan ağ yapısı.....	41
Şekil 3.19	Dikey – Dönme (EoE) etkisinin incelenmesi için ANSYS Fluent programı kullanılarak hazırlanan 3-boyutlu modellerin ağ yapısı...	41
Şekil 3.20	Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için hazırlanmış modellere ait simülasyon ağ yapısı (LG-Mikrodalga sistem).....	45
Şekil 3.21	Arşimet vidası modifiyeli laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemin ağ yapısı.....	45
Şekil 3.22	Arşimet vidası modifiyeli endüstriyel mikrodalga sistem simülasyon ağ yapısı.....	46
Şekil 3.23	Sabit sıcaklıkta su banyosunda yapılan deneyler esnasında, su banyosundan alınan ortam sıcaklık değerleri ve toplam proses süreleri.....	50
Şekil 3.24	Kademeli olarak artan sıcaklıkta (değişken sıcaklıkta) yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen (a) ortam sıcaklık ve (b) ortam ısı transfer katsayısı değişimi.....	51
Şekil 3.25	Dikey - Dönme etkisinin incelenmesi için hazırlanan 2-Boyutlu modellerde tanımlanan materyaller.....	52
Şekil 3.26	LG laboratuvar ölçekli mikrodalga fırının çalışma döngüsü.....	54
Şekil 4.1	1 nolu deney ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.2	2 nolu deney ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.3	3 nolu deney ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.4	Doğrulanmış matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses süresince değişimi (Deney -1 koşulları) (°C).....	59
Şekil 4.5	Doğrulanmış matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses süresince değişimi (Deney -2 koşulları) (°C).....	60

Şekil 4.6	Değişken sıcaklıkta su banyosunda yapılan deney ve model sonuç karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.7	Doğrulanmış matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses süresince değişimi (Değişken ortam sıcaklığı koşulları) (°C).....	62
Şekil 4.8	(a) Sabit sıcaklıkta (60 °C) su banyosunda gerçekleştirilen deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan, 2014) ve (b) Tez kapsamında hazırlanan 3-boyutlu model sonuçları ile literatür verilerinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.9	7 kademeli tünel pastörizasyon koşullarında hazırlanan 3-boyutlu matematiksel model kullanılarak elde edilen sıcaklık değişimleri.....	65
Şekil 4.10	Tünel pastörizasyon proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı (°C).....	65
Şekil 4.11	Tünel pastörizasyon proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen akış profili (m/s).....	66
Şekil 4.12	Tünel pastörizasyon proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen akış hareketleri.....	67
Şekil 4.13	7-bölgeli tünel pastörizasyon sistemi baz alınarak hazırlanan matematiksel model çalışmasında biranın soğuk bölgesinde elde edilen pastörizasyon biriminin (PU) proses süresince akümüasyonu.....	68
Şekil 4.14	2 rpm dikey dönme (EoE) uygulamasının 2-boyutlu sistemde (a) ürün hacimsel sıcaklık değişimine, (b) ürün içi maksimum ve minimum sıcaklık oluşan noktalar arasındaki sıcaklık farkının değişime etkisi.....	70
Şekil 4.15	2 rpm dikey dönme (EoE) uygulamasının 2-boyutlu sistemde sıcaklık dağılımına etkisi (°C).....	71
Şekil 4.16	2 rpm dikey dönme (EoE) uygulamasının 2-boyutlu sistemde faz (sıvı – gaz) hareketine etkisi.....	72
Şekil 4.17	2 rpm dikey dönme (EoE) hareketi uygulanan 2-boyutlu sistemde ürün içerisinde oluşan akış profili (m/s).....	73
Şekil 4.18	2 rpm dikey dönme (EoE) hareketi uygulanmayan 2-boyutlu sistemde ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı (°C).....	74
Şekil 4.19	2 rpm dikey dönme (EoE) hareketi uygulanmayan 2-boyutlu sistemde ürün içerisinde oluşan akış profili (m/s).....	75
Şekil 4.20	Dikey dönme (EoE) hareketi uygulanmayan 2-boyutlu sistemde farklı sürelerde ürün içerisinde oluşan akış profili (m/s).....	76

Şekil 4.21	Anslys - Fluent ve COMSOL programı kullanılarak hazırlanan 3-boyutlu modellerden elde edilen ürün hacimsel sıcaklık ortalaması değişiminin karşılaştırılması.....	77
Şekil 4.22	COMSOL Multiphysics programı kullanılarak hazırlanan 3 boyutlu modelden elde edilen sonuçlara göre farklı proses sürelerinde ürün içi sıcaklık dağılımının ürün dikey kesitindeki değişimi.....	78
Şekil 4.23	ANSYS Fluent programı kullanılarak hazırlanan 3 boyutlu modelden elde edilen sonuçlara göre farklı proses sürelerinde ürün içi sıcaklık dağılımının ürün dikey kesitindeki değişimi.....	79
Şekil 4.24	Farklı dönme hızlarında dikey dönme (EoE) uygulamasının (a) ürün içi minimum sıcaklık değişimine, (b) ürün içerisine elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki farka etkisi.....	81
Şekil 4.25	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında uygulanan dikey dönme işleminin pastörizasyon değeri artışına etkisi (hesaplamalar minimum sıcaklık değerleri üzerinden yapılmıştır).....	82
Şekil 4.26	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 120 saniye uygulanan 1 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi.....	84
Şekil 4.27	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 120 saniye uygulanan 1 rpm dikey dönme işlemi sırasında ürün içi faz hareketi.....	84
Şekil 4.28	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında sürekli uygulanan 1 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi.....	85
Şekil 4.29	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 48 saniye uygulanan 2.5 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi.....	85
Şekil 4.30	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 48 saniye uygulanan 2.5 rpm dikey dönme işlemi sırasında ürün içi faz hareketi.....	86
Şekil 4.31	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 24 saniye uygulanan 5 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi.....	86
Şekil 4.32	Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 24 saniye uygulanan 5 rpm dikey dönme işlemi sırasında ürün içi faz hareketi.....	87
Şekil 4.33	Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde elde edilen deney sonuçları ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması.....	89
Şekil 4.34	Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem içerisinde farklı kesitlerde oluşan elektrik alan dağılımı (V/m).....	90

Şekil 4.35	Ürün içerisinde oluşan elektrik alan dağılımının farklı kesit ve farklı proses sürelerinde gösterilmesi (V/m).....	91
Şekil 4.36	Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem içerisinde uygulanan ısıtma işlem sırasında ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının ürün farklı kesitlerinde gösterilmesi (prosesin 120. saniyesi) (°C).....	92
Şekil 4.37	(a) Sistem çıkışında (PTFE silindir tepe yüzeyi) ürün sıcaklık ortalama değerinin (b) ürün hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin proses süresince değişimi.....	94
Şekil 4.38	Arşimet vidası tasarımı sistemlerde farklı dönme hızlarının prosesin 120. Saniyede ürün içi sıcaklık dağılımının sistem x-z kesitindeki görüntüsü (°C).....	95
Şekil 4.39	Arşimet vidası tasarımı sistemlerde farklı dönme hızlarının prosesin 120. Saniyede de ürün içi sıcaklık dağılımının sistem x-y kesitinde farklı yüksekliklerdeki görüntüsü (°C).....	95
Şekil 4.40	Proses sırasında sıcaklık değişimi yatışkın koşula ulaştıktan – dengeye geldikten sonra oluşan ürün hız profili değişiminin sistem farklı kesitlerindeki görüntüsü (m/s).....	96
Şekil 4.41	Proses sırasında sıcaklık değişimi yatışkın koşula ulaştıktan – dengeye geldikten sonra oluşan ürün hız profili değişiminin sistem farklı kesitlerindeki görüntüsü (m/s).....	96
Şekil 4.42	(a) Ürün içerisinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri ve (b) Maksimum ve minimum sıcaklık bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının proses süresince değişimi.....	97
Şekil 4.43	Arşimet vidasının eklenmediği laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde prosesin 120. Saniyesinde, mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri.....	98
Şekil 4.44	Arşimet vidasının eklenmediği laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem modellerinde farklı güç uygulamaları ile elde edilen yatışkın koşul sıcaklık dağılımı.....	99
Şekil 4.45	350 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri.....	100
Şekil 4.46	350 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu dikey-kesitteki sıcaklık profilleri (°C – prosesin 150. saniyesi).....	101
Şekil 4.47	750 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri.....	101
Şekil 4.48	50 W güç - 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde, uygulanan farklı dönüş hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu dikey-kesitteki sıcaklık profilleri (°C – prosesin 50. saniyesi).....	102

Şekil 4.49	1500 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri.....	103
Şekil 4.50	1500 W güç - 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde, uygulanan farklı dönüş hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu dikey-kesitteki sıcaklık profilleri (°C – prosesin 45. saniyesi).....	103
Şekil 4.51	0.005 m/s akış hızı ve 1 rpm dönüş hızına sahip mikrodalga matematiksel modellerden alınan, mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründeki ortalama sıcaklık değerleri.....	104
Şekil 4.52	350W güç - 10 rpm Arşimet vidası dönüş hızına sahip mikrodalga sistemde uygulanan farklı akış hızlarının, mikrodalga sistemde çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerlerine olan etkisi.....	104
Şekil 4.53	350W güç - 10 rpm dönüş hızına sahip Arşimet vidalı mikrodalga sistemde uygulanan 3 farklı akış hızının ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı (°C – prosesin 150. saniyesi).....	106
Şekil 4.54	350 W güç - 1 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürünlerin mikrodalga sistemden çıkış sıcaklıkları üzerine etkisi.....	107
Şekil 4.55	350 W güç – 2.5 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürünlerin mikrodalga sistemden çıkış sıcaklıkları üzerine etkisi.....	107
Şekil 4.56	350 W güç - 1 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık profilleri (°C – prosesin 250. saniyesi).....	108
Şekil 4.57	350 W güç – 2.5 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık profilleri (°C – prosesin 140. saniyesi).....	109
Şekil 4.58	350 W güç - 1 rpm dönüş hızı ve 0.005 m/s akış hızı kullanılması durumunda sistemin farklı kesitlerinde elde edilen hız profili (prosesin 150. saniyesi).....	110
Şekil 4.59	350 W güç - 10 rpm dönüş hızı ve 0.005 m/s akış hızı kullanılması durumunda sistemin farklı kesitlerinde elde edilen hız profili (prosesin 150. saniyesi).....	111
Şekil 4.60	350 W güç - 10 rpm dönüş hızı ve 0.25 m/s akış hızı kullanılması durumunda sistemin farklı kesitlerinde elde edilen hız profili (prosesin 150. saniyesi).....	112
Şekil 4.61	Arşimet vidası ile modifiye edilmiş endüstriyel mikrodalga sistemde oluşan elektrik alan dağılımı (V/m - t = 90s).....	114

Şekil 4.62	Sistem farklı kesitlerinde ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ($^{\circ}\text{C}$ t = 90s).....	114
Şekil 4.63	Sistemin farklı kesitlerinde ürün içerisinde meydana gelen hız profili değişimi (m/s, t= 90s).....	115
Şekil 4.64	8000 W güç - 0.015 m/s giriş hızı uygulanan endüstriyel mikrodalga sistemde boru dönüş hızının üründe oluşan sıcaklık değişimine etkisi ($^{\circ}\text{C}$ – yatışkın koşul).....	116
Şekil 4.65	Endüstriyel sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı.....	117
Şekil 4.66	Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 1 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeysel akış profili.....	118
Şekil 4.67	Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 2.5 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeysel akış profili.....	119
Şekil 4.68	Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 5 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeysel akış profili.....	120
Şekil 4.69	Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 10 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeysel akış profili.....	121

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	İyi biralık arpanın kompozisyonu.....	2
Çizelge 3.1	Tez çalışması için kullanılan ürünler ve ekipmanlar listesi.....	19
Çizelge 3.2	Model çalışmalarında kullanılan ısıl ve fiziksel özellikler.....	31
Çizelge 3.3	7-sıcaklık bölgesi bir tünel pastörizasyon sisteminde zamana bağlı olarak kullanılan ortam sıcaklık ve konvektif ısı transfer katsayısı değerleri.....	32
Çizelge 3.4	Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modellere ait ağ yapıları.....	39
Çizelge 3.5	İnovatif – mikrodalga proses için hazırlanan matematiksel modellere ait ağ yapıları.....	43
Çizelge 3.6	Kullanılan dikey dönme (EoE) hızlarında 2 tur tam dönme için gerekli dönme süresi ve çizgisel dönme hızı değerleri.....	54
Çizelge 4.1	Bira örneklerinin 915 ve 2450 MHz frekansta sıcaklığa bağlı olarak ölçülen dielektrik özellikleri.....	88
Çizelge 4.2	Endüstriyel sistem tasarımında 8000 W güç ve 0.015 m/s giriş hızı kullanıldığı durumda boru dönme hızının sistem çıkışın ürün sıcaklık değişimine etkisi.....	118

1. GİRİŞ

Bira, arpanın çimlendirilip kurutulması ile elde edilen maltın su ile belli koşullar altında mayşelenmesi ile elde edilen şıranın şerbetçiotu ile kaynatılmasından sonra alkol fermentasyonuna uğratılmasıyla meydana gelen, alkol ve CO₂ içeren bir içkidir. %3 – 6 arasında alkol ve içerisinde B vitamini çeşitlerini barındırmaktadır. Bira dünyada tüketilen en yaygın ve en eski alkollü içecek olarak bilinmektedir. Arkeolojik kazılardan elde edilen bilgilere göre biracılığın M.Ö. 4000-5000 yılları ve daha öncesine dayandığı anlaşılmıştır. Çeşni verici bir hammadde olarak kullanılan şerbetçiotu ise ilk kez ortaçağ sürecinde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bugün bildiğimiz biranın yapılabilmesi için, 19. yüzyıla kadar üretim tekniğinde ve özellikle mikrobiyoloji alanında, yeterli bilgi birikimi oluşması gerekmiştir. Bu dönemde maya dördüncü hammadde olarak bira üretim prosesine girmiştir. Şerbetçi otu yerine veya şerbetçi otu ile birlikte aroma katabilecek meyve ve çeşitli otlar da bira üretiminde kullanılabilir. Bu kapsamda bira üretimi için gereken hammaddeler arpa, su, malt katkıları, şerbetçiotu ve maya olarak özetlenebilmekte olup, biranın son ürün olarak ortaya çıkmasındaki iki temel öge malt üretimi ve daha sonrasındaki bira üretim aşamalarıdır.

Bira üretimi için kullanılan arpalar, diğer hububatlarla göre bira üretim tekniği açısından çok belirgin bazı üstünlüklere sahiptir. Arpa danesinin etrafını çeviren kavuzlar, malt yapma sırasında uygulanan karıştırma işleminde embriyoyu koru ve aynı zamanda mayşenin süzülmesi için çok elverişli doğal bir süzme tabakası oluştururlar. Arpa maltı ekstraktı ve enzimleri de biracılık yönünden daha uygundur. İyi bira üretimi için gerekli arpa bileşimi Çizelge 1.1’de verilmiştir. Bira kompozisyonunun %85-90 kadarı su olup, bu suyun önemli bir kısmı proses sırasında dışarıdan katılmaktadır. Bu nedenle, bira üretiminde kullanılan suyun kalitesi son derece önemlidir. Şerbetçiotunun başlıca kullanım alanı biracılık olup bu bitki ki evcikli çok yıllık tırmanıcı özelliktedir. Biraya karakteristik acı tat ve koku verir. Kozalak yapraklarının dip kısmında bulunan altın sarısı rengindeki lupulin tanecikleri esas değerli unsurlarıdır. Bira üretiminde kullanılacak olan şerbetçi otunun önemli unsurları acı reçineler (kuru şerbetçi otunda %18.3), tanen (%3) ve eter yağlar (%0.4’dür).

Bira üretiminde kullanılan malt katkıları ise maltlanmamış hububat ve şekerdir. Bunların kullanım amacı, maliyeti düşürmek, ekstrakt verimini artırmak ve ekstraktın bileşimini düzeltmektir. Biranın son ürün olarak oluşması için malt oluşumu aşamasının gerçekleşmesi gerekmektedir.. Bu aşamada arpa ıslatılıp çimlendirilmekte ve uygulanan kavurma ve kurutma işlemleri ile malt oluşmaktadır. Malt oluşumundan sonra bira üretim aşamaları sırasıyla, öğütme, mayşeleme, süzme, kaynatma, şerbetçiotu ilavesi, soğutma, fermentasyon, dinlendirme, filtrasyon, şişeleme ve pastörizasyon olarak devam etmektedir.

Çizelge 1.1 İyi biralık arpanın kompozisyonu

Su	%9-12
Nişasta	%63
Protein	%11
Kavuz	%9
Pentozan	%9
Yağ	%2.5
Kül	%2.5
Selüloz	%5

Bira üretiminde son aşama olan pastörizasyon, birada bulunan mikroorganizma yükünü azaltmak ve biraların raf ömrünü artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Bu işlem sırasında günümüzde genellikle konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanması tercih edilmektedir. Bu amaçla şişe ya da kutulara dolum işlemi gerçekleştirildikten sonra yaklaşık 1 saat süren (ön ısıtma – ısıtma işlemi ve soğutma) bir pastörizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Düşük sıcaklık – uzun süre amacıyla uygulanan bu ısıtma işlemi sırasında son üründe duyusal (aroma, tat ve koku) kayıplar – değişiklikler meydana gelmektedir. Bu işlem sırasında istenmeyen tat ve koku değişiklikleri de olabilmektedir (Lu vd. 2010). Bu nedenle son yıllarda pastörsüz bira olarak da adlandırılan ve ısıtma işlemi uygulanmayan ürünler de tüketicinin beğenisine sunulmuştur. Şişe ya da kutulara doldurulan ürüne uygulanan pastörizasyon işlemi dışında, önce ısıtma işlemi uygulanan ürünün aseptik koşullarda şişe ya da kutulara doldurulması da bira pastörizasyon prosesi açısından bir diğer uygulama yöntemidir. Bu kapsamda bira pastörizasyonu amacıyla

kullanılan ısıl işlem uygulamaları ikiye ayrılmaktadır. Birincisi bahsedildiği şekilde konvansiyonel olarak uygulanan ve tünel pastörizasyonu olarak isimlendirilen işlem (bu işlem sırasında şişelenen ya da kutulanan ürüne bir tünel içerisinde gerçekleştirilen farklı sıcaklık uygulamaları ile ısıl işlem gerçekleştirilmektedir); ikinci yöntem de ise hızlı pastörizasyon (flash pasteurized) işlemi ile tüm ürün pastörize edilmekte ve daha sonrasında ürün aseptik koşullar altında şişelenmekte ya da kutulanmaktadır (Buzrul, 2007).

Konvansiyonel yöntemde bira ilk öncelikle şişelendikten sonra sızdırmaz bir şekilde kapatılmaktadır. Daha sonra bir tünel içerisinde geniş metal bölmeler içerisinde farklı sıcaklık kademelerinde konveyör sistemler üzerinde ilerleyerek pastörizasyon işlemi tamamlanır (Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan, 2014). Tünel pastörizasyon sistemi içerisinde proses sıcaklığı su spreyleri kullanılarak kontrol edilmekte (Briggs vd., 2004) olup bu yöntem bira pastörizasyon prosesi ve şişeleme hattı için en çok kullanılan yöntemdir.

Pastörizasyon işlemi sırasında, zaman-sıcaklık kombinasyonu ürün kalitesine önemli bir şekilde etki etmektedir. Birada bulunan etanol içeriği, ürün ekstraktı ve pH değeri konveksiyonel ısı pastörizasyonu ile etkilenmezken, biranın orjinal karakteristik aroma, renk, acılık ve protein duyarlılığı ısı uygulamaları ile etkilenmektedir (Buzrul vd., 2005). Birada pastörizasyon işlemi ile birlikte bozulmaya yol açan mikroorganizmaların inaktivasyon kinetiği ise pastörizasyon birimi (PU - dakika) değeri ile kontrol edilmektedir (Zufall ve Wackerbauer, 2000). Pastörizasyon işlemleri genellikle 15-30 PU – dakika değerinde bir sonuç elde edebilmek amacıyla uygulanmakta ve uzun proses süresi ve yüksek sıcaklığın negatif etkilerini azaltma amacıyla optimum proses koşullarının belirlenmesine çalışılmaktadır. Bira pastörizasyon işleminde hedef mikroorganizma olarak *Saccharomyces cerevisiae* kullanılmakta olup bu mikroorganizma için Z değeri 6.94 °C ve referans sıcaklık değeri de 60 °C'dir (Zufall ve Wackerbauer, 2000).

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda bahsedilen iki farklı pastörizasyon tekniğini modifiye etmek ve bira prosesine inovatif bir bakış açısı sunabilmek amacıyla iki farklı temelde matematiksel modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Konvansiyonel bira prosesinde uzun süren ısıl işlem sırasında ürün içerisinde oluşan tekdüze sıcaklık

dağılımı ve bu sıcaklık dağılımının tekdüze edilebilmesi için gerekli uzun proses süresini kısaltabilmek amacıyla, ısıl işlem sırasında ürüne dikey dönme (EoE) prosesi uygulanmıştır. EoE dönme prosesi konserve endüstrisinde sıvı ya da katı – sıvı karışımlardan oluşan ürünlerde proses sürecinde etkin bir ısıl işlem uygulamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu dönme hareketi ile hem ürün içerisinde etkin bir karışma ve ısı transferi sağlanmakta hem de ürün içerisindeki sıcaklık dağılımının tekdüze olması sağlanarak homojen bir ısı transfer gerçekleştirilmektedir. EOE işleminin kullanılmasıyla proses sürecinde önemli kısaltmalarda sağlanarak enerji tasarrufu sağlanmakta ve ürün kalitesi, konvansiyonel proseste meydana gelen değişimlere göre, arttırılabilmektedir (Sarghini ve Erdoğdu, 2016). Ancak, konserve endüstrisinde 10 – 20 rpm gibi hızlarda uygulanan EoE dönme hareketinin, bira prosesine uyarlandığı durumda bira içi CO₂ basıncının artmasına sebep vererek köpürmeye neden olabileceğinden, daha düşük hızlarda uygulanması gerektiği de önemli bir husustur. EoE dönme hareketi uygulaması söz konusu olduğunda bira şişe ya da kutu oryantasyonunun da ürün sıcaklık değişimine etkisi gündeme gelmektedir. Ancak, dönme hareketi dışında bira kutu ambalajı oryantasyonunun (dikey – yatay – ters) pastörizasyon işlemi sırasında ürün sıcaklık değişimine etkisi konusunda yapılan bir çalışmada, ambalaj oryantasyonunun ürün sıcaklık değişimine bir etkisi olmadığı gösterilmiştir (Augusto vd., 2010). Bu nedenle proseste uygulanacak olan dönme hareketinin konveksiyonel prosesle karşılaştırıldığında, ürün sıcaklık artışı ve tekdüze sıcaklık dağılımının elde edilmesi kapsamında, önemli bir etki sağlayabileceği düşünülmektedir. Bu bakış açısıyla, bu tez çalışmasında EoE dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen matematiksel modellerde bira şişe geometrisi kullanılmıştır.

Hızlı pastörizasyon prosesi kapsamında ise mikrodalga ısıtma işleminin kullanılabilmesi konusunda proses modelleme çalışmaları yapılmıştır. Mikrodalga sistemler gıda ürünlerinde, dalga boyları ve ürün dielektrik özelliğine bağlı olarak değişen penetrasyon derinliklerine bağlı olarak, hacimsel olarak ısınmayı ve buna bağlı olarak da ürün içerisinde tekdüze sıcaklık dağılımını sağlayabilecek sistemler olarak önemli bir kullanım alanına sahiptir. Kısa proses süresine bağlı olarak elde edilen kalite artışları da bu sistemlerin avantajı olarak ortaya çıkmıştır. Mikrodalga uygulamada, ısıl işlem ürünün elektromanyetik enerjiyi absorplayarak ısı enerjisine çevirme prensibine

dayandığı için ürün içerisindeki kontrollü sıcaklık yükselişi açısından önemli bir potansiyele sahiptirler. Sürekli mikrodalga sistemleri gıda endüstrisinde kullanım açısından göreceli olarak yeni olup bu sistemlerin kullanımları sırasında ürün içerisinde oluşan sıcaklık profillerinin belirlenmesi için teorik ve deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, bira pastörizasyonu için de inovatif bir proses olarak planlanan mikrodalga uygulama geliştirilen ve deneysel olarak doğrulanan matematiksel modeller temelinde kullanılmıştır. Mikrodalga uygulaması kapsamında bira dielektrik özellikleri de sıcaklığın fonksiyonu olarak deneysel olarak ölçülmüş ve geliştirilen model çalışmalarında kullanılmıştır. Deneysel olarak doğrulanan matematiksel model kullanılarak farklı proses koşullarının ürün sıcaklık değişimine etkisi konusunda da çalışmalar geliştirilmiştir. Bu amaçla sürekli bir sistem olarak kullanılan mikrodalga uygulamada akış kanalı içerisine Arşimet döner vidalı bir sistem yerleştirilerek kullanılan dönme hızının ürün sıcaklık değişimlerine etkisi konusunda proses tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

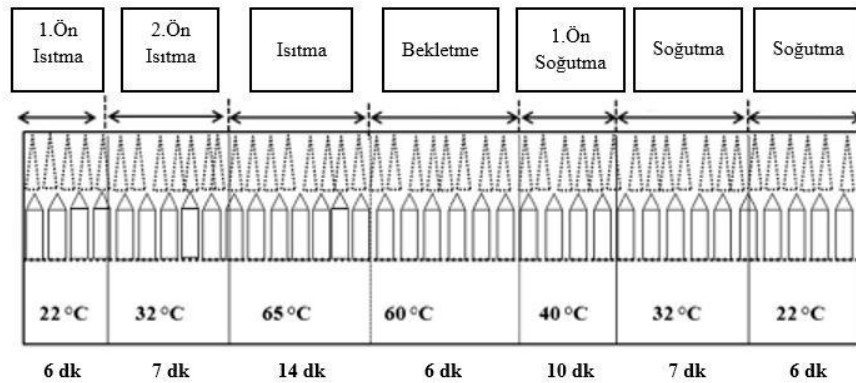
2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Bira Pastörizasyonu İçin Literatürde Uygulanan İşlemler

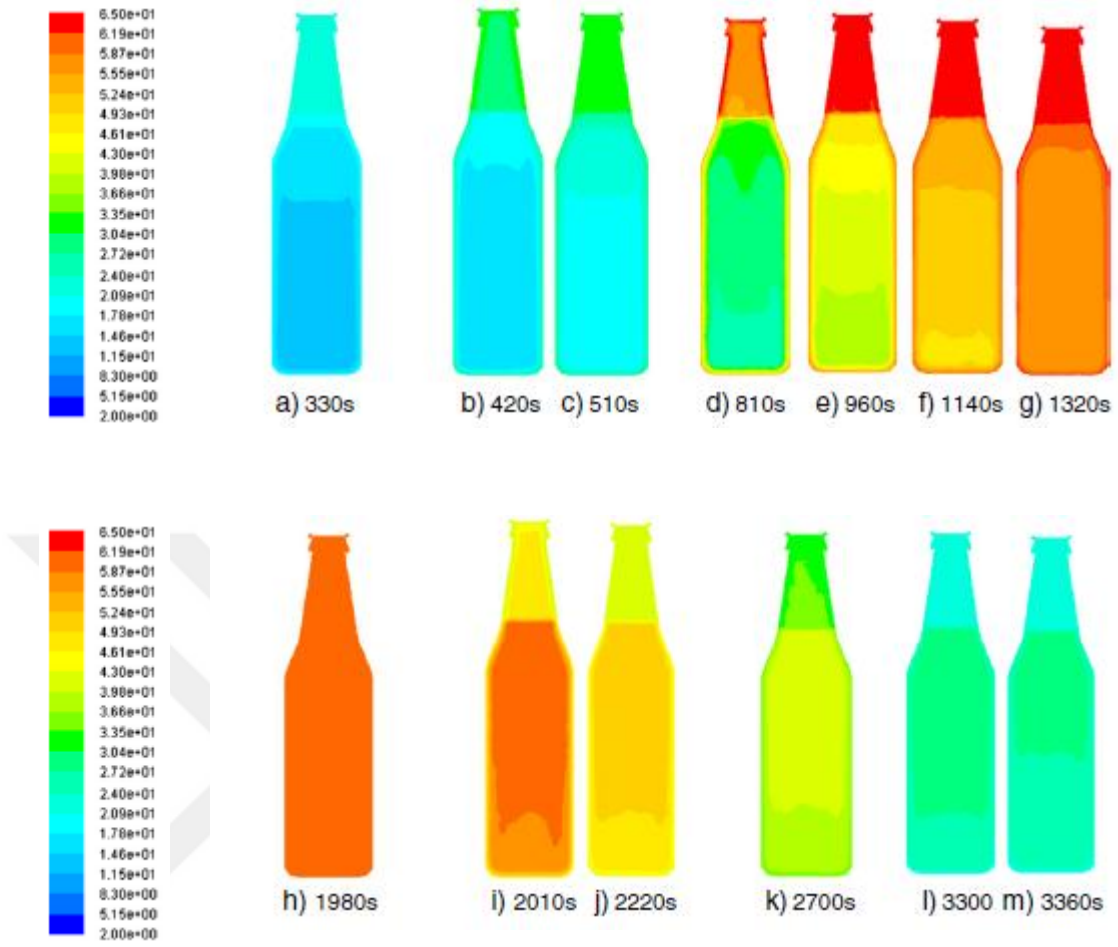
Günümüzde bira pastörizasyonu için en çok tercih edilen konvansiyonel yöntem tünel pastörizasyon uygulamasıdır. Bu sistemlerde genellikle şişe içerisindeki biraya farklı bölgeler içeren tünel içerisinde kademeli bir ısı işlem uygulanmaktadır. Bira prosesinde en fazla enerji maliyeti içeren bölüm ürünün ambalajlanması ve pastörizasyon uygulama aşamaları olup (Dilay vd. 2005), bu maliyetin azaltılması ve optimum bir proses parametreleri için çalışmalara devam etmektedir. Tünel pastörizasyon uygulamasında farklı bölgelerde uygulanacak ön ısıtma, ısı işlem ve soğutma bölümleri için gerekli zaman – sıcaklık parametreleri deneme – yanılma yöntemleri ile belirlenmiş olup son yıllarda ürün sıcaklık değişimi temelinde gerçekleştirilen matematiksel modellerin kullanılmasıyla optimum proses ve sistem tasarımları yapılmaya çalışılmaktadır. Lewicki vd. (1983)'de yapmış oldukları bir çalışmada bir şişedeki sıvının ısınma hızını etkileyen faktörleri tünel pastörizatörde kullanılan zaman – sıcaklık faktörleri çerçevesinde incelemiştir. Tünel pastörizatör uygulamalarında ısı transfer koşullarını belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada geliştirilen pastörizasyon modelinde kullanılan şişe geometrisi, sıcak su püskürtme hızı, su püskürtmek için kullanılan memelerin eksen, konumu ve sapma açısı gibi parametreler bu model kapsamında incelenmiştir. Şişe içerisinde bulunan ürün miktarının ısı işlem hızına önemli bir etkisi olduğu bu çalışma kapsamında belirlenirken, şişe geometrisinin etkisinin önemli olmadığı ancak su püskürtme hız - yoğunluğu ile kullanılan memelerin eksen ve konumunun ısı işlem açısından önemli parametreler olduğu belirlenmiştir. Horn vd. (1997)'de yapmış oldukları çalışmada 8-bölgeden oluşan bir tünel pastörizasyon sisteminde ürün sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirmiş ve sistem içerisinde 3 farklı noktadan alınan sıcaklık ölçümleri ile deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Brandon ve ark. (1984)'de bira pastörizasyonu için hazırlanan model çalışmalarında biranın ısı – fiziksel özelliklerinin yerine, benzer özelliklere sahip olduğu ve literatür değerleri kolaylıkla bulunabileceği için, saf suyun özelliklerinin kullanılabileceği göstermişler ve bu yaklaşım farklı çalışmalarda da kullanılmıştır. Augusto ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, ticari alüminyum kutu biraların oryantasyonunun ürün sıcaklık değişimine etkisi

incelenmiştir. Bu çalışmada pastörizasyon 15 PU değeri hedefini elde edebilmek amacıyla 60 °C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model ile kutu biraların (dikey, yatay veya ters) oryantasyonun ürün sıcaklık değişimi açısından bir etki sağlamadığı bu çalışma kapsamında vurgulanmış olup Lewicki vd (1983) tarafından elde edilen sonuçlarda bu şekilde doğrulanmıştır. Augusto ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada ürünün sıvı kısım ve hava boşluğu kısmı olmak üzere iki fazdan oluştuğu kabul edilerek gerçek proses koşullarına uygun bir modelleme çalışması yapılmıştır. Kutuların yapımında kullanılan alüminyum çok ince ve ısı iletim katsayısı yüksek olduğundan hazırlanan matematiksel modelde kutu duvar kalınlığı ihmal edilmiştir.

Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan'ın 2014 yılında yapmış olduğu çalışmada ise bira ısı – fiziksel özellikleri kullanılarak geliştirilen matematiksel model çalışması 60 °C - sabit sıcaklık su banyosunda gerçekleştirilen deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra deneysel olarak doğrulanmış matematiksel model kullanılarak 7 - aşamalı bir tünel pastörizasyon prosesinde ürün sıcaklık değişimi 56 dakikalık bir proses sürecinde belirlenmiştir. Şekil 2.1 bu çalışmada kullanılan zaman – sıcaklık parametrelerini göstermektedir. Bu proses sırasında ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı ise Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu kapsamda bira içerisinde 15 – 30 aralığında bir PU değeri elde edilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen ve deneysel olarak doğrulanmış modellerin farklı proses parametreleri ile doğrulanması kapsamında bu çalışmada kullanılan parametreler model girdileri olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.1 Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından tünel pastörizasyon sisteminde kullanılan zaman – sıcaklık parametreleri



Şekil 2.2 Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından geliştirilen matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses sürecinde değişimi

Bira pastörizasyonunda günümüzde en sık kullanılan yöntemler ısıtma işlem metotları olmasına rağmen ısıtma işlem uygulamadan da biralarda raf ömrünün uzatılması için pastörizasyon çalışmaları da devam etmektedir. Yüksek hidrostatik basınç (HPP), yüksek basınçlı homojenizasyon (HPH), ultrason, darbeli elektrik alan (PEF), sürekli yoğun faz CO₂ uygulaması (DPCD) ve ultraviyole ışık kullanımı gibi ısıtma olmayan yeni teknolojiler, ısıtma pastörizasyona alternatif olmak için kullanılmaya başlanmıştır (Yin vd. 2016; Franchi vd. 2011; Milani ve Silva 2017; Milani vd. 2015; Dagan ve Balaban 2006; Mezui ve Swart 2010).

Bunlar arasında ultrason ve HPH uygulamaları sadelikleri, tutarlılıkları, çevre dostu olmaları ve güvenlikleri nedeniyle özel bir ilgi görmüştür. Franchi vd. (2011) tarafından

HPH proses mekanizması detaylı olarak açıklanmış olup, Hoover (1998)'ın yapmış olduğu bir çalışmada uygulanan yüksek basınç son üründe tat ve aromada değişiklik yapmadığı ve vitaminlerin de kimyasal yapılarını muhafaza edebildikleri gösterilmiştir. Buzrul vd. (2005)'de yapmış oldukları çalışmada, lager tip biralarda raf ömrünün arttırılması için yüksek hidrostatik basınç (HPP) uygulamasının etkisini incelemiştir. Bu çalışmada yüksek hidrostatik basınç (20 °C de 3-5 dakika süresince 350 Mpa) filtrelenen parlak bira numunelerine uygulanmıştır. Ayrıca HPP etkisinin incelenebilmesi için konvansiyonel pastörizasyon olan ısıtma işlemi (15 dakika 60 °C sıcak su banyosunda uygulanan ısıtma işlemi) metodu da aynı bira örneklerine uygulanmış ve 56 günlük bir depolama süresince HPP ve ısıtma işlemi pastörizasyon uygulamalarının ürün pH ve renk değeri değişimi açısından benzer sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Bununla birlikte HPP ile muamele edilmiş örneklerde depolama sürecinde daha düşük acılık ve protein duyarlılığı oluşurken bu örneklerin bulanıklık değerlerinin de arttığı ayrıca gösterilmiştir. Mikrobiyolojik stabilite açısından ise her iki örnek benzer özellikler göstermiş ve hem laktik asit hemde asetik asit bakterilerinin gelişimi 56 günlük depolama süresince inhibe edilmiştir. Yapılan bu çalışmada yüksek basınç uygulama işleminin ısıtma pastörizasyonunun yerine kullanılabilecek yeni bir metot olduğu gösterilmiştir. Ancak kesikli olarak uygulanabilen bu prosesin yüksek hacimli sürekli prosesler için uygun olmayacağı da belirtilmektedir.

Ultrason uygulamada 20-100 kHz frekans aralığında ultrason dalgaları birkaç saniye ile birkaç dakika arasında uygulanmaktadır. Deng vd. (2018)'de yapmış oldukları bir çalışmada ultrason destekli ısıtma işleminin biranın fizikokimyasal ve duyu özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında tipik bir Çin lager birasına 40, 50 ve 60 °C lerde 2 dakika boyunca 24 kHz frekansta ve 2.7 W/mL hacimsel gücünde ultrason uygulaması yapılmıştır. Biradaki etanol içeriği, orjinal ekstraktı, pH değeri ve acılık gibi biranın ana kalite özellikleri uygulanan ultrason işleminden etkilenmemiştir. Bununla birlikte, depolama sırasında 60 °C de uygulanan işlemde sonra renk değerinde önemli bir artış gözlemlenmiş, ultrason muamelesi yapılan bira numunelerinde, protein duyarlılığı ve koloidal pus değerleri yükselmiştir. 50 ve 60 °C uygulamalarda, mikrobiyolojik stabilitenin hem maya hem de laktik asit bakterilerin gelişiminde 12 boyunca korunduğu gözlemlenmiştir. Taze biranın özelliklerine en yakın değerlere ise 50 °C ultrason uygulamasında ulaşılmıştır.

Milani vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek basınç ve ultrasound uygulamaları bira pastörizasyonu için kullanılmıştır. *Saccharomyces cerevisiae* sporları mikroorganizması hedef mikroorganizma olarak belirlenmiştir. Pastörizasyon işleminde gerekli olan enerji miktarları uygulanan işlemler arasında karşılaştırılmıştır. Yüksek basınç uygulaması için 200, 300 ve 400 MPa da 50, 55 ve 60 °C de, ultrason uygulaması için ise 16.15 W/mL’lik bir akustik enerji yoğunluğu kullanılmıştır. Uygulanan bu işlemlerin ısı işlemlere ile eşdeğer mikrobiyal inaktivasyonu için gereken enerji gereksinimleri hesaplanmıştır. 2.5 log azalma sağlanması için yüksek basınç uygulamasında 77 kJ/L gerekli iken aynı azalma değeri için ısı işlem prosesinde 189 kJ/L enerji gerektiği bulunmuştur. Ultrason uygulaması için ise 2612 kJ/L enerji gereksinimi olduğu hesaplanmıştır. Düşük enerji kullanımı ile yüksek basınç uygulamasının ve kısa proses süresi ile de kombine uygulamanın ısı işlemlere bir alternatif oluşturabileceği çalışma sonucu olarak çıkartılmıştır.

Dagan ve Balaban (2006)’da bira pastörizasyonu için sürekli yoğun fazda CO₂ (DPCD) kullanmıştır. Bu proses sürekli bir sistemde gerçekleşmiş ve uygulanan sürekli DPCD sistemi (26.5 Mpa basınç, 21 °C sıcaklık, %9.6 CO₂ fazı ve 4.77 dakika proses süresi) bira pastörizasyonunda etkili bir yöntem olarak ortaya konmuştur. Biralarda 7.38 log maya düşüşü sağlanırken, ürünlerin taze bira aroması, lezzet, köpük kapasitesi ve stabilitesini koruduğu da gösterilmiştir. Her ne kadar proses sırasında üründe sıcaklık artışları gözlemlense de ultrason uygulaması ısı olmayan bir işlem olarak kabul edilmektedir. Ultrason uygulaması, gıda işleme, pastörizasyon ve ekstraksiyonda su ve solvent tüketimini ve tehlikeli madde üretimini azaltarak, atık su arıtmayı ortadan kaldırarak ve nispeten az miktarda atık madde oluşturarak sürdürülebilir bir “yeşil ve yenilikçi” teknik olarak da bilinmektedir (Chemat vd. 2017; Chemat ve Rombaut 2017).

Isıl olmayan bir işlem olarak kullanılan darbeli elektrik alanı (PEF) uygulaması da mikroorganizma inaktivasyonu ile ısıya duyarlı bileşiklerin ve duyuşal özelliklerin bozulmadan sürdürülmesi konusunda ilgi çekmektedir (Mertens ve Knorr 1992; Zhang vd. 1995). PEF uygulaması çoğunlukla elma, portakal, domates, elma şarabı, süt ve sür ürünleri ve meyve suları gibi sıvı gıdalarda uygulanmaktadır (Yeam vd. 2000). Evrendilek vd. (2004)’de yapmış oldukları bir çalışmada *Lactobacillus plantarum*’un PEF uygulama ile bira içerisindeki inaktivasyonu ve metabolik aktivitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada PEF işleminin mikrobiyal inaktivasyon üzerindeki

etkisinin yanısıra, biradaki duyuşal özellikler üzerindeki etkileri ve elektrot malzemesi göçünün tespiti de incelenmiştir. Bir çok mikroorganizmanın inaktivasyonu üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda 4.8 log'a varan azalmalar görülmüştür. Ancak uygulanan PEF işleminin ardından son üründe Cr, Zn, Fe ve Mn gibi iyonlarda artış görüldüğü ve bu durumun son üründe istenmeyen bir tat ortaya çıkmasına neden olduğı da ayrıca belirtilmiştir. Milani vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, farklı tip biralarda vurgulu elektrik alanı (PEF) uygulamasının sürekli bir pastörizasyonu incelenmiştir. Yapılan çalışmanın amacı, birada bulunan mikroorganizmaları inaktive etmek ve duyuşal özelliklerini incelemektir. Öncelikle uygulanan PEF işleminin (43 °C'nin altındaki sıcaklıkta, 45 kV/cm elektrik alan yoğunluğunda 46 nabızlık bir 70 ms uygulama) *Saccharomyces cerevisiae* sporları üzerinde farklı alkol seviyelerindeki inaktivasyonu incelenmiştir. Alkol seviyesine bağılı olarak mikroorganizmalarda 1-3 log arası azalma görülmüştür. 53 °C sıcaklıkta uygulanan PEF işleminde ise daha büyük bir etki gözlemlenmiştir. Farklı alkol içeriklerindeki biralara uygulanan PEF işleminin, pastörizasyon işlemi açısından uygun olduğı çalışma sonucuyla elde edilmiştir. PEF uygulaması kullanılarak yapılan bir başka çalışmada Gad ve Jayaram (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma da ise kapalı ve basınçlı bir üniteye PEF işlemi biralara uygulanmıştır. Uygulanan proses sonunda eğitimli panelistler ile gerçekleştirilen duyuşal analizde, panalistler analitik olarak tespit edilen metal iyonlarının varlığına karşılık gelen metalik bir tat olduğunu vurgulamışlardır. Mikrobiyolojik inaktivasyonun gerçekleşmesine rağmen PEF uygulamalarda oluşan bu istenmeyen tat, bu yöntemin en büyük en dezavantajı olarak gösterilmektedir.

Günümüzde popülerliğı artan pastörsüz bira konusunda da ciddi sıkıntılar yaşanmaktadır. Öncelikle pastörsüz biralardaki en büyük dezavantaj raf ömrü süresinin çok kısa olmasıdır. Laktik asit bakterileri bira içerisinde en tehlikeli mikroorganizmalar arasında gösterilmekte (Sakamoto ve Konings, 2003) olup pastörsüz biralara için de önemli bir sorun teşkil etmektedirler. Bir diğere dezavantaj ise pastörsüz ürünler kapsamında ortaya çıkması muhtemel gıda güvenliğı problemleridir. Özellikle pastörize edilmemiş fiç biralarda enterohemorajik *Escherichia coli* ile kontaminasyon olasılığı önemli bir durum olarak rapor edilmiştir (Sakamoto ve Konings, 2003). Lu vd. (2010)'nin yapmış oldukları bir çalışmada, fiçalarda bulunması muhtemel mikroorganizmaları inaktive etmek için ince bir film aparatı ile UV işlemi

uygulanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucuna göre UV işlemi ile eklenen bu yeni aparatın fiçı biraların mikrobiyal güvenliğini artırmak ve fiçı biraların raf ömrünü uzatmak için kullanılmasına katkı sağlayabileceği belirtilmiştir.

2.2 İnovatif – Mikrodalga Prosesi İçin Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Sıvı gıdaların pastörizasyonu ve sterilizasyonu için halen endüstriyel uygulamalarda konvansiyonel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler konveksiyon ve kondüksiyon ile ısı transferi prensibine dayanmaktadır. Bu kapsamda ısı transfer mekanizmasına bağlı olarak proses sırasında ürün içerisinde de tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı ve buna bağlı olarak ürün içerisindeki en soğuk noktanın istenilen pastörizasyon sıcaklığına getirilmesi sırasında ürün yüzey bölgelerinde aşırı ısı işlem uygulaması ortaya çıkmaktadır. Bu durum hem ürünün duysal özelliklerinde olumsuz değişimlere hem de üründe önemli kalite kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda bu sorunun önüne geçmek için hacimsel ısınmayı mümkün kılan mikrodalga ve radyo frekans sistemlerinin kullanımı giderek artmaktadır.

Elektromanyetik spektrumda mikrodalga bölgesi 1GHz den 100 GHz e kadar olan alanı kapsamaktadır. Mikrodalga taşıdığı düşük enerji miktarına bağlı olarak iyonize edici özelliği olmayan dalga sınıfındadır (Dawoud 2003; Vollmer 2004). Isıl işlem için kullanılan mikrodalgalar genellikle 300 MHz ile 3 GHz arasındadır. ITU (International Telecommunication Union – Uluslararası Telekomünikasyon Birliği) tarafından belirlenen ve ISM band olarak isimlendirilen endüstriyel, bilimsel ve medikal amaçlı kullanıma ayrılmış radyo frekans bant aralığında bulunan 915 MHz ve 2450 MHz olmak üzere 2 farklı frekans mikrodalga ısıtma için kullanılmaktadır. Bu iki frekansa ait dalga boyları sırasıyla 32.79 cm ve 12.24 cm dir (Metaxas 1991).

Mikrodalga sistemlerde ürün içerisindeki sıcaklık artışı, mikrodalga polar moleküller ve iyonlarla etkileşime girerek bu moleköl ve iyonların oluşturduğu sürtünme ile ortaya çıkan kinetik enerjisine dayanır (Nasrollahzadeh vd. 2017). Dielektrik ısınmayla direkt olarak bağlantılı olan permittivite değeri kompleks bir yapıda ele alınmaktadır (Eşitlik 2.1) (Bradshaw vd. 1998).

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.1)$$

Bu karmaşık sayının gerçel kısmı ε' materyalin elektrik enerjiyi depolama yeteneğini belirlemekte 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 (Bradshaw vd. 1998, Hebbar ve Rastogi 2012).

Mikrodalga uygulamalarında, kullanılan materyaller tarafından gelen mikrodalgalar iletilmekte, yansıtılmakta veya absorbe edilmektedir. Geçirgen - transparan materyaller ise mikrodalgalar ile bir etkileşime girmeden olduğu gibi iletmektedir. PTFE teflon malzemesi bu materyallere bir örnek olarak verilebilmekte olup genel olarak mikrodalga çalışmalarında ambalaj malzemesi olarak kullanılabilir. Metaller ise mikrodalgaları yansıtan materyallere bir örnek teşkil etmektedir. Örnek olarak mikrodalga kaviteletin tasarımında alüminyum, gelen dalgayı tamamen yansıtılabilir özelliğine bağlı olarak, duvar malzemesi olarak tercih edilebilmektedir. Mikrodalgaları absorbe eden materyaller ise, dielektrik özelliklere bağlı olarak gelen elektromanyetik enerjinin bir kısmını veya tamamını ısı enerjisine çevirmektedir (Mello vd. 2014). Elektromanyetik dalganın dielektrik materyal tarafından absorbe edilerek içerisine penetre etmesi, penetrasyon derinliği ile belirlenmektedir. Penetrasyon derinliği, sistemin elektromanyetik alan gücünün, orjinal değerin 0.368 (1/e) katına düştüğü uzaklık olarak tanımlanmakta olup kullanılan frekans ve dielektrik özelliklerin önemli bir fonksiyonudur (Metaxas ve Meredith, 1983):

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right]}} \quad (2.2)$$

Mikrodalga enerjinin dielektrik materyal tarafından absorbe edildikten sonra ısı enerjisine dönüşümü ise Eşitlik 2.3 ile ifade edilmektedir:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (2.3)$$

Isıl işlem uygulaması ve sıcaklık artışı için ekstra bir ara ortama ihtiyaç duyulmaması, penetrasyon derinliğine bağlı olarak hacimsel sıcaklık artışı ve proses süresinin daha kısa olmasından dolayı mikrodalga sistemler geleneksel sistemlere göre avantajlı olarak görülmektedir (Zhu vd. 2007; Wei 2012; Yousefi vd. 2013). Belirtilen bu avantajlarının yanısıra kullanılan ürünün dielektrik özellikleri, mikrodalga sistemin kavite şekli, ürünün mikrodalga sistem içerisindeki konumu, sistem içerisinde oluşana elektrik alan ve yoğunluğu gibi değişkenler ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımında etkilidir (Zhou vd. 1995; Basak ve Meenakshi, 2006; Zhang vd. 2013). Ürün içerisinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı sağlayabilmek için mikrodalga sistemlerde farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Mikrodalga sistem içerisinde üretilen enerjinin taşınmasını sağlayan dalga kılavuzunun içerisine veya yakınına dağıtıcı bir apanak eklemek (Plaza-Gonzalez vd. 2004), dalga kılavuzuna dönme hareketi uygulamak (Pedreño- Molina vd. 2007) veya genellikle ev-tipi mikrodalga fırınlarda kullanılan, ürünün sistem içerisinde dönmesini sağlayan (Liu vd. 2013), bir ara platform kullanmak bu yöntemlerden en sık kullanılanlarıdır. Üründe tekdüze sıcaklık sağlamak için uygulanan bu yöntemlerde, sistem içerisinde belirli bölgelerde oluşan yoğun elektrik alanının ürün içerisinde eşit ve tekdüze bir şekilde dağılmasının sağlanması amaçlanmaktadır.

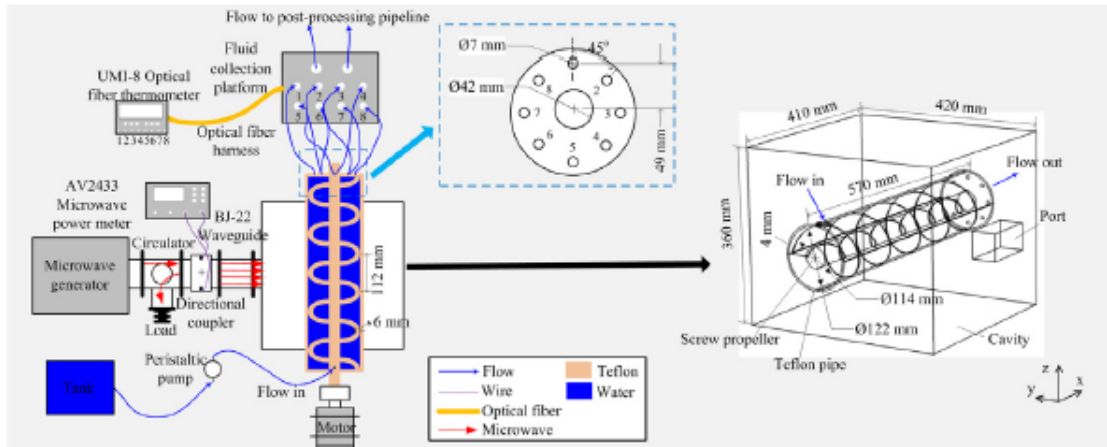
Sıvı gıdalarda, sıvı ürünün reolojik özelliklerinden ötürü, dönme hareketi direkt olarak sıvı ürüne aktarılabilmektedir. Bu nedenle ürün içerisinde bir karıştırma etkisi ve tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir. Sıvı ürünlere uygulanan dönme hareketi ile ürünlerin, sistem içerisinde farklı bölgelerde oluşan yoğun elektrik alanlara daha kısa süre maruz kalması sağlanmakta ve böylece üründe istenmeyen aşırı sıcaklık artışları önlenebilmektedir (Topçam, 2018). Bu kapsamda ürüne uygulanan dönme hareketi, ürün içerisinde bir karıştırma etkisi ortaya çıkartmaktadır. Bu etki ile birlikte mikrodalga sistem içerisinde oluşan yoğun elektrik alana maruz kalan bölgelerde, konveksiyonla olan ısı transferi de hızlandırılmış olduğundan, aşırı ısınma engellenebilmekte ve tekdüze bir sıcaklık dağılımı sağlanabilmektedir. Ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımını tekdüze olarak elde edebilmek amacıyla bu tez çalışması kapsamında ürüne uygulan dönme hareketi sistem içerisine yerleştirilen bir Arşimet vidası yardımı ile elde edilmiştir. Bu sistemde, vida hareketine bağlı olarak ortaya çıkacak dönme hareketi ürünün sistem içerisinde mikrodalda etkiye maruz kalma

süresini de arttıracığından, daha düşük güç uygulamasıyla daha etkin bir ısınma sağlanarak enerji tasarrufu da elde edilebileceği düşünülmektedir.

Arşimet vidası kullanılan sistemler katı ya da sıvı ürünleri transportunda ya da katı parçacıklar da içeren çok fazlı ürünlerin gıda endüstrisinde sürekli sistemlerde ısıtım işlem uygulaması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu taşıyıcı sistemde sıvı içerisinde bulunan katı parçacıklı ürünlerin varlığı, sıvının akış profilini çözümlemesini karmaşık bir duruma getirmekte olup bu sistemlerde ortaya çıkan alıkonma süresi de önemli bir proses tasarım problemi olarak göze çarpmaktadır. Bu yüzden genelde bu proseslerde hız profilleri, proses süreleri, sıcaklık dağılımları ve parçacık yoğunlukları gibi değişkenler ısıtım işlem uygulanan ürün sıcaklık değişimi üzerinde etkin olan parametrelerdir (Barigou vd. 1998). Pişirme, haşlama ve pastörizasyon amacıyla kullanılan bu sürekli ısıtım işlem sistemleri, pirinç ve sebzelerin haşlanmasında veya pişirilmesinde kullanılmaktadır. Sistem içerisinde bulunan döner vida sayesinde ürünlerin hem ısıtım işleme maruz bırakılmaktadır hem de taşınmaları sağlanmaktadır. Bu transport işlemi süresince katı faza etki eden birçok kuvvet mevcuttur. Bunlar yerçekimi kuvveti (buoyancy), akışkan çekme kuvveti (fluid drag), kaldırma kuvveti (fluid lift) ve inertia kuvvetleridir (Lareo vd. 1997). Katı fazın ve sıvı fazın bu kuvvetlerin etkisiyle sürekli olarak hareket kazanması, bu hareketin bilinmesine ve sıvı fazın akış profilinin çıkarılması gereksinimini doğurmuştur. Ayrıca belirtilen bu kuvvetlerin etkisi kapsamında, katı fazın sistem içerisinde kalma süresinde değişmektedir. Döner vida dişlileri arasında, vida dönüş hızı ile oluşan hız profiline bağlı olarak katı fazın geriye dönüş hareketi yapabilmesi bu içerde kalma süresine olumsuz etki yapmaktadır. Bu hareketin en önemli sebebi Bernoulli Denklemleri ile de açıklanabilir. Sistem ile dişliler arasında kalan bölümde sıvı fazın hızı diğer bölümlere göre daha yüksek olduğu için bu bölgede düşük basınç gözlenebilmekte ve bu durumda ürünün sistem içerisindeki hareket ve hız profilini olumsuz etkileyebilmektedir. Ancak, dönüş hızı ve dişliler arasında oluşan akış profilinin, boru içi akışlarda heliks borulara sağlanan birden fazla dönüş hareketi sağlanması gibi (Barigou vd. 1998), durağan hız profili oluşumunu engellemesi ise, bu sistemin bir avantajı olarak kabul edilmektedir.

Bir kavite içerisine yerleştirilen 5 perdeli tek bıçaklı bir arşimet vidası ile oluşturulan matematiksel model çalışmasında, arşimet vidasının dönmesi sonucu oluşan hareket Sarghini vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada gözlenmiş olup bu çalışma bu konuda

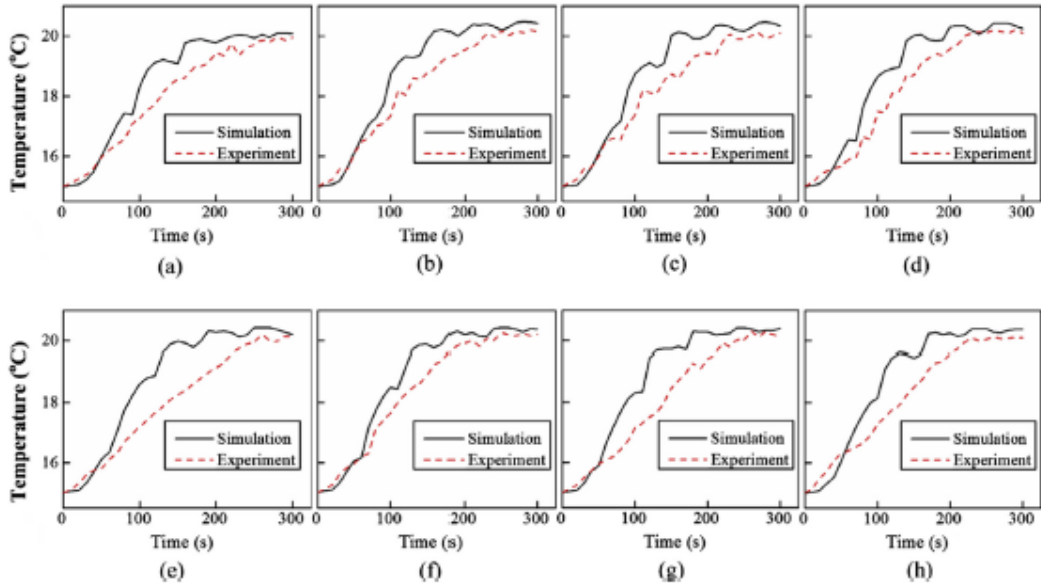
gerçekleştirilen ilk öncü matematiksel modelleme uygulamasıdır. Yapılan bu çalışmada farklı dönüş hızlarında sistem içerisinde oluşan hava-sıvı arasındaki etkileşim incelenmiştir. Arşimet vidasının dönmesi ile birlikte ortaya çıkan karıştırma etkisiyle ürün içerisinde oluşan ısı transferi hızlanmaktadır. Bunun nedeni olarak ise sıvı fazın hareket hızı artmasıyla birlikte yüksek bir ısı transfer katsayısı sistem içerisinde oluşmaktadır. Böylelikle ürün – sıvı arasında etkin bir ısı tansferi gerçekleşmektedir. Ürün içerisinde oluşan hız profili ise kullanılan Arşimet vidasının tasarım özelliklerine göre değişmektedir. Arşimet vidasının geometrisi belirlenirken dış etkenler (dış yarıçap, sistem uzunluğu) ve iç etkenler (vida iç yarıçapı, bıçak eğimi, bıçak sayısı, bıçaklar arası mesafe) büyük önem teşkil etmektedir. Bu parametreler optimize edilerek sistem içerisinde daha etkin bir karışma ve buna bağlı olarak etkin bir ısı transferi sağlanabilir. Zhu vd. (2017)'nin yapmış olduğu bir çalışmada ise Arşimet vidası sistemi bir mikrodalga uygulama kapsamında kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



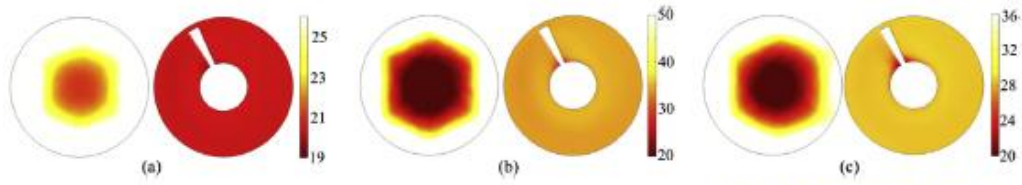
Şekil 2.3 Zhu vd. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada geliştirdiği deney düzeneği ve matematiksel model

Bu çalışmada, Arşimet vidası yerleştirilen bir silindirik borudan akış olurken mikrodalga uygulama sırasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla bir matematiksel modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada suyun, etilen gliserolün (sudan 20 kat daha fazla viskozite değerine sahip) ve gliserolün (sudan 1000 kat daha fazla viskozite değerine sahip) ısıtılma prosesleri incelenmiştir. Deneyler için 2.45 GHz frekans değerinde çalışan bir sistem kullanılmış, Arşimet vidası

dönüş hızı 5 rpm sistem içerisindeki akış hızı da 27.8 mL/s olarak kullanılmıştır. Yaklaşık olarak sıvının sistemden akması 200 s sürmüştür. Yerçekimi kuvvetinin etkisini önlemek için ise sıvı bağlantılarının giriş ve çıkış noktas yüksekliği aynı düzeyde tutulmuş ve sıcaklık ölçümleri sistem çıkışında 8 farklı noktadan yapılmıştır. Sıkıştırılmaz Newtonian sıvı varsayımı ile yapılan çalışmada elde edilen Reynold sayısı değeri 1083 olduğundan model çalışması çizgisel akış özellikleri kapsamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.5’de de görüldüğü üzere, bu sistemden tekdüze bir sıcaklık profili elde edilmiş ancak proses sırasında elektrik alan dağılımına bağlı olarak sıcaklığı fazla yükselen bölgelerin olabileceği de belirtilmiştir.



Şekil 2.4 Zhu vd. (2017)’nin yapmış olduğu çalışmadan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 2.5 Zhu vd. (2017)’nin yapmış olduğu çalışmada çıkış noktasından alınan sıcaklık profillerinin vidalı ve vidasız olarak gösterilmesi. (a) Su, (b) Etilen gliserol, (c) Gliserol

3. MATERYAL YÖNTEM

Bira pastörizasyon prosesi için inovatif yöntemler geliştirilmesi üzerine planlanan bu tez, deneysel çalışmalar ve matematiksel model çalışmaları olmak üzere iki ana bölümden meydana gelmektedir. Bu kapsamda, öncelikle bira endüstrisinde halen uygulanan konvansiyonel pastörizasyon prosesinde meydana gelen ürün sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla sıcak su banyosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmış ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar çalışmanın sonraki bölümünde geliştirilen matematiksel modellerin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Bu aşamada, deneysel olarak doğrulanmış modeller kullanılarak, konvansiyonel uygulamada kullanabilme amacıyla biraya uygulanacak dikey dönme (EoE) prosesi de inovatif bir yaklaşım amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda, bira pastörizasyon prosesi sırasında tekdüze bir sıcaklık elde etmek ve proses süresini kısaltabilmek amaçlanmıştır.

Daha sonra bira pastörizasyon prosesi için farklı inovatif bir yaklaşım geliştirmek mikrodalga uygulamaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde deneyler gerçekleştirilmiş; ayrıca matematiksel model çalışmalarında kullanmak amacıyla bira dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, çalışmanın daha sonraki aşamasında geliştirilen matematiksel modellerin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. EoE uygulaması dışında, inovatif bir yöntem olarak planlanan mikrodalga uygulamasında öncelikle deneysel çalışmalar baz alınarak hazırlanan model çalışmaları, deneysel çalışmalar ile elde edilen veriler ile doğrulanmıştır. Doğrulanmış model kullanılarak sistem içerisinde oluşan sıcaklık dağılımını tekdüzeye indirmek ve optimum proses koşullarının sağlanması için model çalışmalarında mikrodalga sistem içerisine arşimet vidası yerleştirilerek ürün içerisinde sistematik bir karışma sağlamak ve sıcaklık dağılımını tekdüze olarak elde edebilmek amacıyla da model çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

3.1 Çalışmada Kullanılan Materyaller

Çalışmada kullanılan ürünler ve malzeme Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Tez çalışması için kullanılan ürünler ve ekipmanlar listesi.

Tez çalışması için kullanılan ürünler	Tez çalışması için kullanılan ekipmanlar
Su	Su banyosu
	Sıcaklık veri toplama sistemi (Cole-Parmer 18200-75) ve K-tipi ısı çiftleri
Anadolu Efes pastörsüz bira	Laboratuvar ölçekli LG MS2022D model mikrodalga fırın
	4-kanallı sıcaklık veri toplama sistemi (Fiso-UMI) ve fiber optik probalar

3.2 Deneysel Çalışmalar

Yukarıda açıklandığı şekilde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar konvansiyonel pastörizasyon prosesi ve mikrodalga uygulamasını resmetmek üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bütün çalışmalarda pastörsüz bira örneği kullanılmıştır. Tezin birinci bölümünde gerçekleştirilen deneylerde bira endüstrisinde kullanılan ve konvansiyonel yöntem olarak kabul edilen tüzel pastörizasyonu sırasında meydana gelen sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla sıcak su banyosu kullanılarak bir deney düzeneği hazırlanmıştır.

Ardından son yıllarda farklı gıda proseslerinde kullanım alanı bulmaya başlayan mikrodalga prosesi bira pastörizasyonu için inovatif bir yöntem olarak seçilmiştir. Tünel pastörizasyonu sırasında kullanmak amacıyla uygulanabilecek olan EoE dönme prosesi de inovatif yöntem kapsamında modelleme çalışmaları kullanılarak gösterilmiştir. Mikrodalga prosesinin bira pastörizasyonu için etkisini belirleyebilmek için laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistem içerisinde deneysel çalışmalar yapılmış ve hazırlanacak olan matematiksel model çalışmaları için gereken biranın dielektrik özellikleri sıcaklığın fonksiyonu olarak deneysel olarak ölçülmüştür.

3.2.1 Konvansiyonel proses için yapılan deneysel çalışmalar

Bira endüstrisinde son işlem olan pastörizasyon aşaması için günümüzde en sık kullanılan yöntem tünel pastörizasyon işlemidir. Bu işlem, sıcak suyun yüksek hızlarda su spreyleri kullanılarak bira şişelerinin üstüne püskürtülmesi ile gerçekleştirilmekte olup prosesin farklı aşamalarında düşükten yükseğe ve sonra tekrar düşüğe doğru değişen bir ortam sıcaklığı kullanılmaktadır. Bira sıcaklığının kontrollü şekilde yükselmesiyle bira içerisinde karbondioksit basıncının kontrolsüz artmasına bağlı olarak meydana gelecek olan köpürme işleminin de önüne geçilmektedir.

Literatürde yapılan birçok çalışmada sıcaklık değişim senaryosu sıcak su banyosu kullanılarak resmedilmiş ve bu kapsamda ürüne farklı sıcaklık profili uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında da orjinal Anadolu Efes pastörsüz bira örneklerine şişe içerisinde sıcak su banyosunda sabit ve değişken sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanmıştır. Matematiksel model çalışmalarında ise bira şişelerinin içerisinde oluşan konveksiyonel ısı transferinin çözülmesi için ürün olarak saf su kullanılmış ve model doğrulama çalışmaları bu sonuçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda uygulanan ve aşağıda detaylı olarak açıklanan farklı ısıtma deneylerinde birada CO₂ basıncı ani yükselmesine bağlı olarak ortaya çıkan köpürme problemi nedeniyle su örneklerinin kullanılması tercih edilmiştir. Bhuneswari ve Anandharamakrisnan (2014) tarafından da gösterildiği şekilde bira örnekleri ve saf suyun ısıtma iletkenlik ve özgül ısı değerleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Proses sırasında oluşacak olan doğal konveksiyon etkisinin doğru olarak hesaplanabilmesi için ürün yoğunluk değişimlerinin de sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bilinmesi gerekmektedir. Bira örnekleri için bu değer bulunamadığından dolayı da bu deneylerde suyun kullanılması tercih edilmiştir. Mikrodalga uygulama kapsamında ise dielektrik özellikler ısıtma işlemde baskın rol oynadığından öncelikle bu değerler deneysel olarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmiş ve Bhuneswari ve Anandharamakrisnan (2014) tarafından verilen ısıtma iletkenlik ve özgül ısı kapasitesi değerleri kullanılarak bira örnekleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga ısıtmada kontrollü bir ısıtma programı kullanılarak köpürme probleminin önüne geçilebilmiş ve köpürme başladığında deney sonlandırılmıştır. Deneysel çalışmaların yaklaşık 5 dk içerisinde tamamlanması da köpürme probleminin engellenmesinde etkili olmuştur.

Deneysel çalışmalarda kullanılan bira şişesi örneği ve su banyosu Şekil 3.1 ve 3.2’de gösterilmektedir. Toplam uzunluğu 26.42 cm olan orjinal bira şişelerinin tepe boşluğu yüksekliği 7.34 cm olarak ölçülmüş ve bu hacimin tamamen hava içerdiği varsayımı model çalışmalarında kullanılmıştır. Bu kapsamda, bira şişeleri yükseklik 19.08 ± 0.012 cm olacak şekilde su ile doldurulmuştur. Su banyosu kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümü amacıyla kullanılan Cole-Parmer 18200-75 sıcaklık veri toplama sistemi ve K-tipi ısı çiftleri Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Tez çalışmasında kullanılan pastörsüz bira örnekleri



Şekil 3.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan su banyosu



(a)

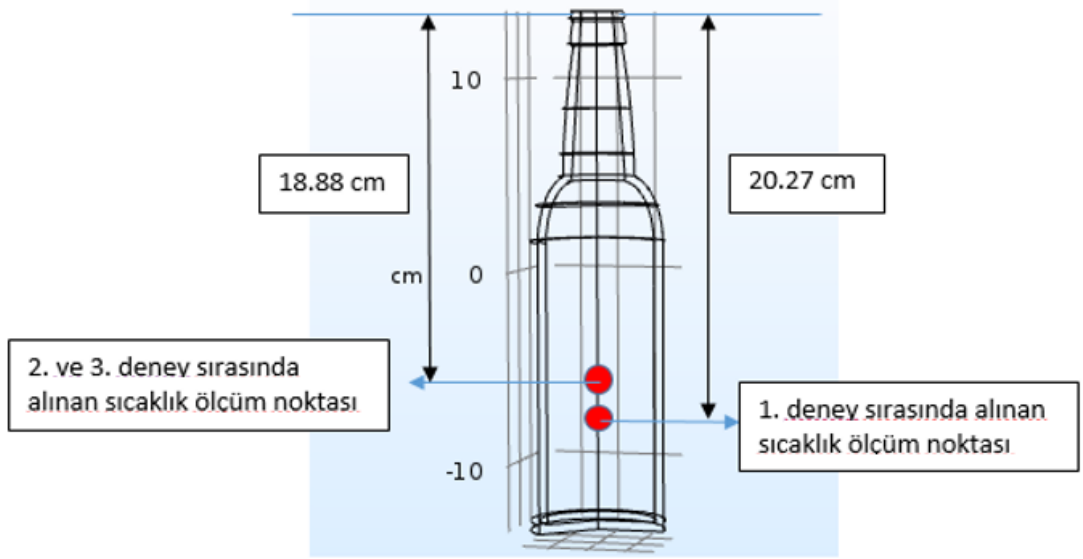


(b)

Şekil 3.3 (a) Sıcaklık veri toplama sistemi, Cole-Parmer 18200-75 ve (b) K-tipi ısı çiftleri

Su banyosu kullanılarak konvansiyonel bira pastörizasyon prosesinde ürün sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler sabit ve değişken ortam sıcaklığı kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Sabit ortam sıcaklığında 3 farklı deney yapılmış ve bu deneylerde kullanılan su başlangıç sıcaklık değerleri sırasıyla 25.71 °C, 23.46 °C ve 24 °C olarak kaydedilmiştir. Isıl işlem uygulama sırasında ortam sıcaklığı ve ürün sıcaklığı her bir saniyede bir veri almak üzere kaydedilmiştir. Ürün sıcaklık değişimini kaydetmek amacıyla kullanılan K-tipi ısı çiftler yapılan deney sırasına göre bira şişesinin ağız bölgesinden 20.27 (1. deney) 18.88 (2. ve 3. deneyler) aşağıda olacak şekilde yerleştirilmiş ve sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Alınan sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 3.4 de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Su kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonrası bira kullanılarak da deneyler yapılmış ancak hızlı ısınmaya bağlı olarak ani bir köpürme olayı ile karşılaşmıştır. Bu deney sırasında su banyosu ortam sıcaklığı $63.86 \text{ °C} \pm 0.83$ olacak şekilde kaydedilmiştir.

Bira endüstrisinde ani sıcaklık artışına bağlı olarak CO₂ basıncının artmasına bağlı olarak oluşan köpürme problemini elimine etmek amacıyla ortam sıcaklığının kademeli olarak arttırıldığı ve azaltıldığı bir ısıl işlem uygulaması kullanılmaktadır. Bu proseste hedeflenen pastörizasyon sıcaklığına yavaş ve kademeli bir şekilde ulaşılmaktadır. Ayrıca daha önce literatürde, kademeli sıcaklık artışını kullanarak yapılan çalışmalar da mevcuttur (Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan, 2014). Bu senaryoyu gerçekleştirmek için kademeli sıcaklık artışı içeren bir deney plan da ayrıca gerçekleştirilmiştir. Bu plan da hedeflenen 60 °C sıcaklığa kademeli olarak ulaşma amacıyla su banyosu sıcaklığı 26.98 °C den başlayarak 3 kademede (1. kademe 25 °C, 2. kademe 30 °C ve 3. kademe 60 °C) 60 °C'ye çıkartılmıştır. Kademeli olarak sıcaklık artışı kullanılan sıcak su banyosunda pastörsüz bira şişeleri içerisinde su örneği kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda bira şişesi içerisinde bulunan suyun başlangıç sıcaklığı 22.87 °C olarak ölçülmüştür. Bu deneyde sıcaklık ölçümü bira şişesinin ağız bölgesinden 19.05 cm aşağıdan alınmıştır. Sabit ve kademeli sıcaklık artışı kullanılarak hazırlanan su banyosu deney düzeneği Şekil 3.5 de gösterilmiştir. Bu deneylerde elde edilen sonuçlar, geliştirilen matematiksel modellerin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Sabit sıcaklıkta sıcak su banyosu ile yapılan deneyler sırasında alınan sıcaklık ölçüm noktalarının ürün içerisindeki konumu



Şekil 3.5 Bira şişesi içerisinde su kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ürün sıcaklık ölçümünün yapılması amacıyla kurulan deney düzeneği

3.2.2 İnovatif – mikrodalga prosesi amacıyla gerçekleştiren deneysel çalışmalar

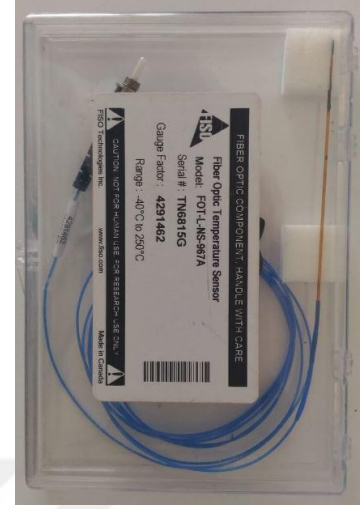
Bira pastörizasyonu için seçilen ve inovatif bir yöntem olan mikrodalga uygulamanın ürün sıcaklık değişimine etkisini inceleyebilmek ve daha sonra geliştirilecek olan matematiksel modelleri deneysel veriler kullanarak doğrulayabilmek amacıyla Şekil 3.6 da gösterilen ve 2450 MHz frekansda çalışan LG MS2022D model laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan bu mikrodalga sistem içerisinde sıvı örneklerin proses edebilmesi amacıyla, sisten içerisine 5 cm çap - 17.5 cm yüksekliğinde ve mikrodalgaya tamamen geçirgen olan teflon (PTFE) bir silindir yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında bira örneği silindir tüp içerisine yüksekliği 16.5 cm olacak şekilde doldurulmuştur. Proses süresince sıcaklık ölçümü yapılabilmesi için Şekil 3.7 de gösterilen , Fiso-UMI (FISO, Quebec, QC, Canada) 4-kanallı sıcaklık veri toplama sistemi ile fiber optik problar kullanılarak sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla fiber optik prob, teflon silindir içerisine tüp tepe noktasından 5.6 cm aşağıda ölçüm alabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Deney süresince ölçüm yapılan noktanın 3 boyutlu model sistem içerisindeki konumu Şekil 3.8 de verilmiştir.



Şekil 3.6 Deneysel çalışmalarda kullanılan laboratuvar ölçekli LG MS2022D model mikrodalga fırın

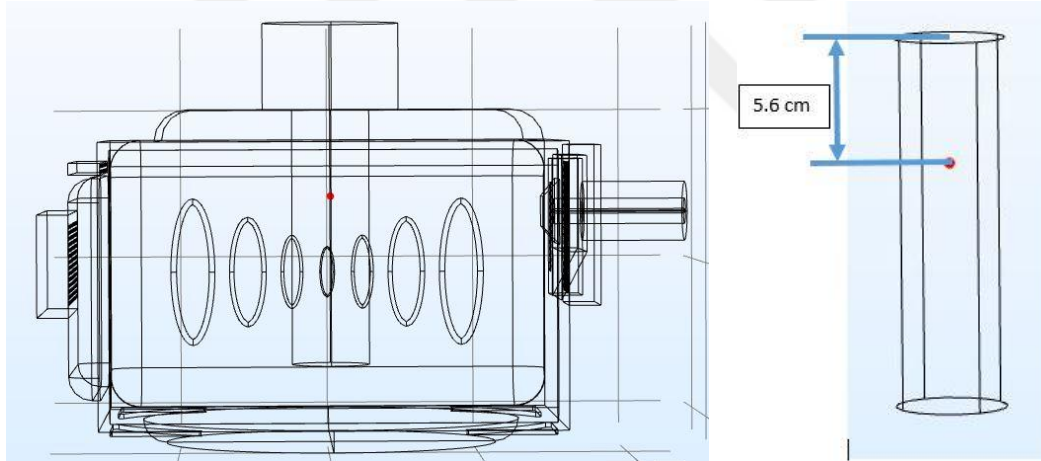


(a)



(b)

Şekil 3.7 (a) Fiso-UMI 4-kanallı sıcaklık veri toplama sistemi ve (b) Fiber optik prob



Şekil 3.8 LG Mikrodalga fırında 350W güç ayarı ile yapılan deney çalışmasında alınan sıcaklık ölçüm noktasının sistem içerisindeki konumu

Mikrodalga sistemin duvarları alüminyumdan yapılmış olup elektromanyetik dalgaları tamamen yansıtma özelliğindedir. Sistem 70, 350, 500 W ve çözdürme seviyelerinde çalışabilmektedir. Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda 350 W güç ayarı kullanılmıştır. 70 W uygulamada yavaş ısınmaya bağlı olarak proses süresinin uzun olması, 500 W uygulamasında ise ani ısınmaya bağlı olarak oluşan köpürme bu parametrenin seçilmesinde etkili olmuştur. Sistem içerisinde uygulanan güç değerinin

belirlenmesi amacıyla literatürde de yaygın olarak kullanılan kütlesi belli su örneğinin sıcaklık değişimine bağlı olarak hesaplamalar ($Q = m \times c_p \times \frac{dT}{dt}$) yapılmıştır. Bu eşitlikte m , gelen enerjiyi hesaplamak için mikrodalga fırına koyulan su miktarını; c_p , kullanılan suya ait özgül ısı değeri; Q , gelen enerjinin değerini göstermektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği Şekil 3.6’da gösterilmekte olup 350 W güç ayarı kullanılan durumda proses süresi ≈ 300 s olarak kullanılmıştır.

Network Analyzer E5061B (Agilent Technologies E5061B ENA Series Network Analyzer, Santa Clara, CA, USA, Şekil 3.9) tipinin frekans aralığı 100 kHz – 3 GHz’dir. Dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimini belirlemek amacıyla 100 mL örnek olarak hazırlanan bira numuneleri istenilen sıcaklığa su banyosunda getirilmiş ve sonrasında dielektrik değerleri ölçümü yapılmıştır. Ölçüm sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ve ısıtma işlem deneylerinde elde edilen maksimum sıcaklık değeri arasında belirlenmiş ve mikrodalga 915 - 2450 MHz frekans aralığında 50 değer alınarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. 4 - 75 °C sıcaklık aralığında (4.4, 25.4, 40.3, 60 ve 75 °C) üç defa ölçüm alınmış ve sonuçlar bu değerlerin ortalaması olarak gösterilmiştir. Network Analiz Sistemi cihazı her ölçüm öncesinde sırasıyla; hava, metalik blok ve ölçüm yapılacak sıcaklıktaki saf su ile kalibre edilmiştir.



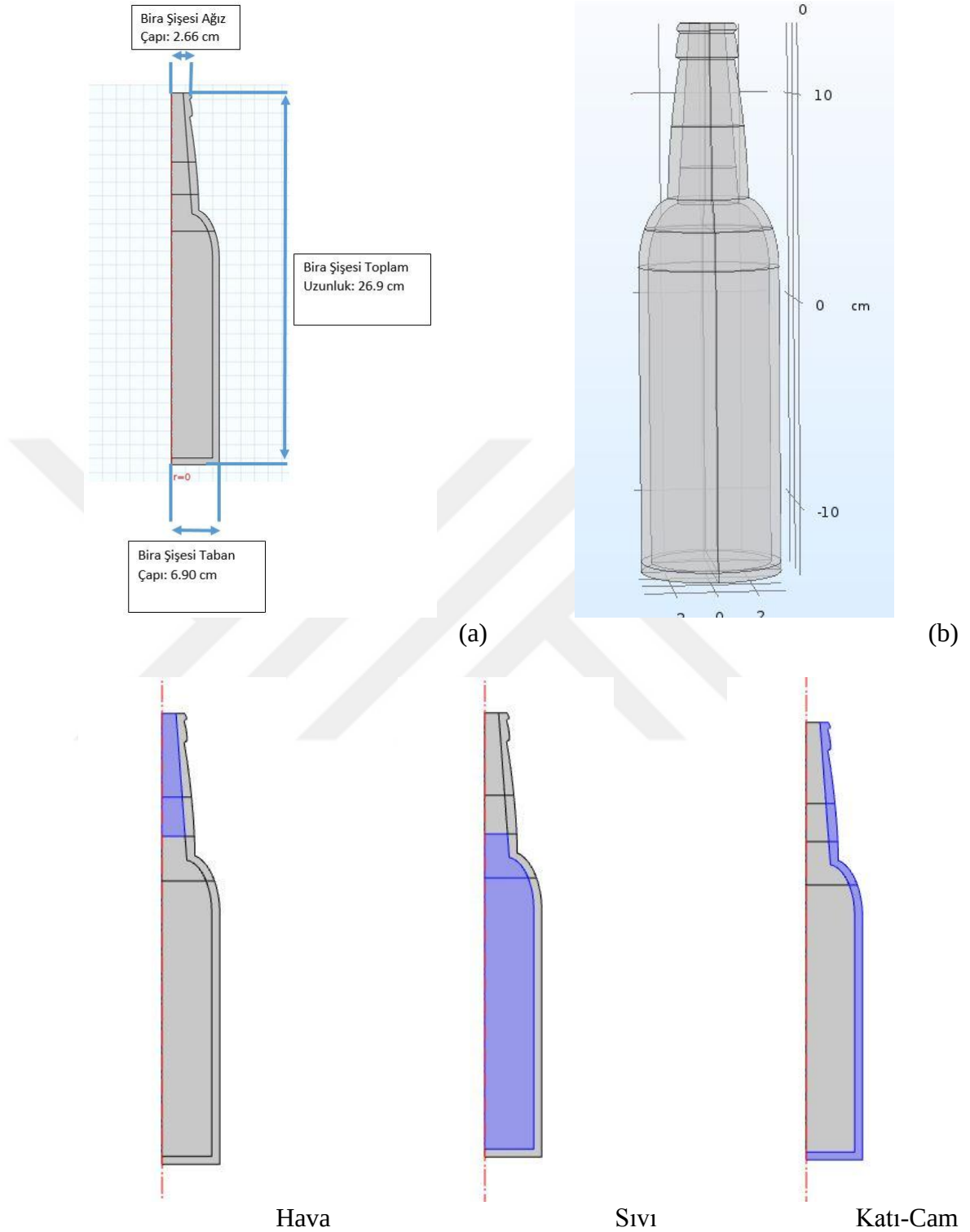
Şekil 3.9 Bira örneklerinin dielektrik özelliklerini ölçmek amacıyla kullanılan Network analiz sistemi

3.3 Matematiksel Modelleme Çalışmaları

Bu aşamada gerçekleştirilen deneysel çalışmalara paralel olacak şekilde matematiksel modeller hazırlanmış ve bu modellerin doğruluğu elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak yapılmıştır. Daha sonra doğrulanmış modeller üzerinden hem konvansiyonel proses koşullarının hem de inovatif bir yaklaşım olan mikrodalga proses koşullarının iyileştirilmesi üzerine model ve proses tasarım çalışmaları uygulanmıştır. Doğrulama modelleri ve mikrodalga proses modelleri için COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Konvansiyonel sistemlerde dikey-dönme etkisinin incelenebilmesi için bir şişe geometrisi içerisinde hava – sıvı ürün etkileşiminin de model çalışmalarında belirlenmesi konusunda COMSOL Multiphysics programı yeterli olmamıştır ve bu nedenle dikey-dönme model çalışmaları için ANSYS-Fluent programı kullanılmıştır.

3.3.1 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modeller

Bu çalışmalarda öncelikle deney ve model geliştirme çalışmalarında kullanılacak olan bira şişesinin gerçek geometrisi baz alınarak 3 farklı geometride (2-boyutlu eksensel simetri, 2-boyut – model deneme çalışmaları için ve 3-boyut) Comsol Multiphysics programı ile hazırlanmıştır. Orjinal şişe geometrisinden alınan ölçülere göre, şişe taban çapı 6.90 cm, şişe ağız çapı 2.66 cm, şişe yüksekliği 26.9 cm, şişe cam kalınlığı ise 0.48 cm olarak ölçülmüştür ve bu ölçüler doğrultusunda model geometrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan 2-boyutlu eksensel simetri ve 3-boyutlu model geometrisi Şekil 3.10 da ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Uygulanacak olan EoE dönme model çalışmalarında eksensel simetri modeli, hava – sıvı etkileşimine bağlı olarak tepe boşluğundaki havanın hareketine bağlı olarak, doğru çalışmayacağından 3-boyutlu modellerin kullanımı model çalışmaları kapsamında planlanmıştır.



Şekil 3.10 Bira şişesi (a) model görüntüsü, (b) geometrik ölçüleri ve (c) materyal tanımlamaları

Model çalışmalarında, sistem içerisinde gerçekleşecek olan ısı transferi mekanizmasına bağlı olarak şişe içerisinde oluşan konveksiyonel akış hareketinin hesaplanabilmesi için

yoğunluk, termal iletkenlik, özgül ısı ve viskozite gibi ısı-fiziksel özelliklerin sıcaklığın fonksiyonu olarak kullanılması gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi matematiksel model çalışmalarında bira şişelerinin içerisinde oluşan konveksiyonel ısı transferinin çözülmesi için ürün olarak saf su kullanılmış ve model doğrulama çalışmaları bu sonuçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ısı işlem deneylerinde birada CO₂ basıncı ani yükselmesine bağlı olarak ortaya çıkan köpürme problemi nedeniyle su örneklerinin kullanılması tercih edilmiştir. Model çalışmalarında kullanılan ısı ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Matematiksel model çalışmalarında sırasında kullanılan aşağıdaki materyallerden su ve havanın ısı ve fiziksel özellikleri COMSOL Multiphysics kütüphanesinden alınmıştır. Biraya ait ısı ve fiziksel özellikler ise literatürde bulunan bir çalışmadan alınmıştır (Telis-Romero ve Cabral, 2004). Biraya ait elektriksel iletkenlik (σ) değeri Zhang (2007) çalışmasından alınmıştır.

Sıcak su banyosu kullanılarak yapılan sabit sıcaklık ve kademeli sıcaklık artışı deneylerine paralel olarak hazırlanan modellerde, bira şişeleri için öncelikle hesaplama süresini kısaltabilmek amacıyla 2-boyutlu eksensel simetri geometri temelli model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4’de gösterilen sıcaklık ölçüm noktalarında deneysel veri toplama çalışmaları yapılmış ve modeller farklı başlangıç koşulları kullanılarak çalıştırılmıştır. Hazırlanan matematiksel modellerin doğruluğunu tespit etmek amacıyla elde edilen deneysel sonuçların yanısıra literatürden elde edilen sonuçlar da kullanılmıştır. Bu temelde Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından bira örnekleri ile yapılan çalışmada elde edilen ve endüstride de kullanılan ve 1 saatlik pastörizasyon prosesini 7 sıcaklık bölgesi bir tünel pastörizasyon sistemi kapsamında gösteren veriler model doğrulama kapsamında uygulanmıştır.

EOE dönme prosesinde kullanılacak olan 3-boyutlu modeller için hazırlanan geometride ortam sıcaklığının 60 °C olduğu bir durum için matematiksel model hazırlanmış ve şişe içerisindeki suyun yüksekliği 19.42 cm olarak kullanılmıştır. Bu sistemde bira şişesinin taban bölgesinden 6.5 cm yukarısından sıcaklık ölçümü alınmış ve elde edilen veriler yine deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 2-boyutlu eksensel simetri model çalışmasında olduğu şekilde 3-boyutlu model çalışmaları yine Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından kullanılan 7-sıcaklık bölgesi prosesden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu model çalışmalarında zamana bağlı kullanılan

ortam sıcaklık değerleri ve ortam konvektif ısı transfer katsayısı değerleri Çizelge 3.3 de gösterilmiştir (Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan, 2014). Bu şekilde, geliştirilen 2- ve 3-boyutlu modeller hem deneysel hemde literatür verileri kullanılarak doğrulanmıştır.

Çizelge 3.2 Model çalışmalarında kullanılan ısı ve fiziksel özellikler

Su	ρ (kg/m ³)		$765.33 + 1.8142 \times T - 0.0035 \times T^2$									
	c_p (J/kg-K)		$28070 - 281.7 \times T + 1.25 \times T^2 - 0.00248 \times T^3$									
	k (W/m-K)		$-0.5752 + 0.006397 \times T - 8.151E - 06 \times T^2$									
	μ (Pa-s)		$0.09867 - 0.008207 \times T + 2.344E - 06 \times T^2$									
Bira	Sıcaklık (°C)	0.2	10.9	20.3	28.4	39.5	49.9	58.9	70.1	76.4	86.8	
	ρ (kg/m ³)	990.6	990.3	986.9	983.7	979.5	975.4	972.2	968.0	965.6	961.7	
	c_p (kJ/kg-K)	4.116	4.099	4.094	4.078	4.073	4.071	4.081	4.088	4.095	4.115	
	k (W/m-K)	0.546	0.565	0.583	0.593	0.608	0.620	0.632	0.639	0.643	0.651	
	μ (mPa-s)	1.784	1.288	0.999	0.825	0.662	0.554	0.480	0.402	0.367	0.330	
	Sıcaklık (°C)	4		22		30		40		50		60
	σ (S/m)	0.080		0.143		0.160		0.188		0.227		0.257
Bira şişesi	ρ (kg/m ³)		2050									
	c_p (J/kg-K)		750									
	k (W/m-K)		1,4									

Çizelge 3.3 7-sıcaklık bölgeli bir tünel pastörizasyon sisteminde zamana bağlı olarak kullanılan ortam sıcaklık ve konvektif ısı transfer katsayısı değerleri

Zaman (s)	Ortam sıcaklığı (°C)	Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m ² -K)
0 – 360 (ön ısıtma)	22	500
360 – 780 (ön ısıtma)	32	600
780 – 1620 (ısıtma işlemi)	65	1500
1620 – 1980 (bekletme)	60	1400
1980 – 2580 (ön soğutma)	40	1200
2580 – 3000 (soğutma)	32	1000
3000 – 3360 (soğutma)	22	800

3.3.2 Dikey – dönme (EoE) prosesinin bira pastörizasyonu üzerinde etkisinin belirlenmesi kapsamında hazırlanan matematiksel modeller

2- ve 3- boyulu modellerin doğrulanması çalışmalarından sonra halen konvansiyonel bira pastörizasyonunda kullanılan pastörizasyon işlemine inovatif bir yaklaşım getirmek amacıyla düşünülen ve EoE etkisinin incelenmesi için planlanan matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla önce, model çalışmasında kullanılacak parametreleri belirleyebilmek için 2-boyutlu geometride çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda COMSOL yazılımında sıvı gıdalar içerisinde sıcaklık artışını tespit edebilmek için “ısı transferi modülü”, sıvı ürünlerde oluşan akış profilini gösterebilmek için “laminar akış modülü”, kullanılan su-hava materyalleri arasındaki etkileşimin çözülebilmesi için “iki faz modülü” ve bira şişelerine dönüş hareketini verebilmek için “hareketli ağ yapısı” modülü” kullanılmıştır. 2-boyutlu geometride kusursuz çalışan ve EoE uygulama sırasındaki gaz (hava) – sıvı (su) etkileşimini belirleyebilen 2-boyutlu modeller 3-boyuta yükseltildiğinde kullanılan “iki faz modülü”nden istenilen sonuçlar alınamamıştır. Bu nedenle 3-boyutlu geometrilerde dikey-dönme işleminin etkisinin incelenebilmesi için ANSYS-Fluent programı kullanılmıştır. EoE uygulama sırasında hareket ve sıcaklık artışı etkisiyle CO₂’e bağlı köpürmenin engellenmesi amacıyla,

literatürde konserve proseslerinde kullanılan 10 – 20 rpm gibi hızlar yerine, 1, 2.5 ve 5 rpm gibi düşük dönme hızları kullanılmıştır.

Bira prosesinde uygulanan pastörizasyon işleminde hedef mikroorganizma olarak *Saccharomyces cerevisiae* olup byorganizma için z değeri 6.94 °C ve referans sıcaklık değeri de 60 °C'dir (Fricker, 1984). Pastörizasyon işlemi sırasında yüksek sıcaklıklara ve uzun süren pastörizasyon işlemlerinde birada istenmeyen tatlar ve aromalar oluşabilmekte ve biranın sahip olduğu doğaş aromada kayıplar olabilmektedir. Bu nedenle pastörizasyon aşaması genellikle 15-30 pastörizasyon birimi (PU – dakika) arasında yapılmaktadır. Tez kapsamında uygulanan pastörizasyon işleminin bu parametrede değişimini belirleyebilmek için Eşitlik 3.1 de verilen pastörizasyon değeri hesaplanarak pastörizasyonun amacına ulaşp oluşmadığına karar verilmiş ve bu kapsamda EoE dönme etkisi de incelenmiştir.

$$F = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1 de F pastörizasyon değerini, T_{ref} ise referans sıcaklık değerini göstermektedir.

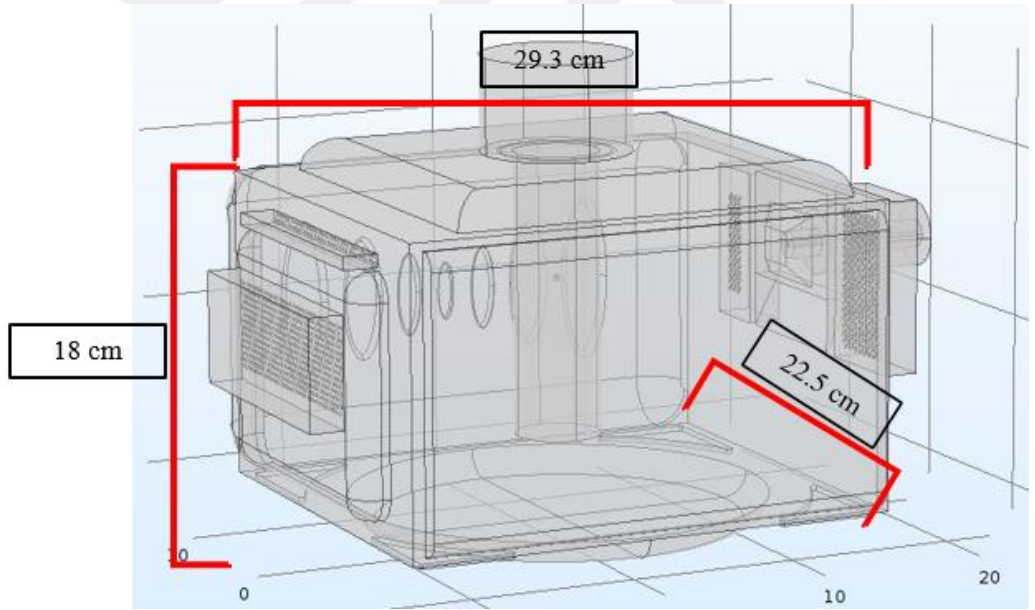
3.3.3 İnovatif – mikrodalga prosesi için hazırlanan matematiksel modeller

Bira pastörizasyonu işlemi için kullanılması planlanan ve inovatif bir yöntem olan mikrodalga ısıtma prosesinde yapılan deneysel çalışmalar baz alınarak matematiksel bir model hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan LG MS2022D model modifiye edilmiş laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemin geometrisi COMSOL Multiphysics programı kullanılarak hazırlanmıştır. Sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı ve ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için, mikrodalga kavite geometrisi, magnetron geometrisi ve dalga kılavuzu geometrisinin fiziksel boyutları belirlenmiştir. Belirlenen bu boyutlar, sistem geometrisinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Çizilen geometri Şekil 3.11 de gösterilmiştir.

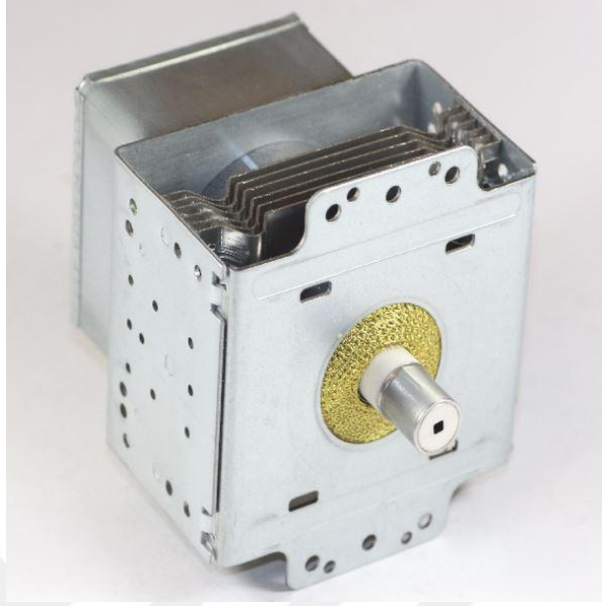
Mikrodalga sisteminin kavite boyutları; 29.3 cm genişlik, 25.5 cm derinlik ve 18 cm yükseklikten oluşmaktadır. Mikrodalga kavitede mevcut olan ve farklı geometrik özelliklere sahip delikler, içeride oluşan elektromanyetik alan dağılımını doğrudan

etkiyeleyebileceği için, model geometrisi içerisinde aynen kullanılmıştır. Mikrodalga sistemlerde elektrik enerjisinin elektromanyetik dalgalara ve enerjiye dönüşümünü sağlayan magnetron aparatı farklı yapılarda olabilmektedir. Tez kapsamında kullanılan LG MS2022D model mikrodalga fırın içerisinde Coxial-Tipi magnetron kullanıldığı belirlenmiştir. Kullanılan magnetrona ait görüntü Şekil 3.12 de gösterilmiştir. Sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımının daha iyi ve gerçeklikle bağlantılı olabilmesi için Coxial-tipi magnetron yapısı hazırlanan matematiksel modellerde de aynen kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan magnetron, eşmerkezli yapıda olup TEM (Transvers Elektrik ve Manyetik) modunda çalışmaktadır. Sistem içerisine gelen elektromanyetik dalgaların frekansı 2450 MHz olup dalga boyları 12.23 cm'dir:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

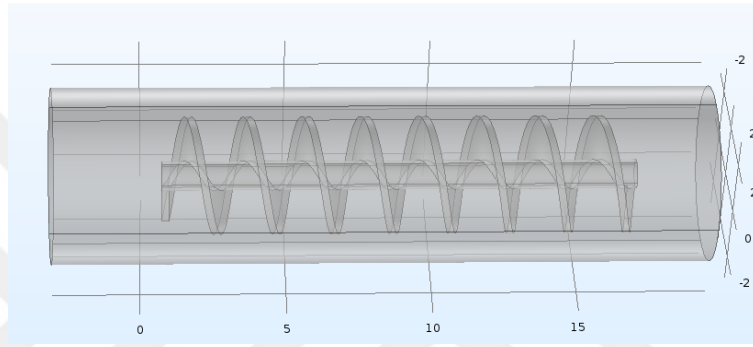
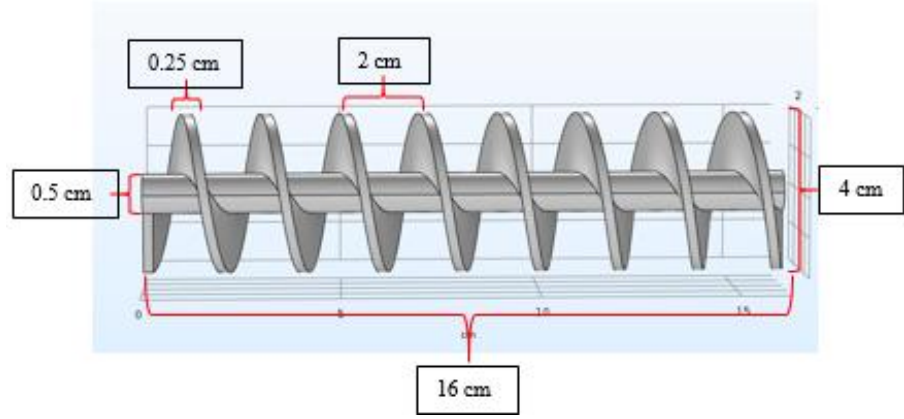


Şekil 3.11 Mikrodalga simülasyonları için hazırlanan model geometrisi

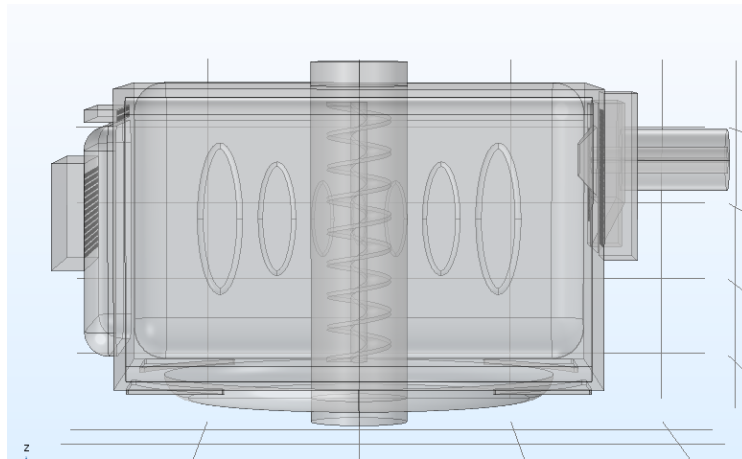


Şekil 3.12 Deneyisel çalışmalarda kullanılan LG MS2022D model mikrodalga fırında bulunan coxial-tipi magnetron

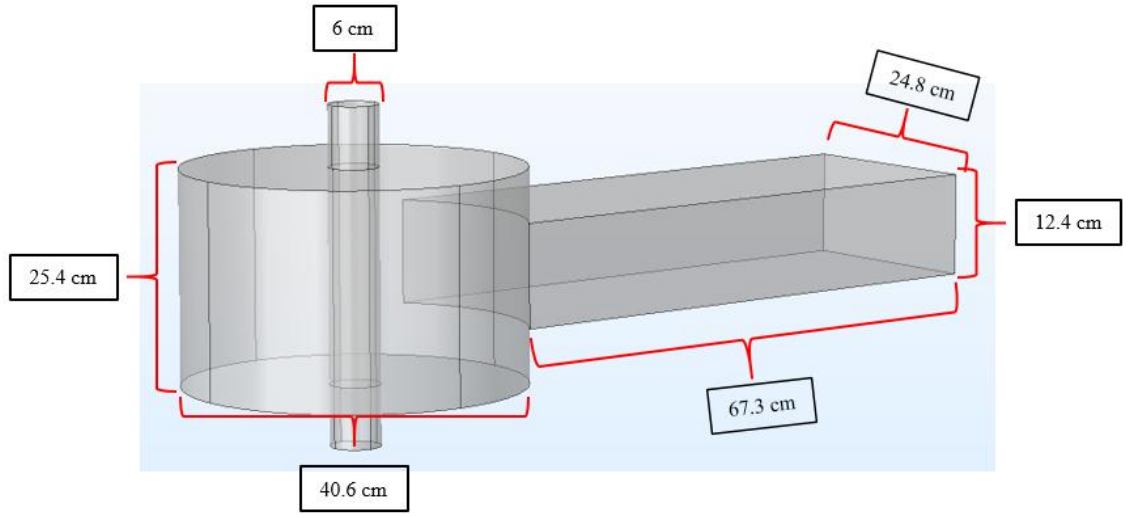
Proses edilecek ürün içerisindeki elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak sıcaklık değişimi ve akış dinamiği modelleme çalışmaları yapılırken, kullanılan PTFE silindirin mikrodalgaya tamamen trasnparan olduğu varsayılmıştır ($\epsilon' = \epsilon'' = 2$; Sperati ve Starkweather, 1961). Bu nedenle teflon silindir duvar kalınlığı yapılan model çiziminde kullanılmamıştır. PTFE silindirin çapı 5 cm olup, içerisindeki ürün yüksekliği 16.5 cm olarak kullanılmıştır. Hazırlanan matematiksel modelden elde edilen sonuçlar, aynı şartlarda yapılan ve ürün olarak pastörsüz biranın kullanıldığı deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra sürekli bir pastörizasyon sistemi tasarlamak ve sistem içerisinde oluşacak olan sıcaklık dağılımını tekdüzey elde edebilmek amacıyla kullanılan mikrodalga sistem modifiye edilmiştir. Bu amaçla, PTFE silindir tüp içerisine bir arşimet vidası sıcaklık dağılımını tekdüzeye indirmek amacıyla yerleştirilmiştir. Sürekli bir sistem geometrisi oluşturmak amacıyla da, PTFE silindir alt ve üst yüzeyleri giriş ve çıkış alanları olarak düzenlenmiştir.



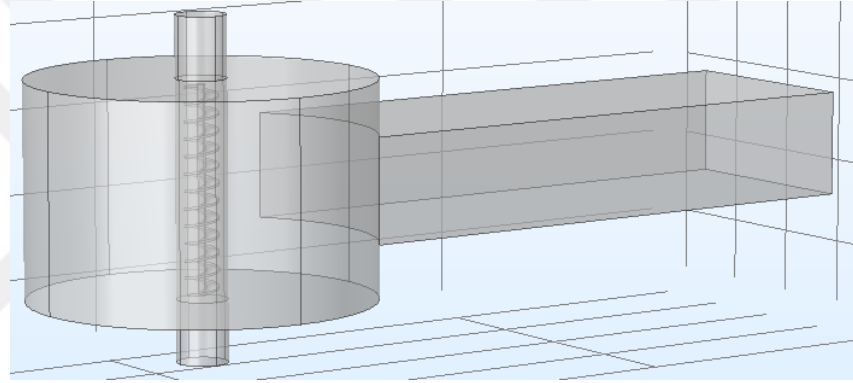
Şekil 3.13 Tekdüze ısınmayı sağlamak için teflon silindirik tüp içerisine yerleştirilen Arşimet vidası



Şekil 3.14 Arşimet vidalı sürekli mikrodalga sistem geometrisi



(a)



(b)

Şekil 3.15 Endüstriyel mikrodalga sistemde Arşimet vidasız (a) ve Arşimet vidalı (b) model geometrileri

Modifiye edilen bu sistemde, geometriye bağlı olarak PTFE silindirin toplam uzunluğu 22.5 cm olarak değiştirilmiştir. Silindirik tüp içerisine yerleştirilen Arşimet vidasına ait shaft çapı ise 1 cm, bıçak kalınlığı 0.25 cm ve Arşimet vidasının uzunluğu ise 16.25 cm olarak kullanılmıştır. Bıçaklar arasındaki mesafe ise 2 cm olarak belirlenmiştir. Belirtilen arşimet vidası Şekil 3.13 ve sistem içerisindeki konumu ve sistemin son geometrisi Şekil 3.14 de gösterilmiştir. Benzer bir sistem Zhu vd. (2017) tarafından da kullanılmış olup bu çalışmada model doğrulama çalışmaları düşük bir ΔT aralığında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan bu matematiksel model kullanılarak arşimet vidasının dönüş hızlarının, ürünün sistem içerisinden akış hızının ve uygulana farklı güç değerlerinin sistem içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Sistem içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının tam bir karşılaştırmasını yapabilmek için,

modifiye edilmiş olan sürekli mikrodalga sistem içerisinde arşimet vidası çıkartılarak, magnetrona tanımlanan farklı güç değerlerine matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. Böylelikle etkin bir karşılaştırma ortamı oluşturulmuştur.

Son olarak ise, laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistem yerine endüstriyel proseslerde kullanılan ve daha önce Topcam (2018) tarafından optimize edilen mikrodalga sistemde bira pastörizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda sistem içerisinde Arşimet vidasının bulunduğu ve bulunmadığı matematiksel modeller hazırlanmıştır (Şekil 3.15). Böylelikle tez kapsamında geliştirilen bira pastörizasyonunda mikrodalga uygulamaların etkisi üzerine laboratuvar ölçekli ve endüstriyel tip mikrodalga sistemlerde çalışmalar yapılmıştır.

3.4 Sistem Ağ Yapılarının Oluşturulması

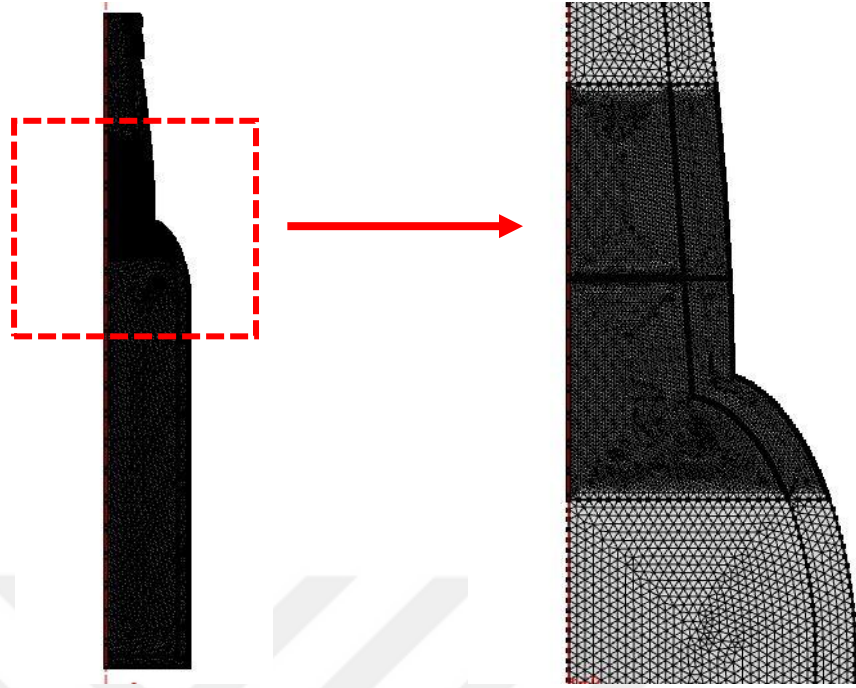
Sonlu eleman dayalı çözümlerde ağ yapısının oluşturulması son derece önemlidir. Özellikle akış problemlerinde oluşan doğal ya da zorlamalı konveksyona bağlı olarak meydana gelen akış profillerinin doğru hesaplanması buna bağlı olarak gerçekleştirilen sıcaklık değişim hesaplaması açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu sistemlerde duvar kenarlarında ve özellikle iki fazlı sistemlerde sıvı – gaz ara yüzeyinde yoğun ağ yapısı kullanılması önemli bir modelleme çalışması kriteri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle tez çalışması sırasında kullanılan farklı model çalışmalarında kullanılan ağ yapıları özellikleri detaylı olarak aşağıda verilmiştir.

3.4.1 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modellerin ağ yapıları

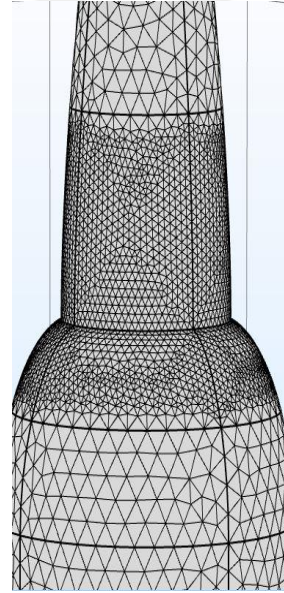
Konvansiyonel proses matematiksel model çalışmalarında 2- ve 3-boyutlu geometriler için kullanılan ağ yapıları Çizelge 3.4 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modellere ait ağ yapıları

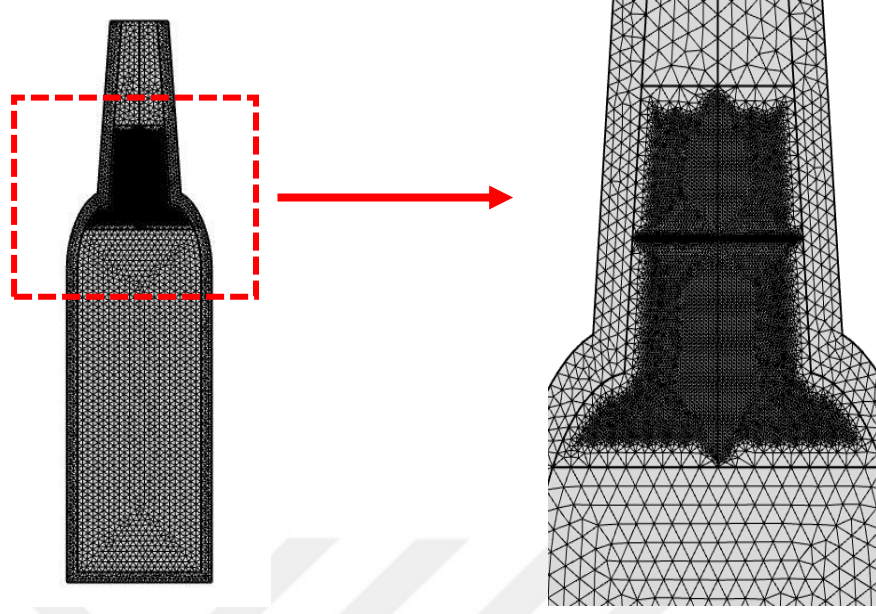
Sistem	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
Konvansiyonel proses için hazırlanan 2-yoyutlu simetri eksenli modeller (Şekil 3.16)	Üçgensek element sayısı	26264
	Köşe element sayısı	1093
	Tepe element sayısı	25
	Element Sayısı	26680
	Minimum element kalitesi	0,102
	Ağ hacmi	76,47 cm ²
3-boyutlu modeller (Şekil 3.17)	Dörtgensek element sayısı	410181
	Üçgensek element sayısı	21000
	Köşe element sayısı	1728
	Tepe element sayısı	77
	Element Sayısı	416157
	Minimum element kalitesi	0,063
	Ağ hacmi	738,1 cm ²
Dikey – Dönme (EoE) etkisinin incelenmesi için hazırlanan 2-boyutlu model (Şekil 3.18)	Üçgensek element sayısı	21028
	Köşe element sayısı	758
	Tepe element sayısı	28
	Element sayısı	21828
	Minimum element kalitesi	0,101
	Ağ hacmi	154,5 cm ²



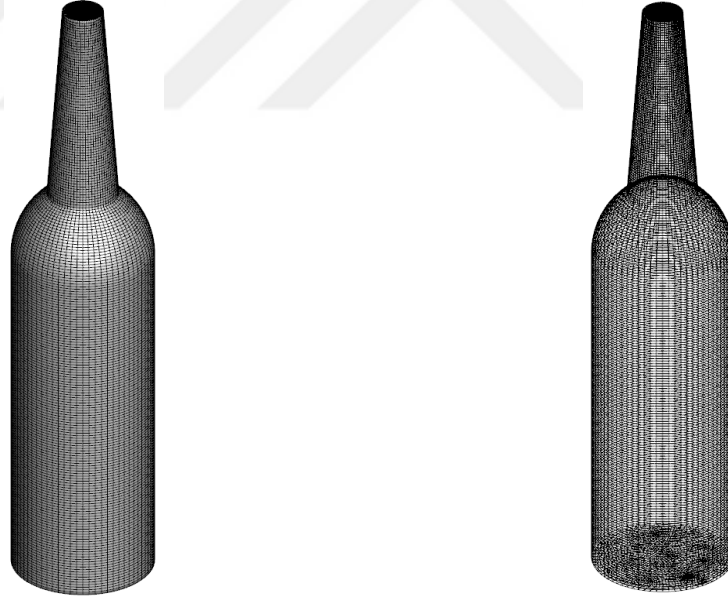
Şekil 3.16 Konvansiyonel proses için hazırlanan 2-boyutlu simetri eksenli modellere ait ağ yapısı



Şekil 3.17 3-boyutlu modellere ait ağ yapısı



Şekil 3.18 2-boyutlu modeller için kullanılan ağ yapısı



Şekil 3.19 Dikey – Dönme (EoE) etkisinin incelenmesi için ANSYS Fluent programı kullanılarak hazırlanan 3-boyutlu modellerin ağ yapısı

3.4.2 İnovatif – mikrodalga prosesi için hazırlanan matematiksel modellerin ağ yapıları

Elektromanyetik alana dair çözüm yapılırken ağ yapısının elektromanyetik alan fiziği doğru çözümlenmesi için Eşitlik 3.3 te gösterilen Nyquist kriteri kullanılmıştır:

$$S_{max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\mu'\epsilon'}} \quad (3.3)$$

Nyquist eşitliğinde λ , dalga boyu (m); c, ışık hızı (m/s); f, frekans (Hz); μ' , bağlı geçirgenlik değerini; ϵ' , dielektrik sabitini belirtmektedir. Bu kriter gereğince sistem içerisinde kurulan ağ yapısının maksimum değreinin, sistem içerisindeki dalga boyunun yarı uzunluğundan ya da ışık hızının frekans bağlı geçirgenlik ve dielektrik sabitine oranından küçük olması gerekmektedir. İnovatif mikrodalga prosesi modellerinde kullanılan ağ boyutu, ağ hacminin element sayısına oranlanması ile elde edilen birim element hacminin küp kökü alınarak hesaplanmıştır (Eşitlik 3.4);

$$\sqrt[3]{\frac{\text{Ağ hacmi}}{\text{Element Sayısı}}} = \text{Ağ Boyutu} \quad (3.4)$$

Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için hazırlanmış model çalışmaları:

$$\sqrt[3]{\frac{738.1}{416157}} = 0.121 \text{ cm} = 0.00121 \text{ m}$$

Arşimet vida modifiyeli endüstriyel mikrodalga sistem çalışmaları:

$$\sqrt[3]{\frac{52800}{298108}} = 0.177 \text{ cm} = 0.00177 \text{ m}$$

Ancaki kullanılan proses aynı zamanda bir konveksiyon prosesini de içerdiğinden kullanılan ağ yapısı Nyquist eşitliğinde elde edilen kriterden daha küçük olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda kullanılan ağ yapıları özellikleri Çizelge 3.5 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 İnovatif – mikrodalga proses için hazırlanan matematiksel modellere ait ağ yapıları

Sistem	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için hazırlanmış model çalışmaları (Şekil 3.20)	Dörtgensek element sayısı	410181
	Üçgensek element sayısı	21000
	Köşe element sayısı	1728
	Tepe element sayısı	77
	Element sayısı	416157
	Minimum element kalitesi	0,063
	Ağ hacmi	738,1 cm ³
Arşimet vida modifiyeli laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem çalışmaları (Şekil 3.21)	Dörtgensek element sayısı	275851
	Üçgensek element sayısı	39401
	Köşe element sayısı	8765
	Tepe element sayısı	4025
	Element sayısı	275851
	Minimum element kalitesi	0,07
	Ağ hacmi	17300 cm ³
Arşimet vida modifiyeli endüstriyel mikrodalga sistem çalışmaları (Şekil 3.22)	Dörtgensek element sayısı	298108
	Üçgensek element sayısı	30496
	Köşe element sayısı	2987
	Tepe element sayısı	142
	Element sayısı	298108
	Minimum element kalitesi	0,174
	Ağ hacmi	52800 cm ³

Nyquist eşitliği ile hesaplama yapılırken laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için 2450 MHz frekans değeri, ε' için ise birada (81.77) sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti değerlerinden sayısal olarak en büyük olanı kullanılmıştır. Endüstriyel sistem için ise 915 MHz frekans değeri ve biraya ait sayısal olarak en büyük dielektrik sabiti değeri (88.77) kullanılarak elektromanyetik alan çözümü için gerekli maksimum element boyutu eşitlik 3.3 kullanılarak belirlenmiştir.

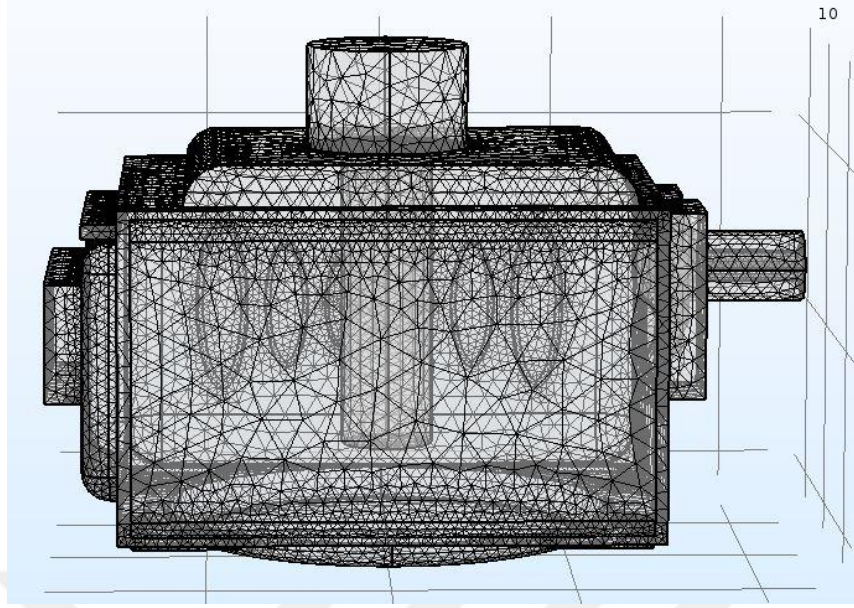
Arşimet vida modifiyeli laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için hazırlanmış model çalışmaları:

$$\frac{3 \times 10^8}{2 \times 2450 \times 10^6 \times \sqrt{81.77 \times 1}} = 0.0067 \text{ m}$$

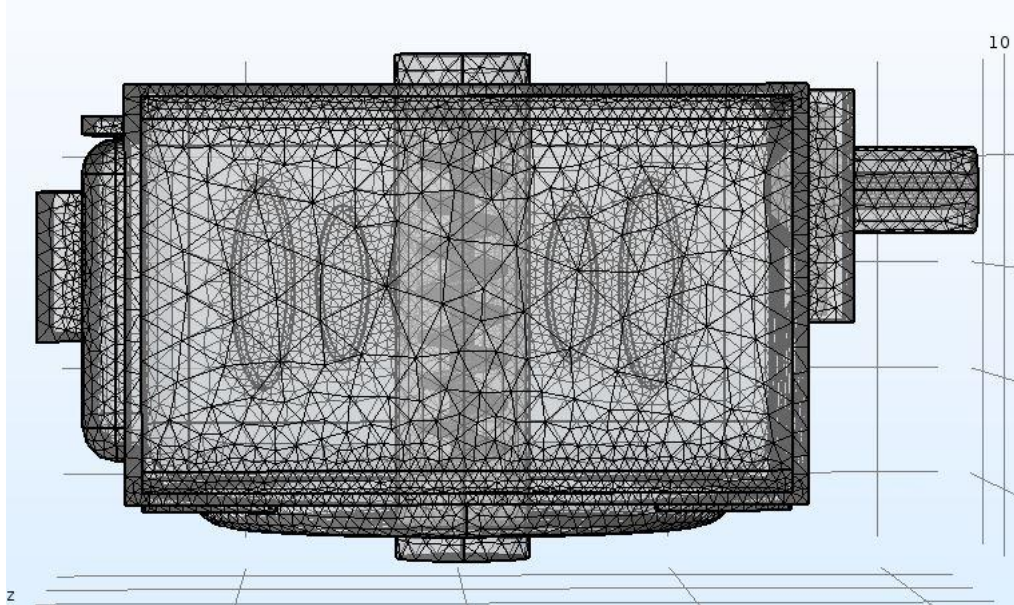
Arşimet vida modifiyeli endüstriyel mikrodalga sistem için hazırlanmış model çalışmaları:

$$\frac{3 \times 10^8}{2 \times 915 \times 10^6 \times \sqrt{88.77 \times 1}} = 0.0173 \text{ m}$$

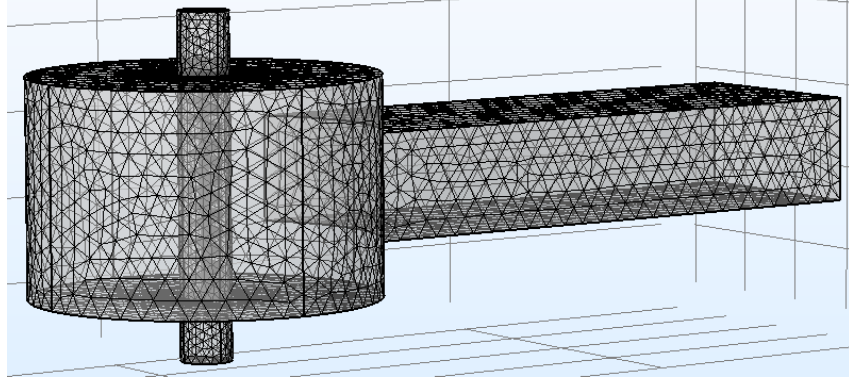
Belirtilen sistemlerde gerçekleştirilecek çözümlerde, sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı yanında, ürün sıcaklık değişiminin belirlenebilmesi amacıyla eş zamanlı olarak akış dinamiği ve ısı transferi denklemlerinin de çözülmesi gerektiğinden eşitlik de görüldüğü şekilde kullanılan ağ element boyutları, Nyquist eşitliğine göre belirlenen değerlerden daha küçük olarak kullanılmıştır. Kullanılan laboratuvar ölçekli mikrodalga sisteme ait ağ yapısı Şekil 3.20 de ve arşimet vidası ile modifiye edilmiş olan ev-tipi mikrodalga sisteme ait modelin ağ yapısı ise 3.21 de verilmiştir. Endüstriyel mikrodalga sistem için kullanılan ağ yapısı Şekil 3.22 de verilmiştir.



Şekil 3.20 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için hazırlanmış modellere ait simülasyon ağ yapısı (LG-Mikrodalga sistem)



Şekil 3.21 Arşimet vidası modifiyeli laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemin ağ yapısı



Şekil 3.22 Arşimet vidası modifiyeli endüstriyel mikrodalga sistem simülasyon ağ yapısı

3.5 Matematiksel Model Çalışmalarında Kullanılan Eşitlikler

Matematiksel modelleme çalışmalarında ürün sıcaklık ve akış profili değişimini ve sistem içi elektromanyetik alan değişimini belirlemek amacıyla kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Enerji eşitliği:

$$v_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \cdot \nabla^2 T + Q \quad (3.5)$$

Süreklilik eşitliği:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \rho \cdot v_r) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \cdot v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot v_z) = 0 \quad (3.6)$$

Momentum eşitlikleri:

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \cdot \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (3.7)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r \cdot v_\theta}{r} + v_z \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \cdot \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (3.8)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (3.9)$$

Bu denkliklerde T sıcaklığı (K), t proses süresini (s), P basıncı (Pa), μ dinamik viskoziteyi (Pa-s), k_f ısı iletkenlik katsayısını (W/m-K), ρ yoğunluğu (kg/m³) and α ısı yayılım katsayısını (m²/s) ve v_r , v_θ , v_z değerleri sırasıyla r, θ ve z yönlerindeki hız bileşenlerini göstermektedir.

Enerji denkliğinde verilen Q değeri belli bir konumda mikrodalgalar ile oluşturulan hacimsel ısı üretimi olup o konumdaki elektrik alan (E)'a bağlıdır (Prosetya and Datta, 1991):

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E^2 \quad (3.10)$$

burada ε_0 boşluktaki dielektrik sabiti, ε'' akışkan için dielektrik kayıp, f ise frekans değeridir. Elektrik alan için çözülmesi gerekli olan eşitlik ise:

$$\nabla \left(\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \cdot E \right) + \nabla^2 E + k^2 \cdot E = 0 \quad (3.11)$$

Burada ε dielektrik sabiti ve k ise dalga sayısıdır. 3.10 ve 3.11 numaralı denklikler ise mikrodalga uygulama sırasında ürün içerisinde meydana gelecek sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla süreklilik – enerji ve momentum denklikleri ile eş zamanlı olarak çözülmüştür.

Konvansiyonel prosesler için hazırlanan, sabit ve değişken sıcaklıklarda sıcak su banyosu ile yapılan deneylerde, ortam sıcaklığı K-tipi ısı çiftler yardımı ile ölçülmüştür ve alınan bu data lar hazırlanan model çalışmalarında bir girdi olarak kabul edilmiştir. Sıcak su banyosunda deneyler sırasında oluşan konvektif ısı transfer

katsayısı (h) değeri; bira geometrisi uzun bir silindir olarak kabul edilerek aşağıda gösterilen işlemler doğrultusunda hesaplanmıştır.

Öncelikle Eşitlik 3.12’de,

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (3.12)$$

Bu eşitlikte, D , bira şişesinin en kalın çapı (m); L , bira şişesinin boyu; Gr , grashof sayısını ifade etmektedir.

Ortamın konvektif ısı transfer katsayısı (h), Eşitlik 3.13 deki formül ile bulunmuştur.

Buna göre,

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.13)$$

Bu eşitlikte, Nu , Nusselt sayısı; Ra , Rayleight sayısı; Pr , Prandtl sayısını göstermektedir.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (3.14)$$

Eşitlikte 3.14’de ise, h , konvektif ısı transfer katsayısı ($W/(m^2 K)$); k , termal iletkenlik katsayısı; L_c , bira şişesinin uzunluğunu temsil etmektedir.

Dikey – dönme çalışmalarında ürün yüzeylerinde tanımlanan hız denklemi Eşitlik 3.15’de verilmiştir.

$$v = 2 \times \pi \times \omega \times \text{sys2.r} \quad (3.15)$$

Bu eşitlikte kullanılan ω , dönme frekansının rpm cinsinden değeri olup, Sys2.r değişkeni ise COMSOL programı içerisinde gömülü olan silindirik koordinat sisteminde radyal yöndeki koordinatın merkez noktasından olan uzaklık değeridir.

3.6 Başlangıç ve Sınır Koşulları

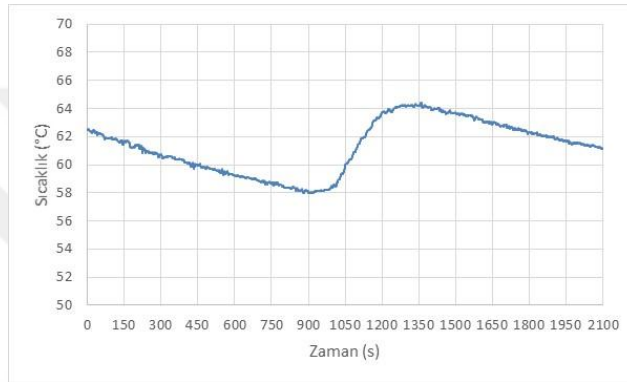
3.6.1 Konvansiyonel proses için hazırlanan matematiksel modellerin başlangıç ve sınır koşulları

Yukarıda da detaylı olarak açıklandığı gibi bu kapsamda bira şişesi baz alınarak hazırlanan matematiksel model çalışmalarında 2-boyutlu, 2-boyutlu eksensel simetri ve 3-boyutlu geometriler kullanılmıştır. Su banyosunda sabit sıcaklıkta yapılan deneyler için hazırlanan simülasyon çalışmalarında, 3.13 - 3.15 numaralı denklikler kullanılarak ortam konvektif ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Sabit sıcaklıkta su banyosu için bu değer $1074 \text{ W/m}^2\text{-K}$ olarak bulunmuştur. Ortam sıcaklık değerleri için ise, her ne kadar yapılan deneylerde ortam sıcaklıkları sabit olarak tanımlansalarda deney süresince salınımlar ve ufak değişimler olmuştur. Bu nedenle ortam sıcaklığındaki değişimler sınır koşulu olarak değişken olarak kullanılmıştır. Şekil 3.23 yapılan 3 ayrı deneyde elde edilen ortam sıcaklık değişimini göstermektedir. Bu deneylerde başlangıç sıcaklık değerleri ise sırasıyla 25.71 , 23.46 ve 24.09 °C olarak ölçülmüştür. Su banyosunda kademeli olarak artan sıcaklıkta (değişken sıcaklıkta) yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen ortam sıcaklık değişimi Şekil 3.24-a'da gösterilmekte olup bu veriler baz alınarak hesaplanan ısı transfer katsayısı değerleri ise Şekil 3.24-b'de verilmektedir

Konvansiyonel proses koşullarında doğrulanan 2-boyutlu eksensel simetri çalışmalarının tamamlanmasından sonra geliştirilen modellerin literatür sonuçları ile karşılaştırılması amacıyla 3-boyutlu geometri temelinde hazırlanan model çalışmalarına geçilmiştir. Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından sabit 60 °C sıcaklıkta su banyosu kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla ortam sıcaklığı sabit 60 °C olarak kullanılan model çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada başlangıç sıcaklığı 27 °C ve şişe çerisindeki ürün yüksekliği de 19.42 cm olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmadan sonra endüstride de kullanılan 7 kademeli tünel pastörizasyon sistemine ait model çalışması yine 3-boyutlu geometriler kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma yine Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından belirtilen ortam sıcaklık ve konvektif ısı transfer katsayısı değişimi sınır koşulu olarak kullanılmıştır (Çizelge 3.3). Bu model çalışmasında başlangıç sıcaklık değeri 4 °C olarak tanımlanmıştır.



Deney 1
Toplam proses
süresi: 1200 sn

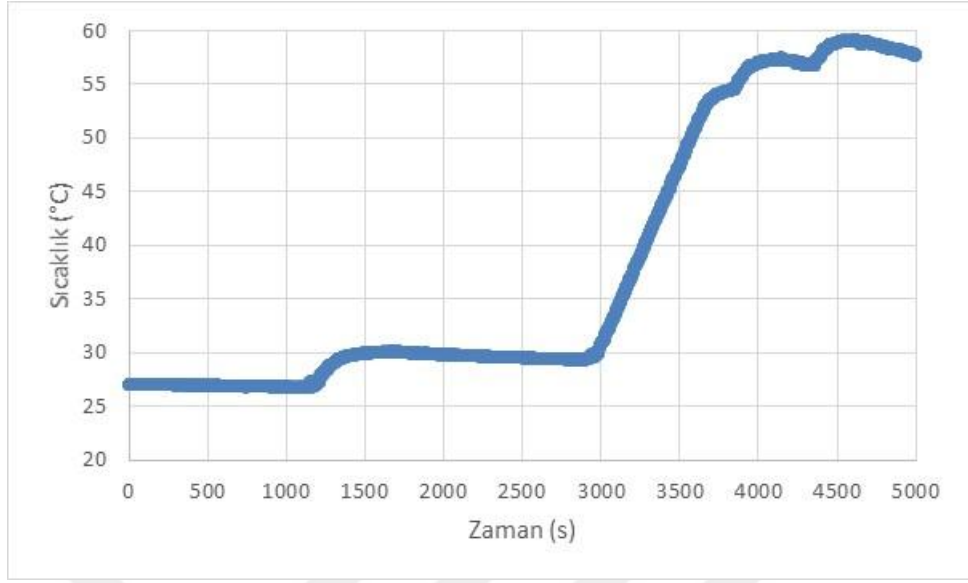


Deney 2
Toplam proses
süresi: 2100 sn

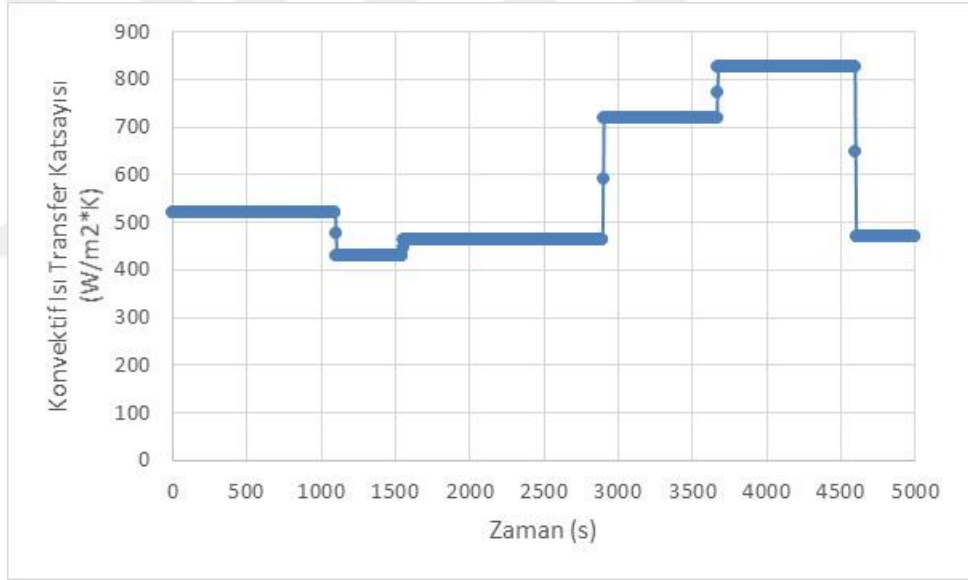


Deney 3
Toplam proses
süresi: 1200 sn

Şekil 3.23 Sabit sıcaklıkta su banyosunda yapılan deneyler esnasında, su banyosundan alınan ortam sıcaklık değerleri ve toplam proses süreleri



(a)



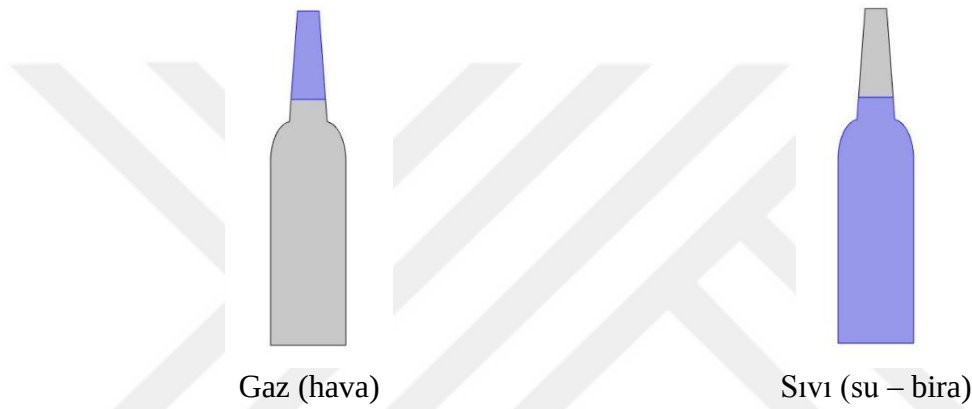
(b)

Şekil 3.24 Kademeli olarak artan sıcaklıkta (değişken sıcaklıkta) yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen (a) ortam sıcaklık ve (b) ortam ısı transfer katsayısı değişimi

3.6.2 Dikey – dönme (EoE) etkisinin bira pastörizasyonu üzerinde etkisinin belirlenmesi için hazırlanan matematiksel modeller için başlangıç ve sınır koşulları

EoE etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, öncelikle model parametrelerine karar verebilmek amacıyla 2-boyutlu geometrilerde ısı transferi, iki faz problemi ve hareketli ağ yapısı modülleri kullanılarak model çalışması yapılmıştır. İki

faz olarak tanımlanan sıvı ve gaz kısımları Şekil 3.25’de gösterilmiştir. Bu çalışmada şişe duvar kalınlığı, 3. bir faz olarak model çalışmalarına ekleneceğinden ve hesaplama süresi buna bağlı olarak uzayacağından, yapılan model çalışmalarında şişe duvar kalınlığının proses etkisini önemli olmayacağı varsayımı yapılmıştır. 2-boyutlu modellerde ilk olarak ürün etrafına ısı akısı olarak $1000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ve ortam sıcaklığı olarak 60°C tanımlanmış, başlangıç sıcaklığı da 4°C olarak kullanılmıştır. EoE prosesi uygulanmadan ve 2 rpm dönüş hızı olarak gerçekleştirilen model çalışmalarının sonuçlarına göre 3-boyutlu modellerde kullanılacak olan parametrelere karar verilmiştir.



Şekil 3.25 Dikey - Dönme etkisinin incelenmesi için hazırlanan 2-Boyutlu modellerde tanımlanan materyaller

Daha sonra 3-boyutlu model geometrilerinde dikey-dönmenin bira pastörizasyonu üzerine etkisinin incelenebilmesi için COMSOL Multiphysics programı ile gerekli çalışmalar yapılmı ancak kullanılan “İki Faz Modülü” nde sistem içerisinde gaz – sıvı etkileşimi çözülemediğinden istenilen sonuç alınamamıştır. Bu nedenle 3-boyutlu geometrilerde ANSYS Fluent programı kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller için gerekli olan geometrik çizimin tamamen aynı olması için COMSOL Multiphysics prgoramından gerekli model geometrileri alınmış ve Fluent programına aktarılmıştır.

Fluent programında geliştirilen matematiksel model çalışmalarında, EoE hareketinin endüstriyel uygulamalara olan etkisi inceleneceği için bira şişesi etrafına tanımlanan ortam sıcaklık değerleri ve ısı transfer katsayısı değerleri Çizelge 3.3 de verildiği şekilde kullanılmış ve başlangıç sıcaklık değeri 4°C tanımlanmıştır. Öncelikle hiçbir dönme hareketi tanımlanmadan 3360 saniye süren bir matematiksel model

geliştirilmiştir. Daha sonra EoE hareketinin uygulanması için sistem içerisinde sıcaklık farkının en fazla olduğu zaman dilimi seçilmiştir. Bu kapsamda 780. saniyede başlayan 65 °C ortam sıcaklığı uygulama periyodunda ürün içerisinde en fazla sıcaklık farkı 900. saniyede ortaya çıkmaktadır. Tam bu anda, inovatif bir proses uygulaması geliştirme amacıyla biraya EoE hareketi uygulanmıştır. Bu şekilde, üründe oluşacak karıştırma etkisiyle ürün içerisindeki sıcaklık farkının azaltılacağı ve tekdüze sıcaklık değişimi eldesi ile proses süresinin kısaltılabileceği varsayımı yapılmıştır. EoE hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan matematiksel modellerde 900. saniyeden itibaren 2 tur sürecek şekilde 3 farklı dönüş hızı (1, 2.5 ve 5 rpm) çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha öncede açıklandığı şekilde EoE uygulama sırasında hareket ve sıcaklık artışı etkisiyle CO₂'e bağlı köpürmenin engellenmesi amacıyla, literatürde konserve proseslerinde kullanılan 10 – 20 rpm gibi hızlar yerine, belirtilen düşük dönme hızları kullanılmıştır.

1 rpm dönüş hızında 2 tam tur dönme hareketi için gereken süre 120 saniyedir. Bu nedenle ısıtma işlemi, 1020 saniye sonunda proses koşullarında bir değişiklik yapılmadan, son ısıtma süresi olan 1980 saniyeye kadar devam edilmiştir. Aynı şekilde 2.5 rpm dönüş hızında 948 ve 5 rpm dönüş hızında 924 saniyede tamamlanan EoE hareketi sonrası proses 1980 saniye süresine kadar sürdürülmüştür. Bu çalışmalara ilaveten, 900. Saniyeden itibaren 1 rpm EoE dönme hızı ile devam eden bir model de ayrıca tamamlanmıştır. Bu model çalışmasında amaç sürekli dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisini gözlemlemek olarak belirlenmiş ve bu kapsamda en düşük dönme hızı seçilmiştir.

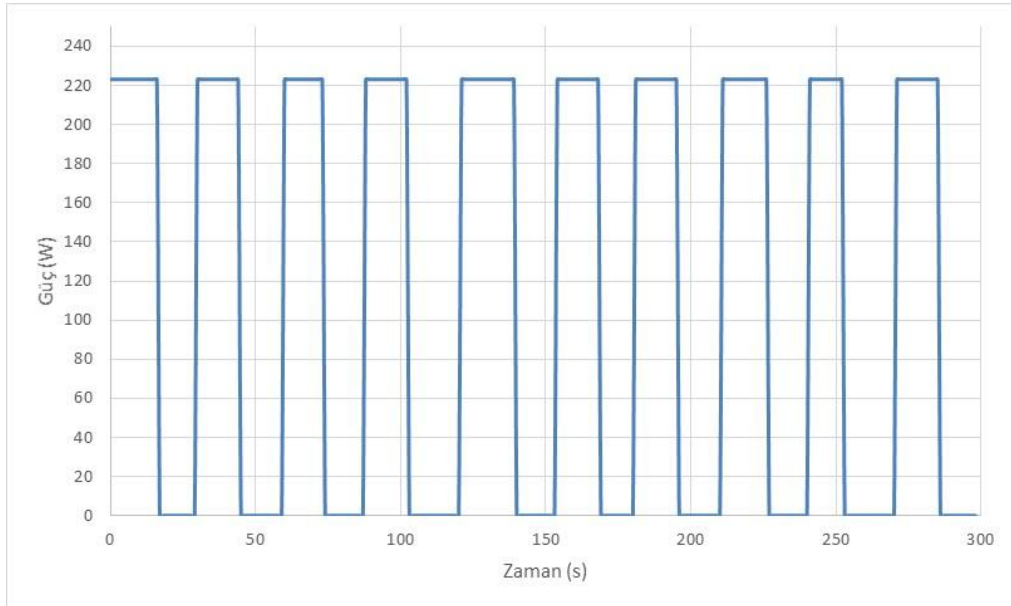
Hem COMSOL Multiphysics hem de ANSYS Fluent programı ile geliştirilen matematiksel modellerde tanımlanan dönme hareketinde kullanılan EoE dönme hızı için Eşitlik 3.15'de tanımlanan matematiksel ifade kullanılmıştır. Bunun için kartezyen koordinat düzlemi silindirik koordinat düzlemine çevrilmiştir. Bu eşitlikte ω için, yukarıda bahsedildiği gibi dönüş hızları (1, 2.5 ve 5RPM) tanımlanmıştır. Çizelge 3.6 belirtilen dönme hızlarında 2 tur için gerekli dönme süresi ve çizgisel dönme hızı değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.6 Kullanılan dikey dönme (EoE) hızlarında 2 tur tam dönme için gerekli dönme süresi ve çizgisel dönem hızı değerleri

Dikey dönme hızı (EoE – rpm)	2 Tur için gereken dönme süresi (s)	Çizgisel dönme hızı (rad/s)
1	120	0.105
2.5	48	0.262
5	24	0.524

3.6.3 İnovatif – mikrodalga prosesi için hazırlanan matematiksel modellerin başlangıç ve sınır koşulları

Laboratuvar ölçekli mikrodalga fırın ile yapılan deneylerde, PTFE silindirik tüp içerisinde bulunan pastörsüz biralara başlangıç sıcaklığı 8.25 °C olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar esnasında mikrodalga sisteme ait çalışma döngüsünde proses sırasındaki sıcaklık değişimleri baz alınarak belirlenmiştir. Su deneyleri ile 350 W güç koşulunda gerçekleştirilen deneylerde sistemden elde edilen güç miktarı 223.08 W olarak hesaplanmıştır (bu değer sistemin %63.7 verimle çalıştığını göstermektedir).



Şekil 3.26 LG laboratuvar ölçekli mikrodalga fırının çalışma döngüsü

Model çalışmalarında PTFE silindirik tüp ile ortam arasındaki konveksiyon ısı transfer sınır koşulu tanımlanmış ve konvektif ısı transfer katsayısı olarak $10 \text{ W/m}^2\text{-K}$, ortam sıcaklığı olarak ise $20 \text{ }^\circ\text{C}$ kullanılmıştır. Elektromanyetik çözümlerde mikrodalga sistem iç yüzeyleri mükemmel yansıtıcı PTFE yüzeyi ise transparan olarak kullanılmıştır. Akış çözümlerinde bütün katı yüzeylerde kaymama (no-slip) sınır koşulu kullanılmıştır.

Model doğrulama çalışmalarından sonra, sürekli bir mikrodalga pastörizasyon sistemi tasarımı yapabilmek ve üründe oluşacak olan sıcaklık dağılımını tekdüze etmek amacıyla mikrodalga sistem PTFE tüp içerisine bir Arşimet vidasının yer alabileceği varsayımıyla modifiye edilmiş ve 1.5, 2.5, 5 ve 10 rpm dönme hızlarında ürün sıcaklık değişimi geliştirilen matematiksel model çalışmalarından elde edilen sonuçlarla incelenmiştir. Bu modellerde sistem içerisinde sürekli bir akış profili sağlayabilmek amacıyla PTFE tüpün taban bölgesi sıvı girişi, tavan bölgesi ise çıkış olarak tanımlanmıştır. Sistem içerisine giren sıvı – bira giriş hızı değeri 0.01 m/s (Reynold sayısı 21.73) olarak kullanılmıştır. Bu sistemde magnetron tarafından sisteme verilen enerji ve çalışma döngüsü Şekil 3.26’de gösterildiği şekilde kullanılmıştır.

Şekil 3.26 de gösterilen çalışma döngüsü ile mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründe istenilen sıcaklık değerlerine ulaşılamamıştır. Bu nedenle sistem içerisine sürekli bir enerji girişi olmasına karar verilmiştir. Bu nedenle sistem içerisine giren enerjinin ürün içerisinde oluşturacağı sıcaklık dağılımını incelemek amacıyla farklı güç değerleri (350W, 750W ve 1500W) ile farklı akış hızları (0.005 m/s , 0.05 m/s ve 0.25 m/s ; Reynold sayıları sırasıyla, 10.86, 108.69 ve 543.47) kullanılarak model çalışmaları hazırlanmıştır. Ayrıca sistem içerisinde bulunan Arşimet vidasının etkisinin belirlenebilmesi için aynı mikrodalga sistemde Arşimet vidası çıkartılarak farklı güç değerlerinde (223W, 350W, 500W, 1000W, 1500W, 2000W ve 2500W) 0.005 m/s (Reynold sayısı 10.86) akış hızı kullanılarak model çalışmaları hazırlanmıştır. Endüstriyel uygulamalar için ise kullanılan endüstriyel mikrodalga sisteminde 8000W güç ve 0.015 m/s (Reynold sayısı 32.60) akış hızı kullanılarak 1, 2.5, 5 ve 10 rpm boru dönüş hızlarında üründe oluşan sıcaklık değişimlerini belirlemek için matematiksel model çalışmaları hazırlanmıştır. Mikrodalga sistemlerde kullanılan akış modellerinde, ürün giriş hızı sabit kabul edilmiş ve sistem girişinden itibaren akış profilinin laminar akış olduğu kabülü yapılmıştır.

3.7 Matematiksel Modellerde Kullanılan Çözümleyiciler

Geliştirilen matematiksel modelleme çalışmalarında konvansiyonel pastörizasyon çalışmalarında ve Arşimet vidası kullanılarak hazırlanan mikrodalga sistemlerde zamana bağlı (transient), Arşimet vidasının kullanılmadığı mikrodalga sistemlerde ise yataşkın 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 64 GB RAM ve 3.6 GHz işlemci hızına sahip iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 7 kademedan oluşan tünel pastörizasyon sistemlerine ait matematiksel modelleme çalışmaları için maksimum 32 GB RAM kullanılmıştır ve yataşkın olmayan simülasyon çalışmaları ≈ 3 ayda tamamlanmıştır. Mikrodalga sistemlerde farklı modeller için gerekli RAM ihtiyacı, model içeriğine göre değişmekle birlikte genel olarak maksimum 48 GB RAM kullanımı ile arşimet vidasıyla modifiye edilmiş endüstriyel mikrodalga sistemde gerçekleştirilen yataşkın olmayan simülasyon çalışmaları ≈ 24 saatte tamamlanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

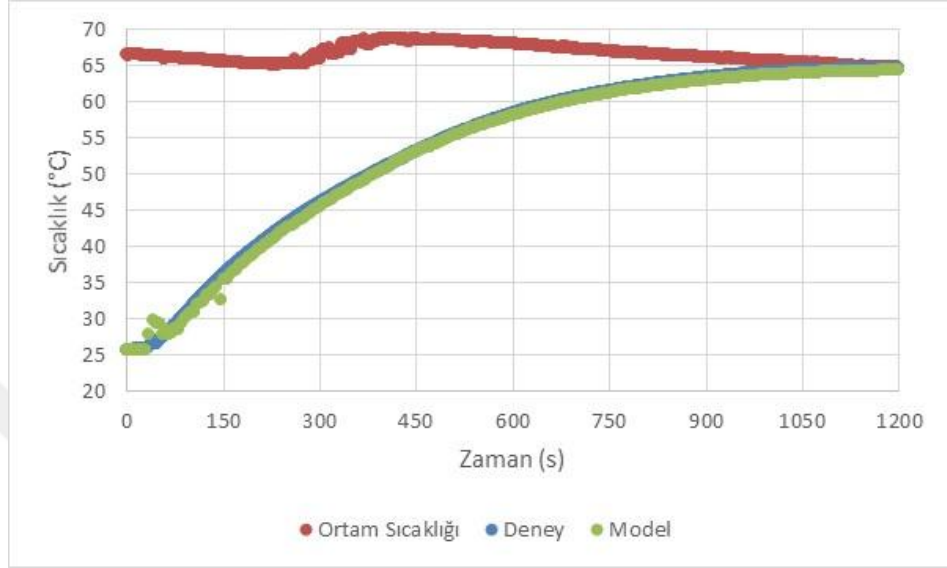
4.1 Konvansiyonel Proses İçin Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

Bira endüstrisinde pastörizasyon amacıyla en çok tercih edilen yöntem, dolum yapılmış ve kapatılmış şişelerin farklı sıcaklık bölmelerinden geçerek ısıtım işlemi uygulaması yapılan tünel pastörizasyonudur. Bu işlemde kullanılan sıcak su, yüksek hızlarda bira şişelerinin üstüne püskürtülmekte ve elde edilen yüksek ısı transfer katsayısı yardımı ile de ürün içerisine yüksek hızda bir ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemi laboratuvar koşullarında tekrar edebilmek amacıyla bira şişeleri su banyosu içerisinde ısıtım işlemi maruz bırakılmış ve bu kapsamda farklı ortam sıcaklık değişimleri de kullanılabilmektedir. Bu kapsamda sabit ve değişken sıcaklık olmak üzere iki ayrı koşulda deneysel ortam oluşturulmuş ve deneysel verilerden elde edilen sabit sıcaklık başlangıç koşulu ile Nusselt sayısı – doğal konveksiyon korelasyonlarından elde edilen ısı transfer katsayısı sınır koşulu kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller yine deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulama çalışmalarında ürün içerisinden alınan sıcaklık değişim değerleri kullanılmıştır.

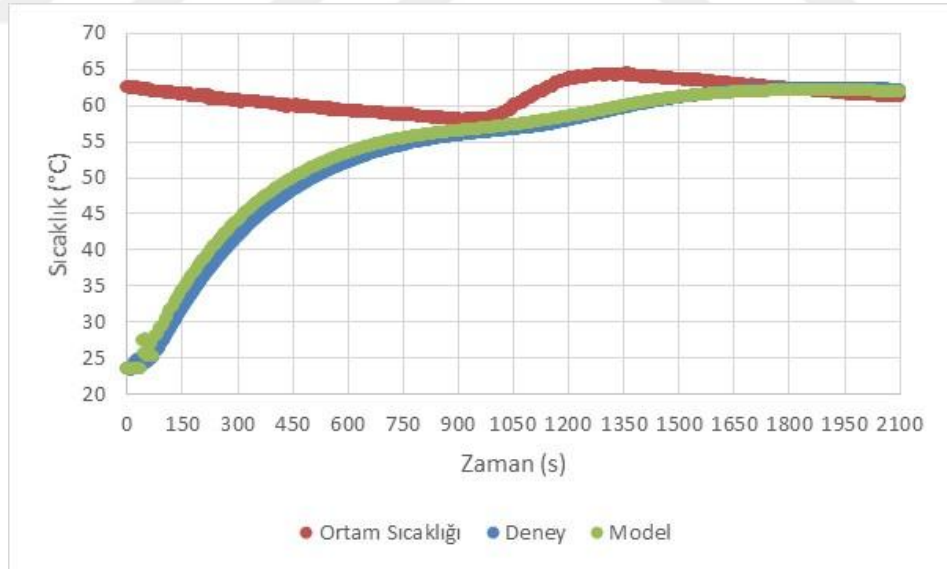
4.1.1 Sabit dış sıcaklıkta yapılan deneysel çalışmalar ve matematiksel model doğrulama çalışmaları

Sıcak su banyosunda sabit sıcaklıkta yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık ölçüm sonuçları ve bu sonuçların matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.1 – Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Bu kapsamda yapılan 3 farklı deneyde sıcaklık ölçümü gerçekleştirilen noktaların yeri Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Burada bahsedilen modeller 2-boyutlu eksensel simetri modelleri olup, kullanılan bira şişesi ve geometrik özellikleri Şekil 3.10’de verilmiştir. Şekil 4.1 – 4.3’de de görüldüğü şekilde matematiksel model sonuçları ile deney sonuçları uyumlu çıkmıştır. Bu deney grubu sabit ortam sıcaklığında gerçekleştirilen deneysel ve model doğrulama çalışmaları olarak adlandırılrsa da, ortam sıcaklığında kullanılan su banyosunun ısı kontrolüne bağlı salınımlar meydana gelmiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalardan elde edilen ortam sıcaklık değişimleri model çalışmalarında konveksiyon sınır koşulunda zamana bağlı değişken sıcaklık olarak kullanılmıştır. Bu deneylerde başlangıç sıcaklık değerleri ise sırasıyla 25.71, 23.46 ve 24.09 °C olarak ölçülmüştür. Bu deney grubu için ortam ısı transfer katsayısı 3.12 - 3.14 numaralı denklemler kullanılarak $1074 \text{ W/m}^2\text{-K}$ olarak hesaplanmış ve model

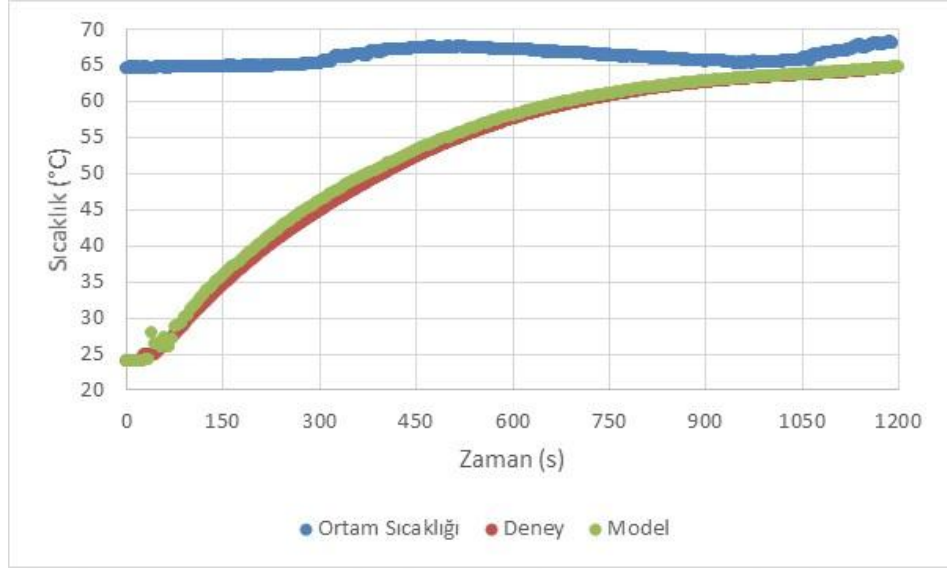
çalışmalarında kullanılmıştır. Matematiksel model çalışmalarından elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı ise farklı proses sürelerinde Şekil 4.4 ve 4.5’de 1 ve 2 numaralı deney koşullarına göre çalıştırılan modelden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Bu kapsamda deneysel doğrulama konusunda çalışmanın ilk bölümü tamamlanmıştır.



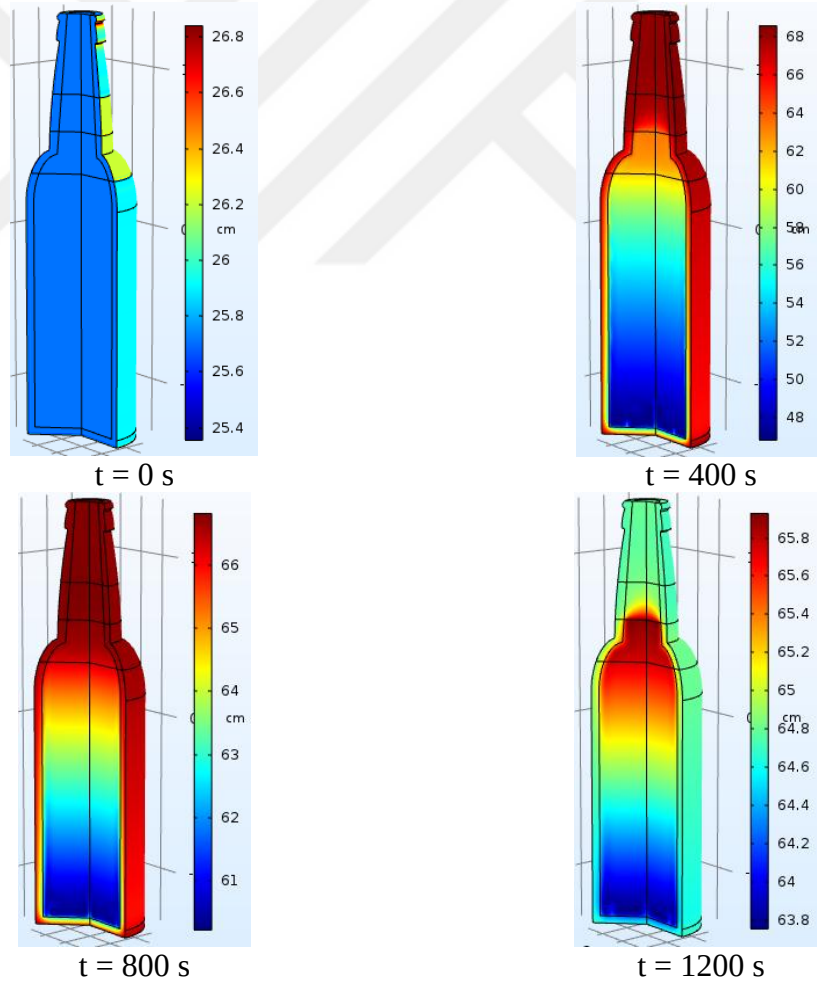
Şekil 4.1 1 nolu deney ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması



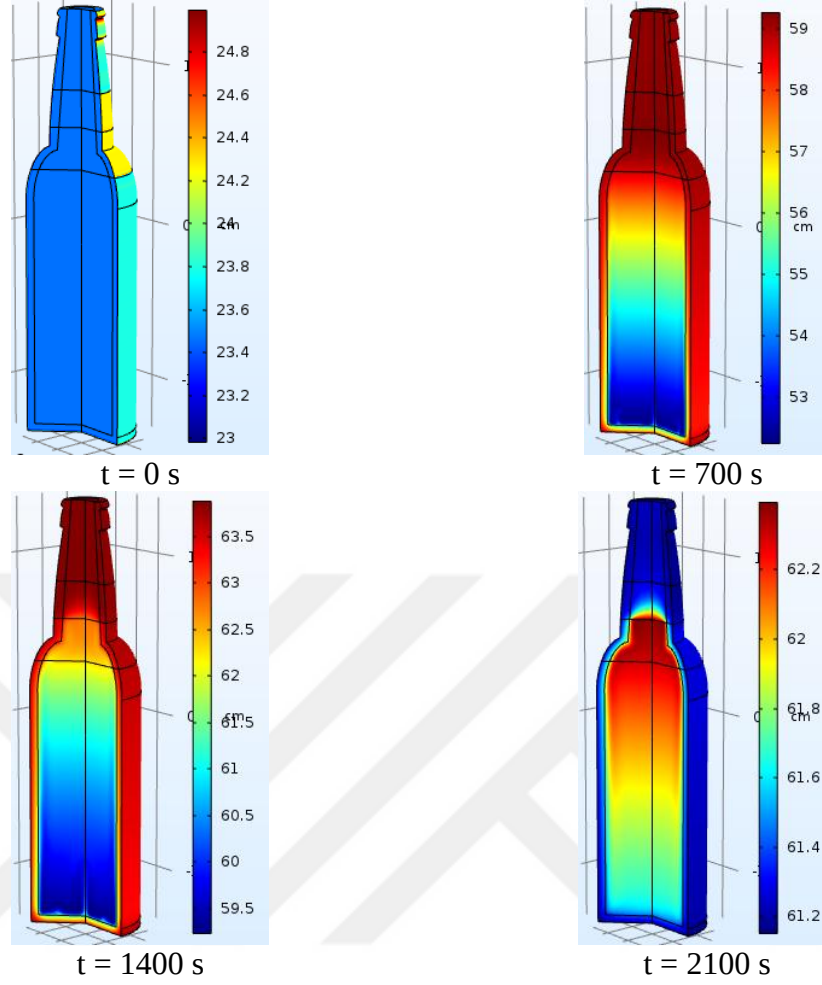
Şekil 4.2 2 nolu deney ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.3 3 nolu deney ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.4 Doğrulanmış matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses süresince değişimi (Deney -1 koşulları) (°C)



Şekil 4.5 Doğrulanmış matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses süresince değişimi (Deney -2 koşulları) (°C)

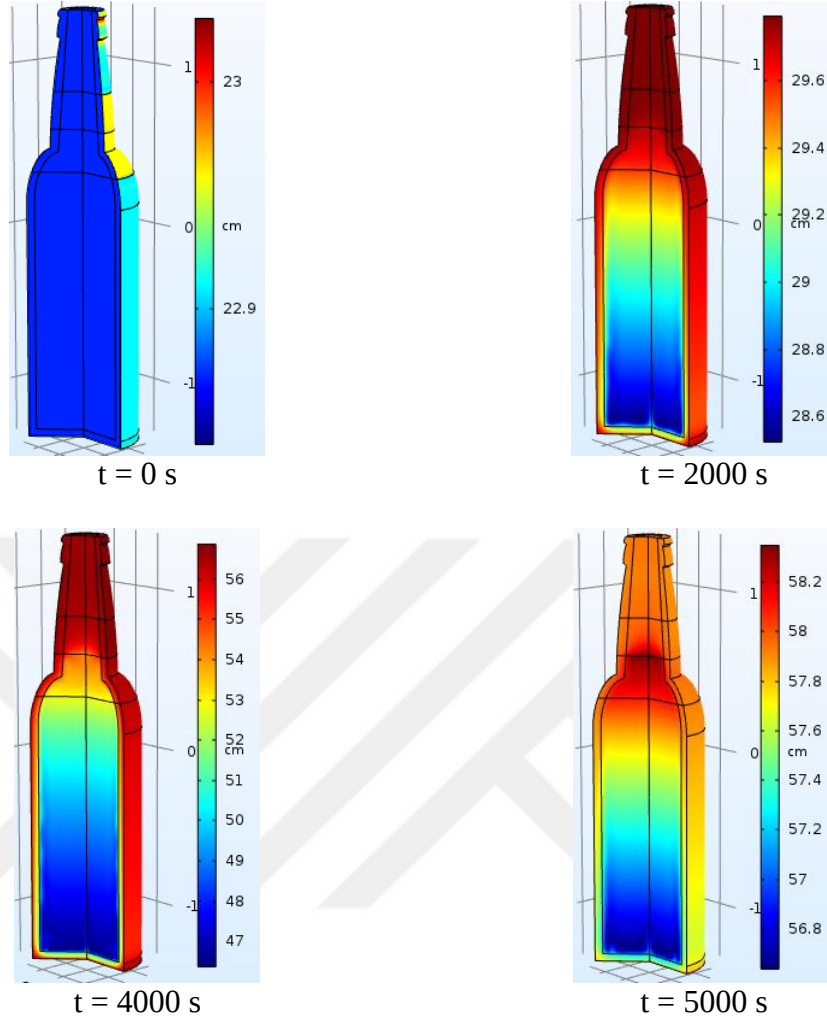
4.1.2 Değişken ortam sıcaklığında yapılan deneysel çalışmalar ve matematiksel model doğrulama çalışmaları

Model doğrulama çalışmalarının 2. aşamasında, bira pastörizasyonunda kullanılan tünel pastörizasyon koşullarını benzetmek amacıyla su banyosu ortamında kademeli olarak sıcaklık artışı sağlayacak bir senaryo planlanmış ve bölüm 4.1.1'de açıklandığı şekilde ürün sıcaklık değişimleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu deney çalışmasında bira şişesi içerisinde sıcaklık değişimi şişe ağzından 19.05 cm aşağıda K-tipi ısı çifti kullanılarak alınmış ve elde edilen sıcaklık değişim sonucu model verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde yine 2-boyutlu eksensel simetri modeli kullanılmış ve ortam sıcaklık değişimleri model çalışmasında konveksiyon sınır koşulunda zamana bağlı değişken sıcaklık olarak uygulanmıştır. Bu kapsamda kullanılan ortam sıcaklık değişimi ve farklı sıcaklık koşulları için hesaplanan ısı transfer katsayısı değişimleri

Şekil 3.24’da, deneysel veriler ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması ise Şekil 4.6’da verilmiştir. Burada da gözlemlendiği şekilde geliştirilen matematiksel modelden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile birebir uyumlu bulunmuş ve proses sırasında ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Değişken sıcaklıkta su banyosunda yapılan deney ve model sonuç karşılaştırılması



Şekil 4.7 Doğrulanmış matematiksel model kullanılarak elde edilen ürün sıcaklık dağılımının proses süresince değişimi (Değişken ortam sıcaklığı koşulları) (°C)

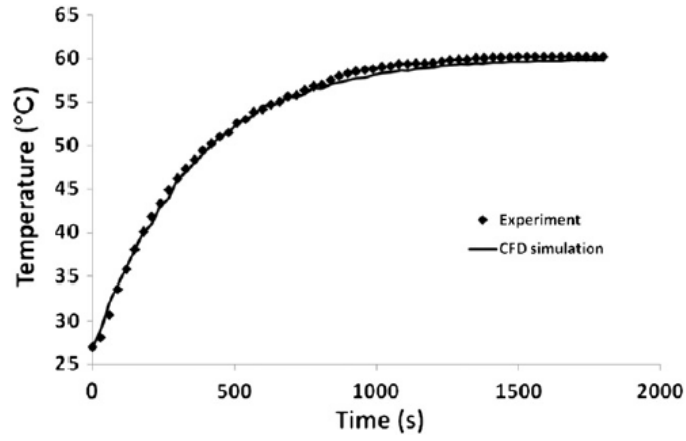
4.1.3 Literatür verileri kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel model doğrulama çalışmaları

2-boyutlu eksensel simetri yaklaşımı ile geliştirilen matematiksel model çalışmalarının, sabit ve değişken sıcaklıkta elde edilen deneysel verilerle doğrulanmasından sonra, literatür verileri kullanılarak 3-boyutlu bir geometride model çalışmaları yapılmıştır. 4.1.1 ve 4.1.2 numaralı bölümlerde yapılan model doğrulama çalışmalarında, model sonuçları bira şişeleri içerisindeki saf su örneklerinden elde edilen sıcaklık verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ise, direkt olarak bira örneklerinden elde edilen literatür verileri kapsamında doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha önce de açıklandığı şekilde bira örneklerinin ısıtılma sırasında köpürmesi sonucu sağlıklı veri

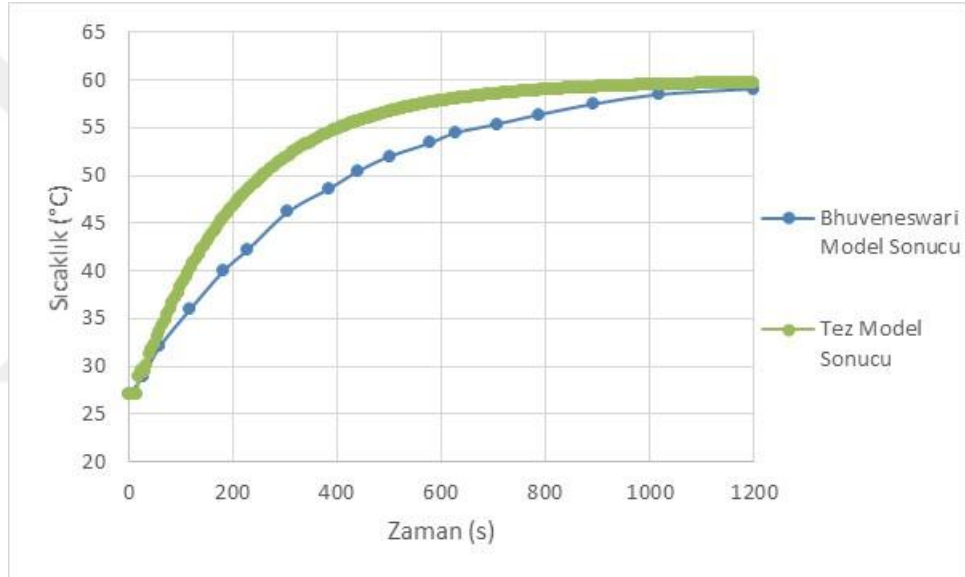
alınmadığından bundan önceki bölümlerde su örneklerinin kullanılması tercih edilmiştir. Literatür verileri ile doğrulama çalışması için Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan (2014) tarafından yapılan ve bira örneklerinin 60 °C sabit sıcaklıkta su banyosu içerisinde proses edilmesi sırasında elde edilen veriler kullanılmıştır. Belirtilen literatür çalışmasında kullanılan ortam sıcaklık değeri ve ısı transfer katsayısı konveksiyon sınır koşulu olarak uygulanmıştır. Bira şişesi tabanından 6.95 cm yukarıdaki bir noktada elde edilen sıcaklık değişimi karşılaştırma verisi ve kullanılan şişe ölçüleri için Şekil 3.10'de verilen geometrik veriler kullanılmıştır. Şekil 4.8a literatürde yapılan çalışmada elde edilen deney – model karşılaştırma sonuçlarını gösterirken, Şekil 4.8b'de bu tez çalışmasında geliştirilen 3-boyutlu modelden elde edilen sonuçlarla literatür verilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.

İki model sonucu arasında meydana gelen farkın öncelikle şişe geometrilerinin birebir aynı geometrik özelliklere sahip olmamasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, iki çalışmada kullanılan ağ yapılarının farklı olması da iki model sonucu arasında bir fark oluşmasına sebep vermiştir. Ancak geliştirilen model kullanılarak literatür verilerinde elde edilen sıcaklık eğiliminin hesaplanabildiği de bu sonuçlara göre kabul edilmiştir.

Hem deneysel hem de literatür verileri kullanılarak doğrulama çalışmaları tamamlandıktan sonra, geliştirilen 3-boyutlu matematiksel model direkt olarak endüstriyel bir prosesi gösteren ısı işlem verileri kullanılarak test edilmiş ve bu kapsamda hem ısınma hem de soğuma bölgelerinde sıcaklık değişiminin doğru bir şekilde hesaplanabileceği gösterilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında, bira pastörizasyonu için de yaygın olarak kullanılan tünel pastörizasyon uygulaması seçilmiştir. Çizelge 3.3, bu kapsamda tünel pastörizasyonu amacıyla kullanılan farklı sıcaklık ve ısı transfer katsayısı değişimini göstermektedir. Çizelge 3.3'de verilen ortam sıcaklık ve ısı transfer katsayısı değerleri proses sırasında sınır koşulu olarak kullanılmış ve ısı işlem süresince bira örneği içerisindeki sıcaklık değişimi (hacimsel ortalama sıcaklık ve şişe içerisindeki bira yüksekliğinin 1/3'ü) Şekil 4.9'de gösterilmektedir. Proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ise Şekil 4.10'de verilmiştir. Proses sırasında ürün içerisinde oluşan hız profilleri Şekil 4.11'de verilmiştir.

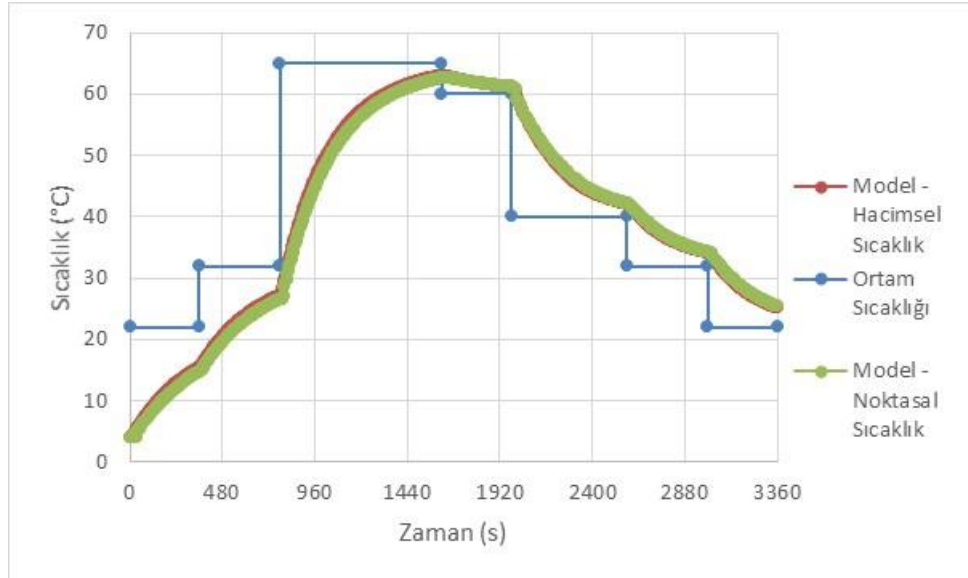


(a)

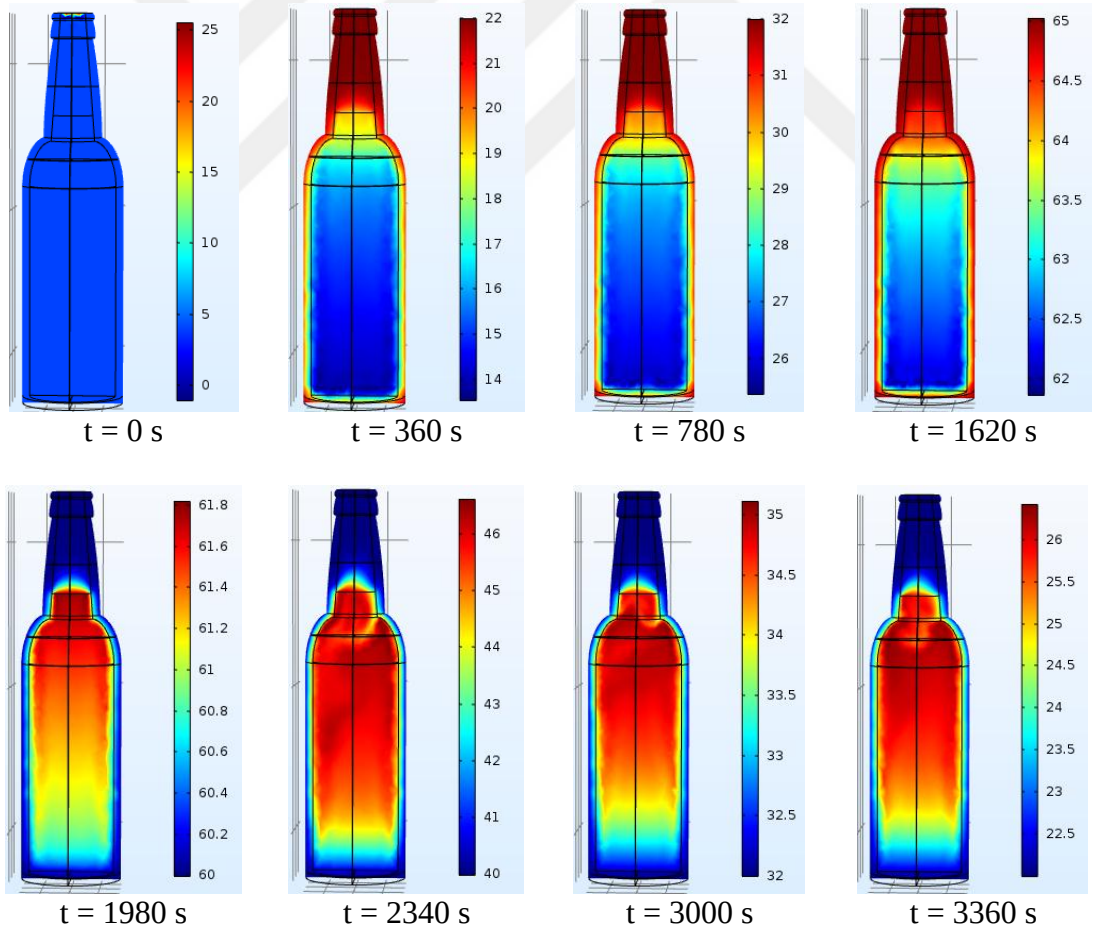


(b)

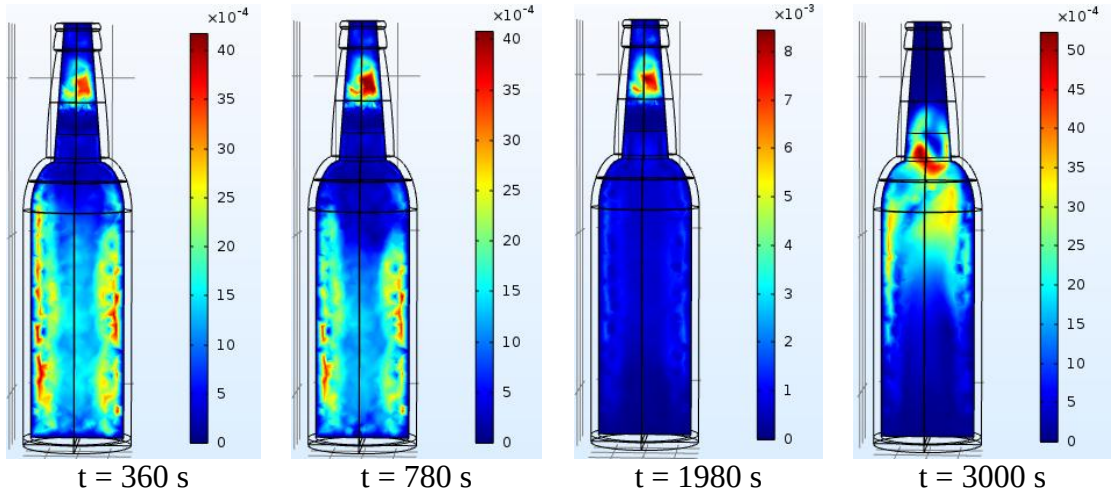
Şekil 4.8 (a) Sabit sıcaklıkta (60 °C) su banyosunda gerçekleştirilen deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması (Bhuvaneswari ve Anandharamakrishnan, 2014) ve (b) Tez kapsamında hazırlanan 3-boyutlu model sonuçları ile literatür verilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.9 7 kademeli tünel pastörizasyon koşullarında hazırlanan 3-boyutlu matematiksel model kullanılarak elde edilen sıcaklık değişimleri



Şekil 4.10 Tünel pastörizasyon proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı (°C)

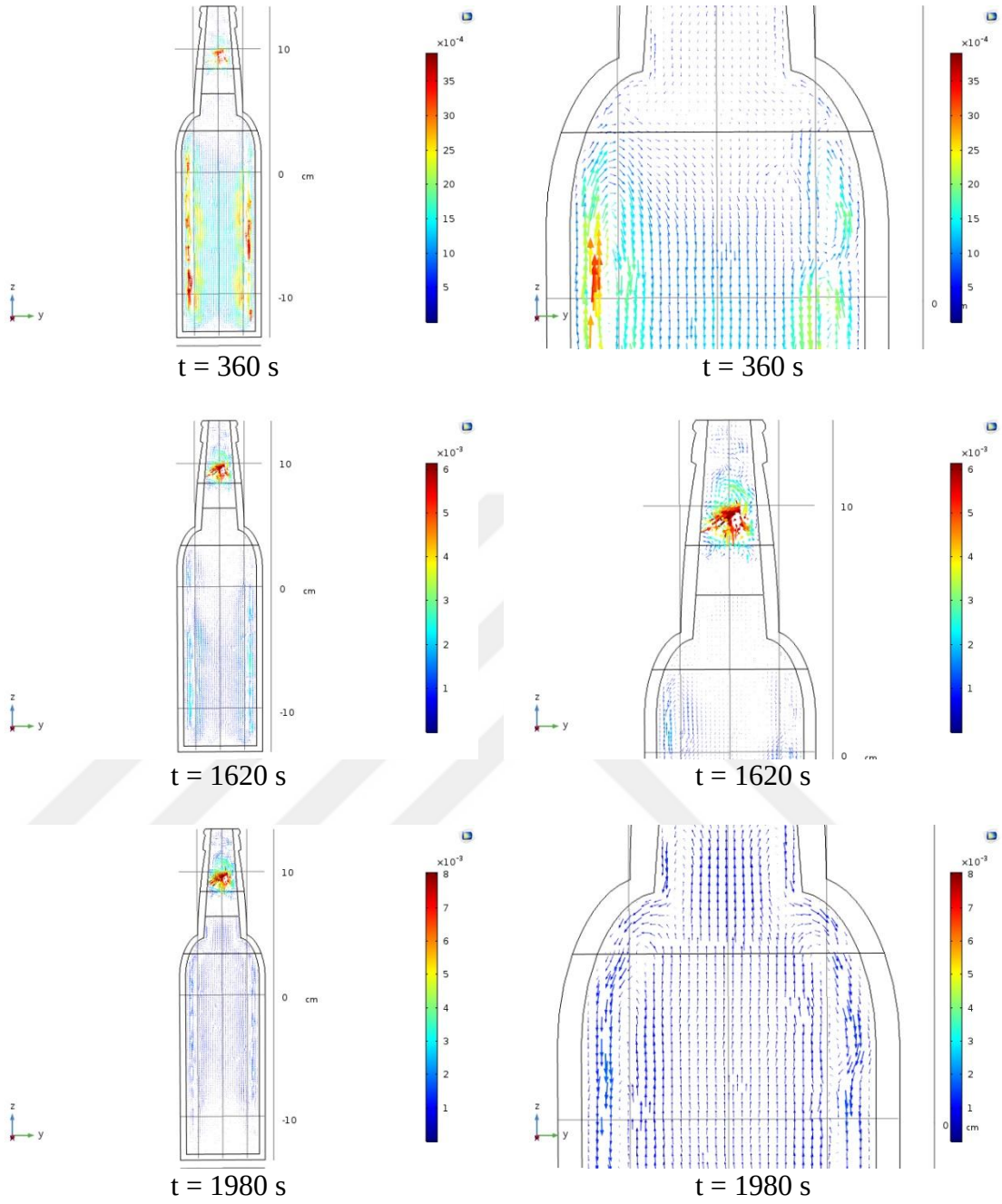


Şekil 4.11 Tünel pastörizasyon proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen akış profili (m/s)

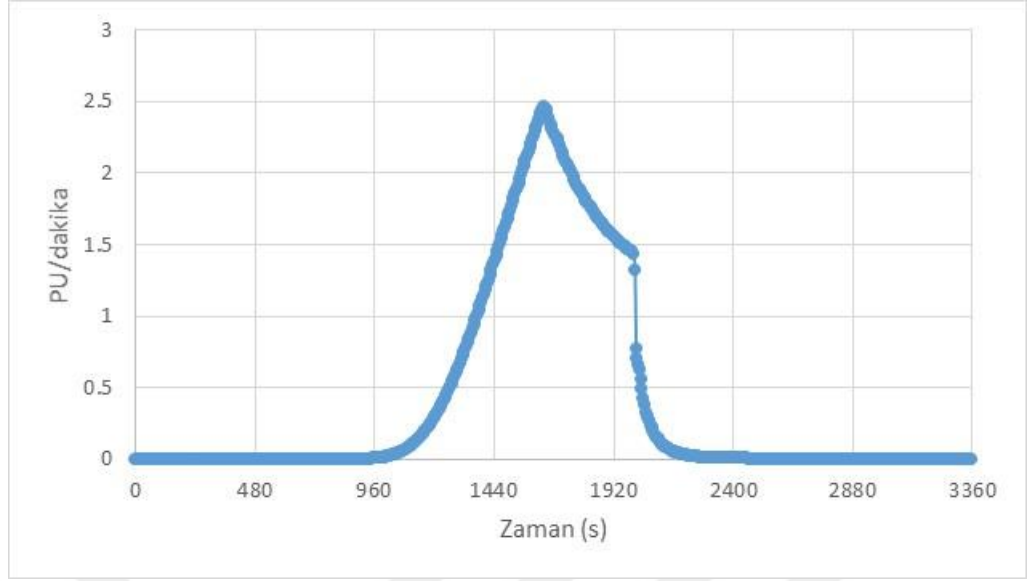
Ürün içerisinde sıcaklık yatışkın duruma yaklaştığında, ürün içerisinde oluşan sıcaklık farkının azalmasına bağlı olarak meydana gelen akış profilinde zayıflamaktadır. Ortam sıcaklığı ile ürün sıcaklığı arasındaki fark arttığında ise sistem içerisinde etkin bir akış profili oluşmaktadır. Ürün içinde oluşan hız profilleri Şekil 4.12’de verilmiştir.

Sistem ısınma evresinde iken akış profilinde oluşan oklar, doğal konveksiyonal ısınmanın etkisiyle yoğunluk azalışına bağlı olarak aşağıdan yukarı doğru şekillenirken, proste soğuma evresine geçiş yapıldığında okların yönü, doğal konveksiyonla soğumaya bağlı olarak meydana gelen yoğunluk artışından dolayı, zıt yöne dönmektedir.

3-boyutlu matematiksel model çalışmasından elde edilen sıcaklık değişimi ve bira pastörizasyonunda hedef mikroorganizma olarak seçilen *Saccharomyces cerevisiae* kinetik verileri (z değeri 6.94 °C ve referans sıcaklık değeri de 60 °C) kullanılarak pastörizasyon birimi (PU) hesaplandığında (eşitlik 3.1) 21.89 PU değeri elde edilmiştir. Böylece hedeflenen PU değerinin bira pastörizasyon prosesinden beklendiği şekilde 15-30 arasına ulaşılabilirdiği gösterilmiştir. PU değerinin hesaplanmasında bira şişesinin tabanından 6.5 cm yukarıda elde edilen sıcaklık verileri (soğuk bölge sıcaklık verisi olarak) kullanılmıştır. PU değerinin proses sürecinde gerçekleşen akümülayonu Şekil 4.13’da gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Tünel pastörizasyon proses sırasında ürün içerisinde meydana gelen akış hareketleri



Şekil 4.13 7-bölgeli tünel pastörizasyon sistemi baz alınarak hazırlanan matematiksel model çalışmasında biranın soğuk bölgesinde elde edilen pastörizasyon biriminin (PU) proses süresince akümüasyonu

4.1.4 Dikey – dönme hareketinin bira pastörizasyonu üzerinde etkisini belirlenmesi için hazırlanan matematiksel modeller ve sonuçları

Gıda proses uygulamalarında gıda güvenliği ve proses gerekliliği açısından uygulanan uzun ısıtma işlem süresi her zaman için üründe meydana gelen duyu ve kalite kayıplarına sebep vermektedir. Aynı şekilde bira pastörizasyon prosesinin de uzun sürmesi hem üründe duyu değişiklikler (tat ve aromada meydana gelen değişimler) hem de önemli bir enerji kullanımına sebep vermektedir. Bu nedenle, tez çalışmasının bu aşamasında deneysel ve literatür verileri ile doğrulanmış matematiksel modellerin kullanılarak bira pastörizasyon prosesine inovatif bir uygulama getirmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda sıvı ve katı – sıvı karışımlardan oluşan konserve ürünlerde yoğun olarak kullanılan dikey dönme – EoE prosesi uygulama yöntemi olarak seçilmiştir. EoE uygulama ile üründe, dışarıdan uygulanan konveksiyonel ısı transferinin yanı sıra, bir karışma sağlanarak hem ısıtma işlem süresi kısaltılabilmekte hem de ürün içerisinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir.

EoE uygulamanın bira pastörizasyon işleminin üzerine olan etkisinin geliştirilen matematiksel model sonuçları ile incelenmesi için önce 2-boyutlu modeller hazırlanarak geometri – bira şişesi içerisindeki sıvı – gaz etkileşiminin doğru bir şekilde çözülebildiği

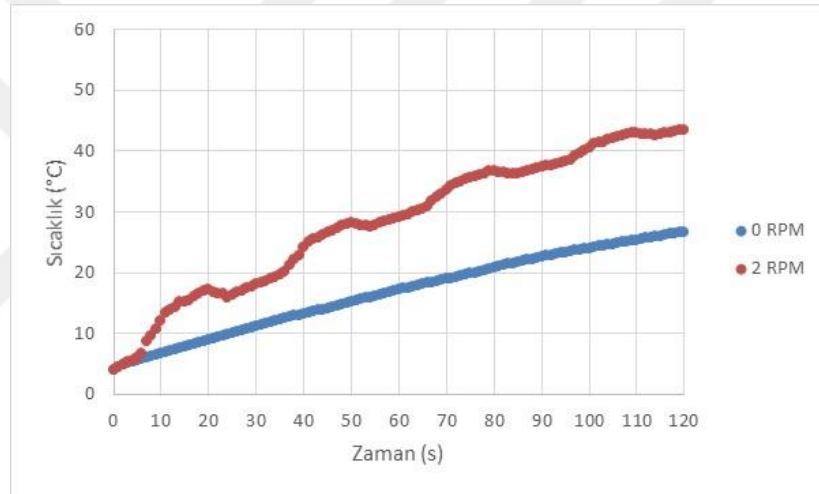
belirlenmiş daha sonra da bira şişesi geometrisi kullanılarak 3-boyutlu modellerin kullanımı gerçekleştirilmiştir.

Matematiksel model uygulamalarda ortam sıcaklığı 60 °C ve konvektif ısı transfer katsayısı 1000 W/m²-K olarak kullanılmıştır. EoE işlem sırasındaki ısı transferi ve dönme hareketini gözlemlemek amacıyla 120 s süren bir model çalışması 2 rpm dönüş hızı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce de açıklandığı şekilde konserve endüstrisinde uygulanan 10 – 20 rpm gibi dönüş hızlarından, bira örneğindeki CO₂ basıncının değişmesine bağlı olarak oluşan köpürme problemi düşünülerek, kaçınılmıştır. Bu modellerde bira şişesi duvar kalınlığı model hesaplama süresi ve ihtiyaç duyulan hesaplama gücü – RAM miktarının yükselmesinden dolayı ihmal edilmiştir.

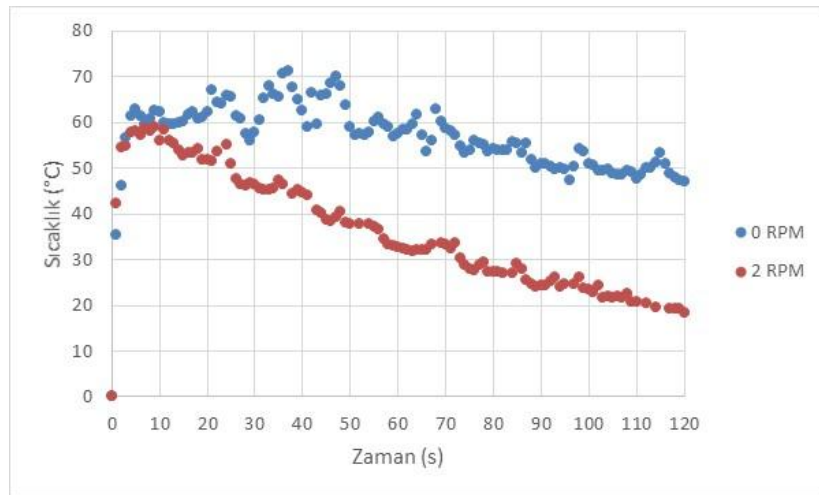
2-boyutlu matematiksel model kullanılarak belirlenen ürün içi ortalama sıcaklık değişimine dönme hızının etkisi Şekil 4.14a’da, ürün içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklık noktaları arasındaki farkın etkisi ise 4.14b’de gösterilmiştir. Bu şekilde de gözlendiği şekilde EoE dönme hareketi sonucu oluşan karışım etkisi ile daha etkin bir ısı transferi olmakta ve ürün içi sıcaklık dağılımı tekdüze olma yönünde bir eğilim göstermektedir. Bu nedenle bira pastörizasyon prosesinde EoE dönme uygulamasının proses süresini kısaltma açısından bir proses yeniliği olabileceği görülmektedir. EoE dönme hareketi sonucu meydana gelen ürün içi karışma ve ortaya çıkan tekdüze sıcaklık dağılımı Şekil 4.15’de hava – su faz hareketi Şekil 4.16’da, ürün içerisinde oluşan hız profili ise 4.17’de verilmiştir. 2-boyutlu matematiksel model çalışmasında uygulanan dikey-dönme hareketinin ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık, faz ve akış profiline olan etkisini incelemek için, aynı sınır koşullarında dikey-dönme hareketi uygulanmadan bir matematiksel model daha çalıştırılmıştır. Dikey-dönme hareketi uygulanmayan matematiksel modele ait ürün içerisindeki sıcaklık profili Şekil 4.18’de, akış profili 4.19’da ve ürün içerisinde oluşan akışın oklar ile gösterimi ise Şekil 4.20’de verilmiştir.

EoE dönme hareketi uygulanmayan matematiksel model kullanılarak elde edilen sıcaklık profili Şekil 4.18’de ve ürün içerisinde oluşan faz profili 4.19’da, ürün içerisinde oluşan hız profili ise 4.20’de verilmiştir.

EoE dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisinin gösterilmesi kapsamında öncelikle 2-boyutlu model kullanılması hem sistem içerisinde oluşacak olan sıvı – hava hareketinin tam olarak belirlenebilmesi hem de kullanılan parametrelerin 3-boyutlu sisteme uygulanması açısından tercih edilmiştir. Ancak, 3-boyutlu tam bira şişesi geometrisi ile hazırlanan modellerde yapılan çalışmalarda sistem içerisindeki sıvı – hava hareketi doğru olarak belirlenememiştir. Farklı çözücü ve ağ yapıları denenerek gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda COMSOL çoklu fizik programının bu amaçla kullanılamayacağına karar verilmiş ve EoE etkisinin gerçek geometrili sistemlerde etkisinin gösterilmesi kapsamındaki çalışmalara ANSYS– Fluent V18 programı kullanılarak devam edilmiştir.

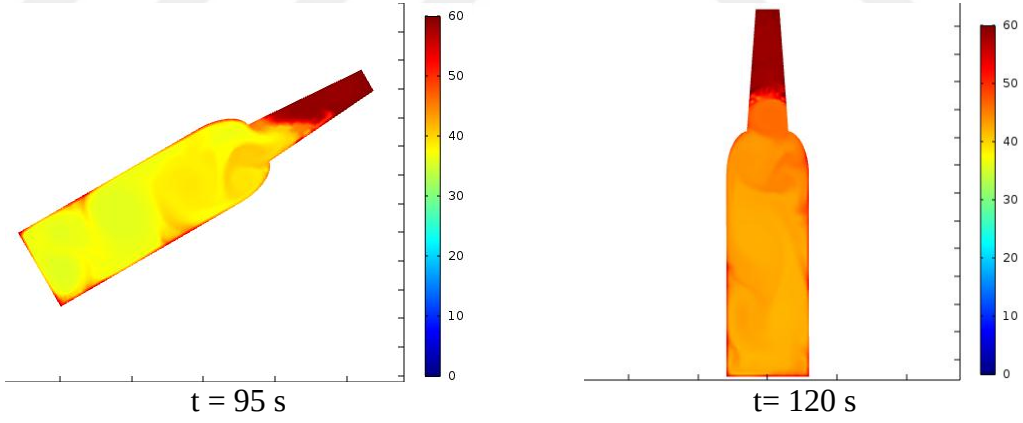
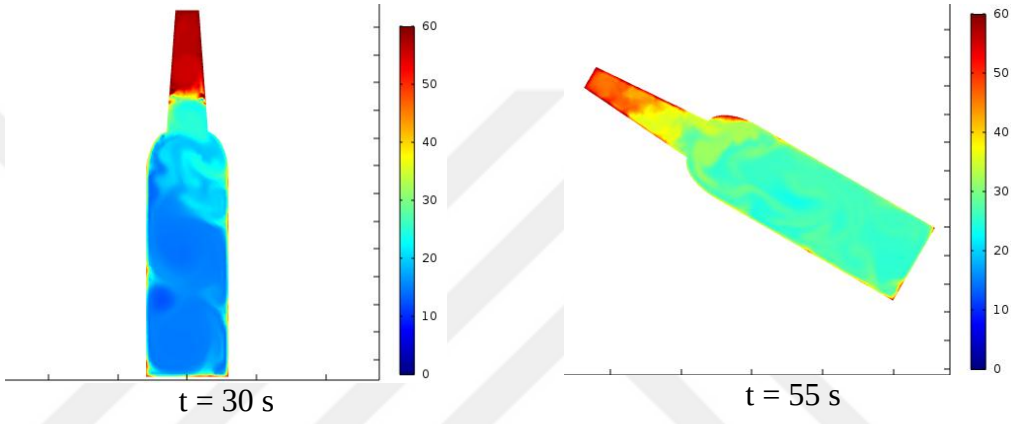
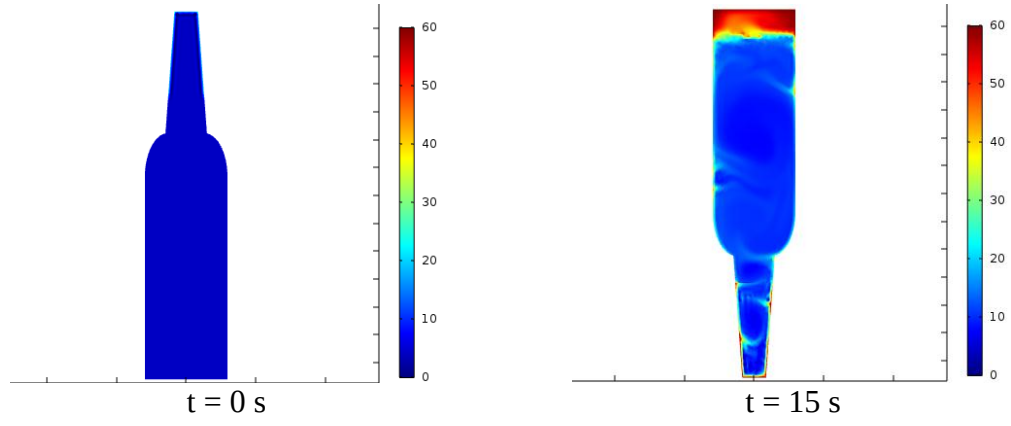


(a)

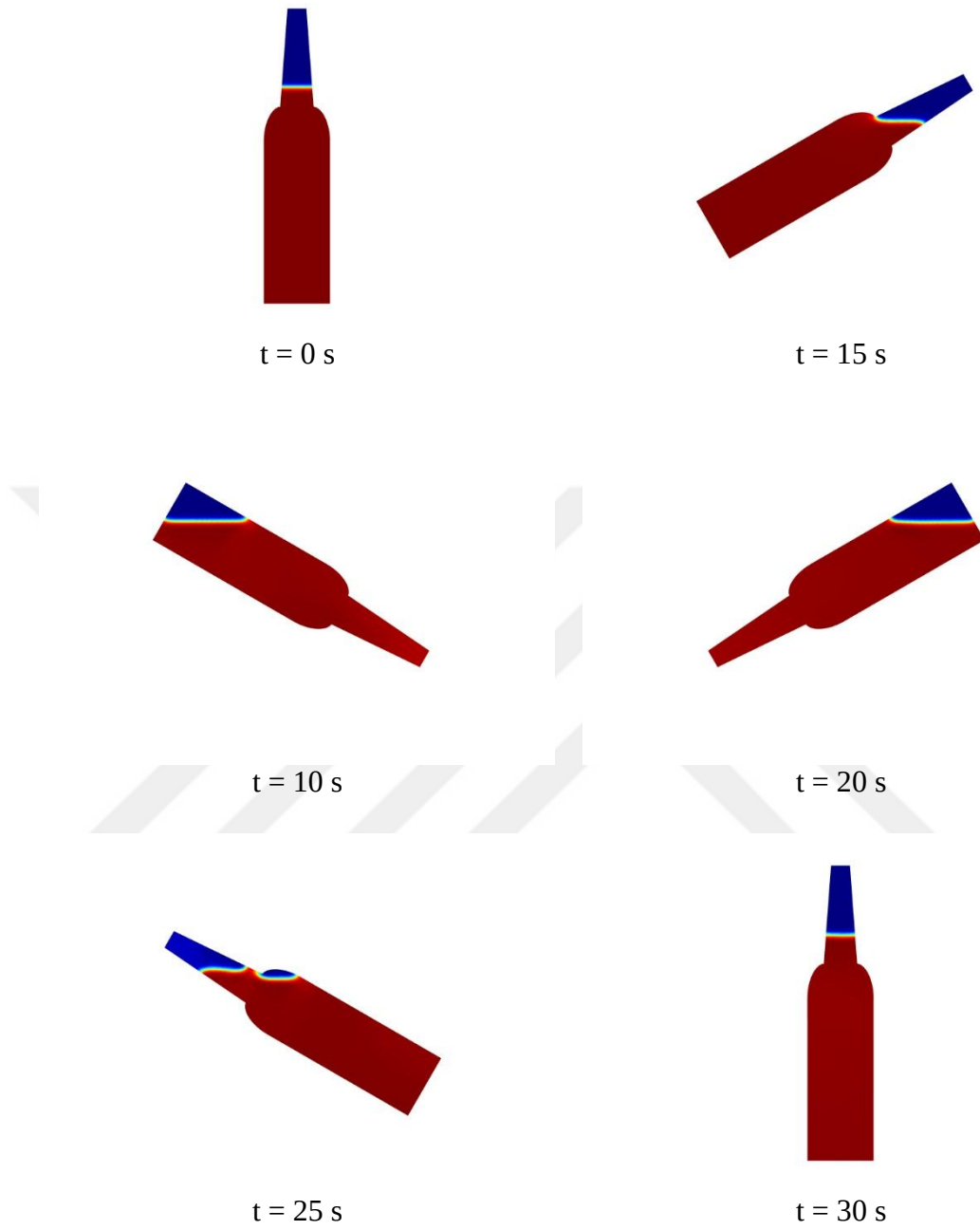


(b)

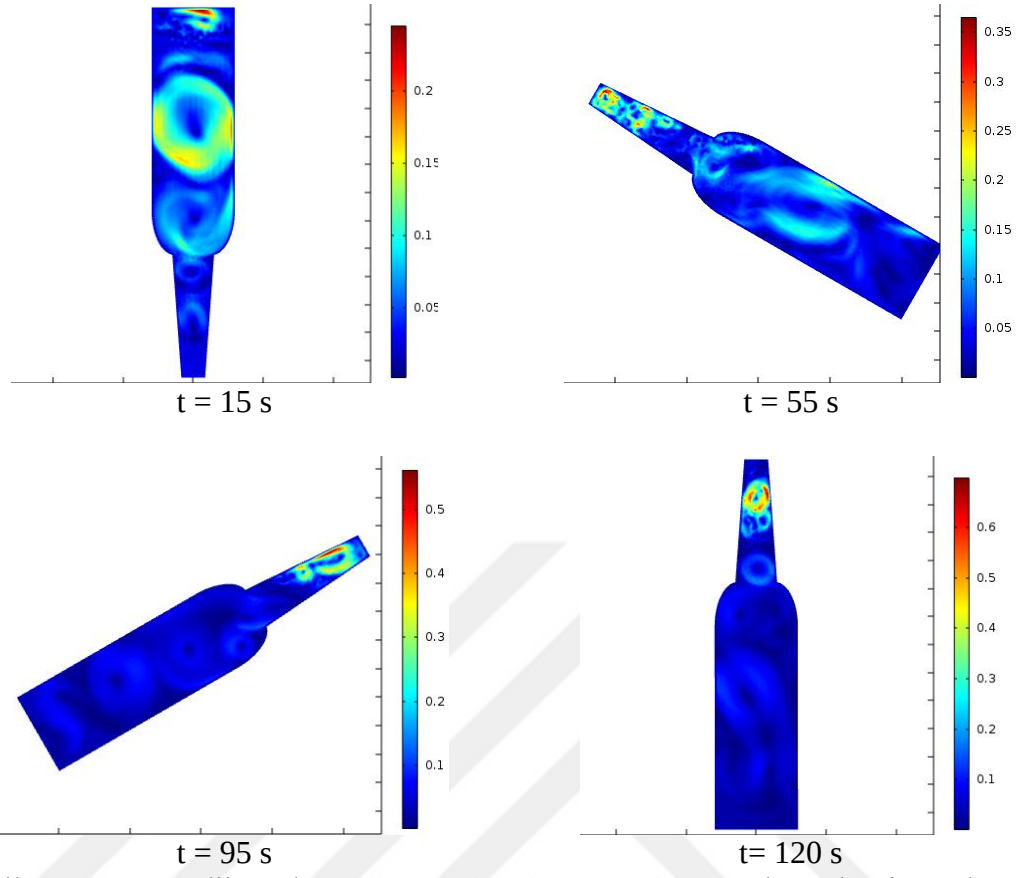
Şekil 4.14 2 rpm dikey dönme (EoE) uygulamasının 2-boyutlu sistemde (a) ürün hacimsel sıcaklık değişimine, (b) ürün içi maksimum ve minimum sıcaklık oluşan noktalar arasındaki sıcaklık farkının değişime etkisi



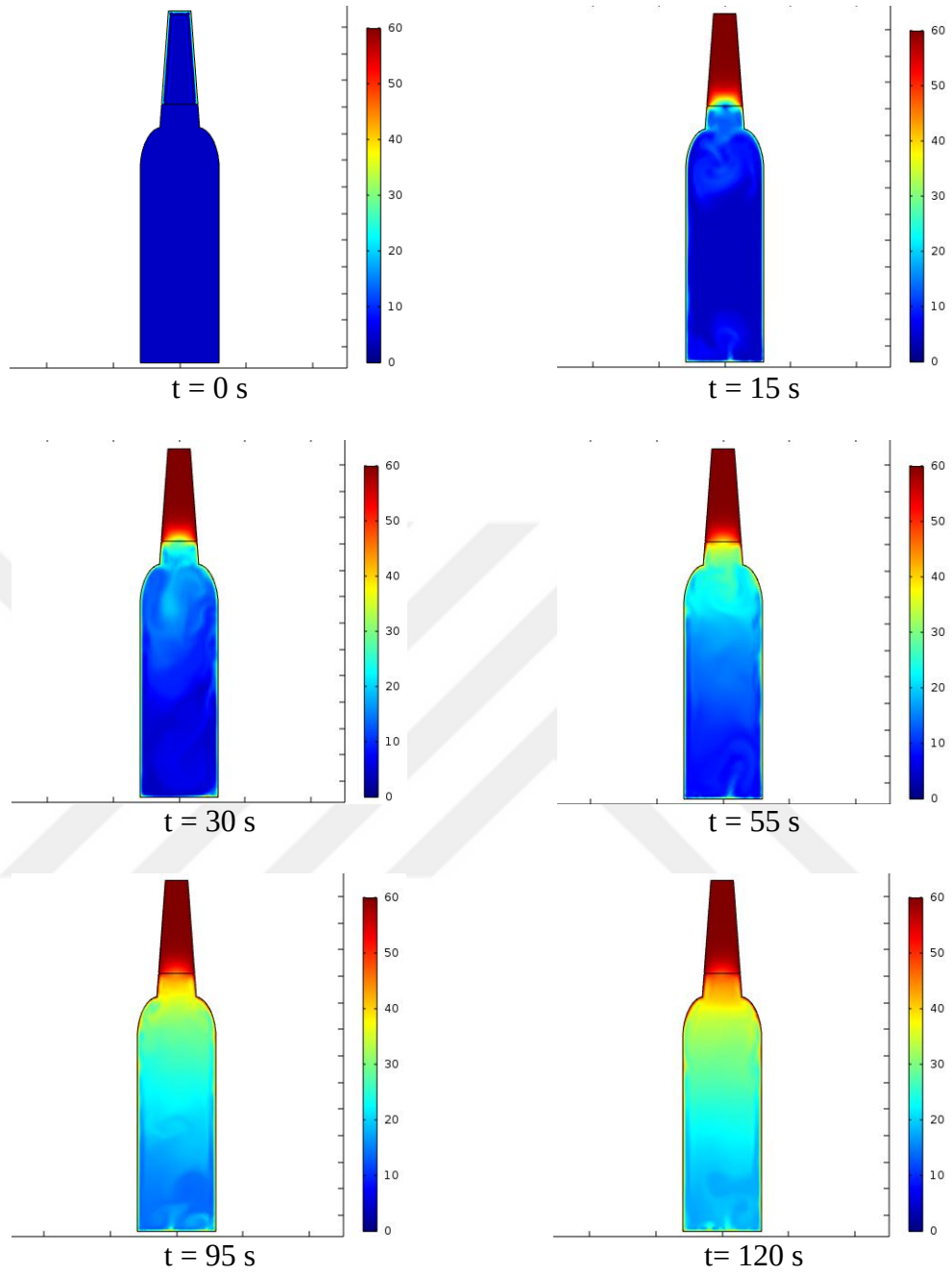
Şekil 4.15 2 rpm dikey dönme (EoE) uygulamasının 2-boyutlu sistemde sıcaklık dağılımına etkisi ($^{\circ}\text{C}$)



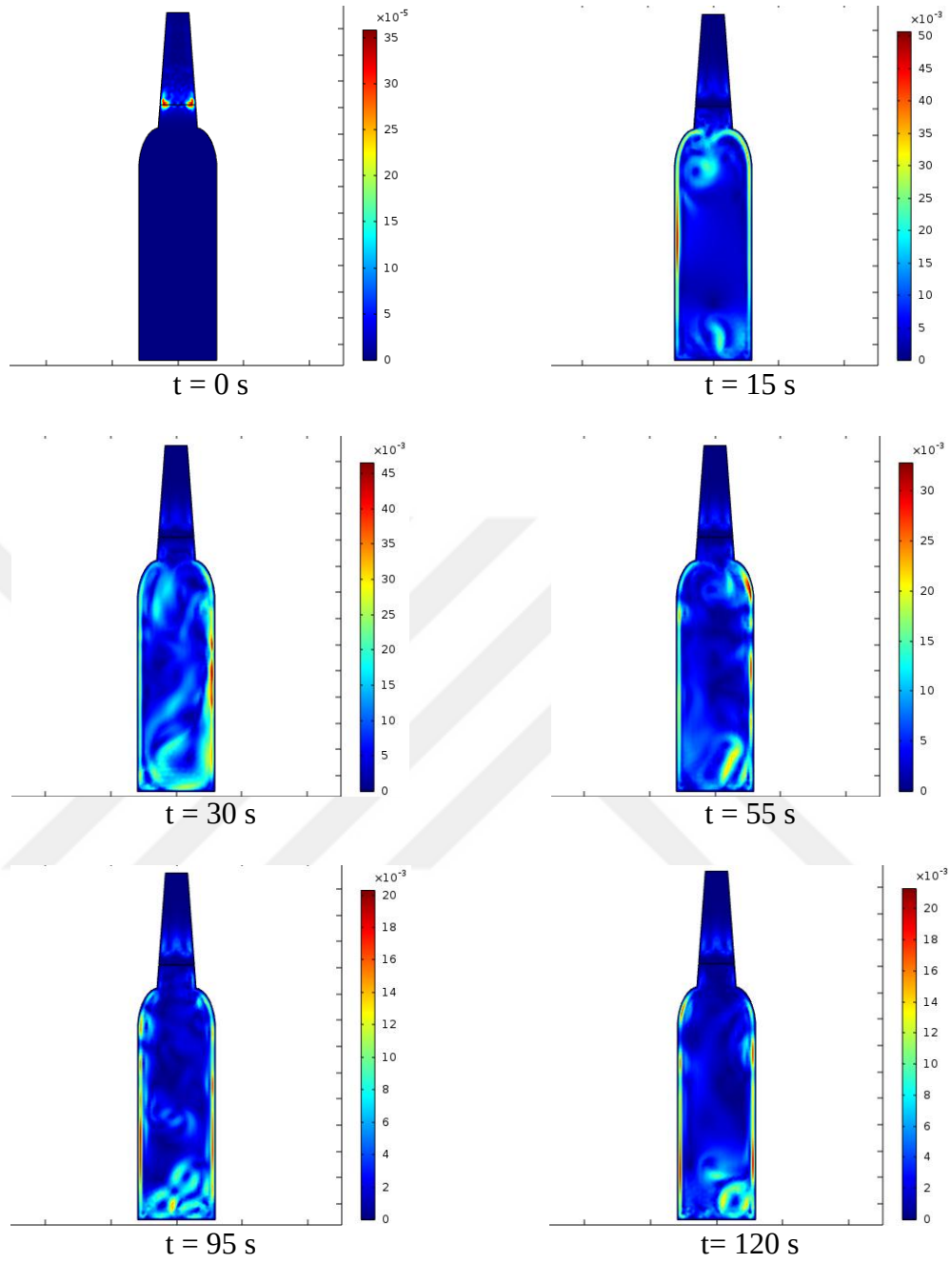
Şekil 4.16 2 rpm dikey dönme (EoE) uygulamasının 2-boyutlu sistemde faz (sıvı – gaz) hareketine etkisi



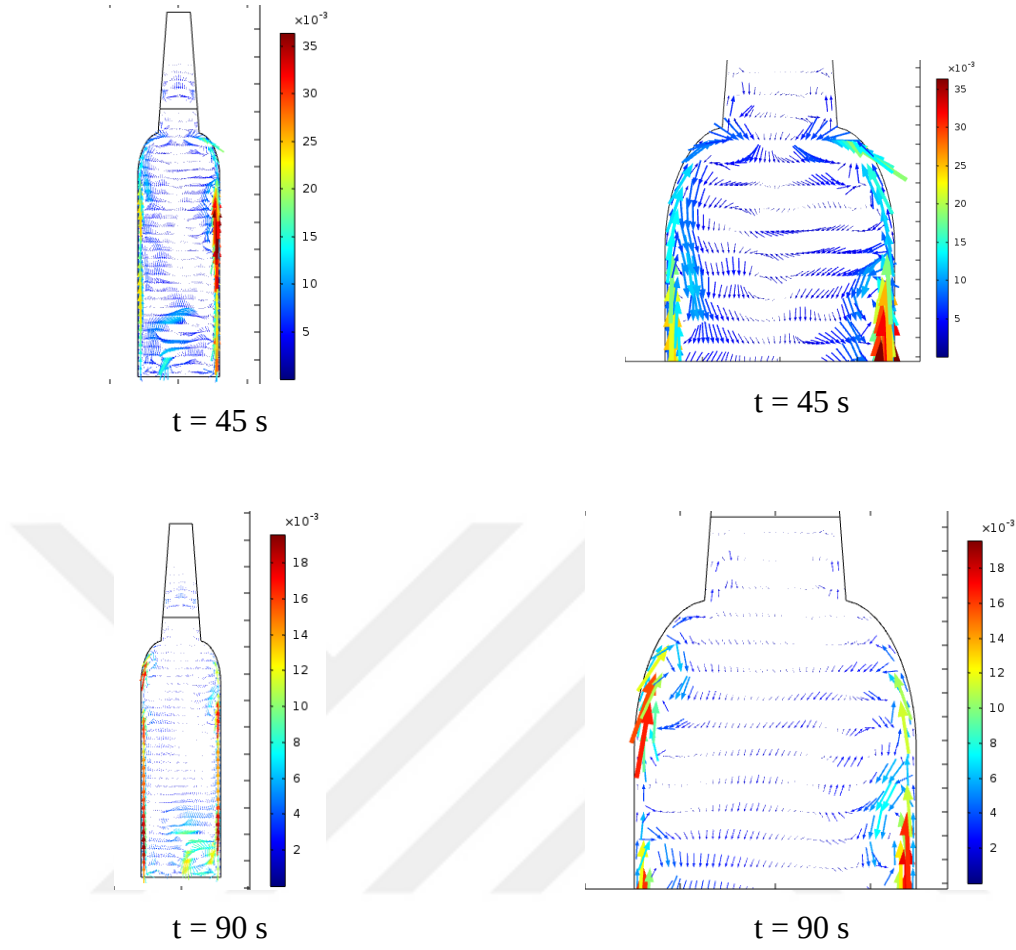
Şekil 4.17 2 rpm dikey dönme (EoE) hareketi uygulanan 2-boyutlu sistemde ürün içerisinde oluşan akış profili (m/s)



Şekil 4.18 2 rpm dikey dönme (EoE) hareketi uygulanmayan 2-boyutlu sistemde ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı (°C)



Şekil 4.19 2 rpm dikey dönme (EoE) hareketi uygulanmayan 2-boyutlu sistemde ürün içerisinde oluşan akış profili (m/s)

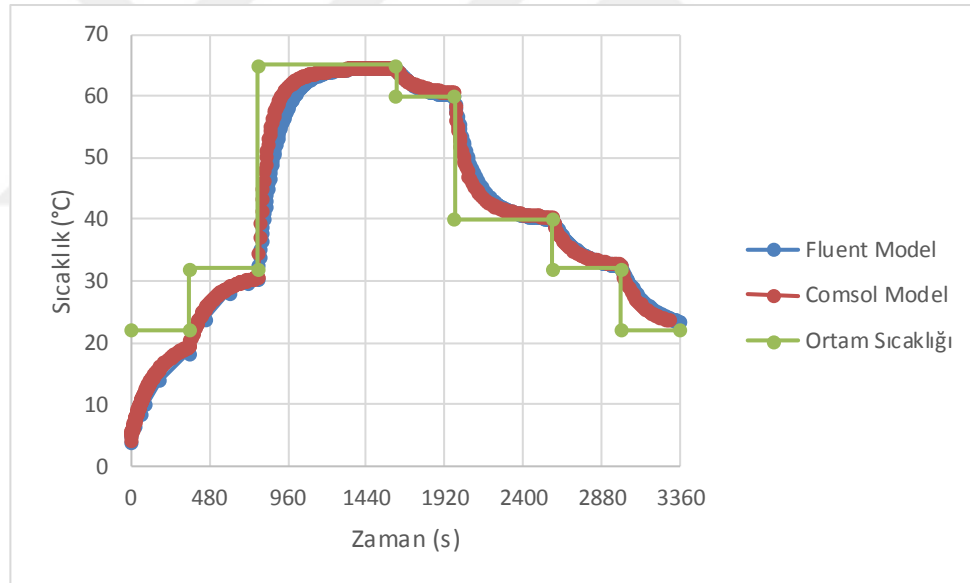


Şekil 4.20 Dikey dönme (EoE) hareketi uygulanmayan 2-boyutlu sistemde farklı sürelerde ürün içerisinde oluşan akış profili (m/s)

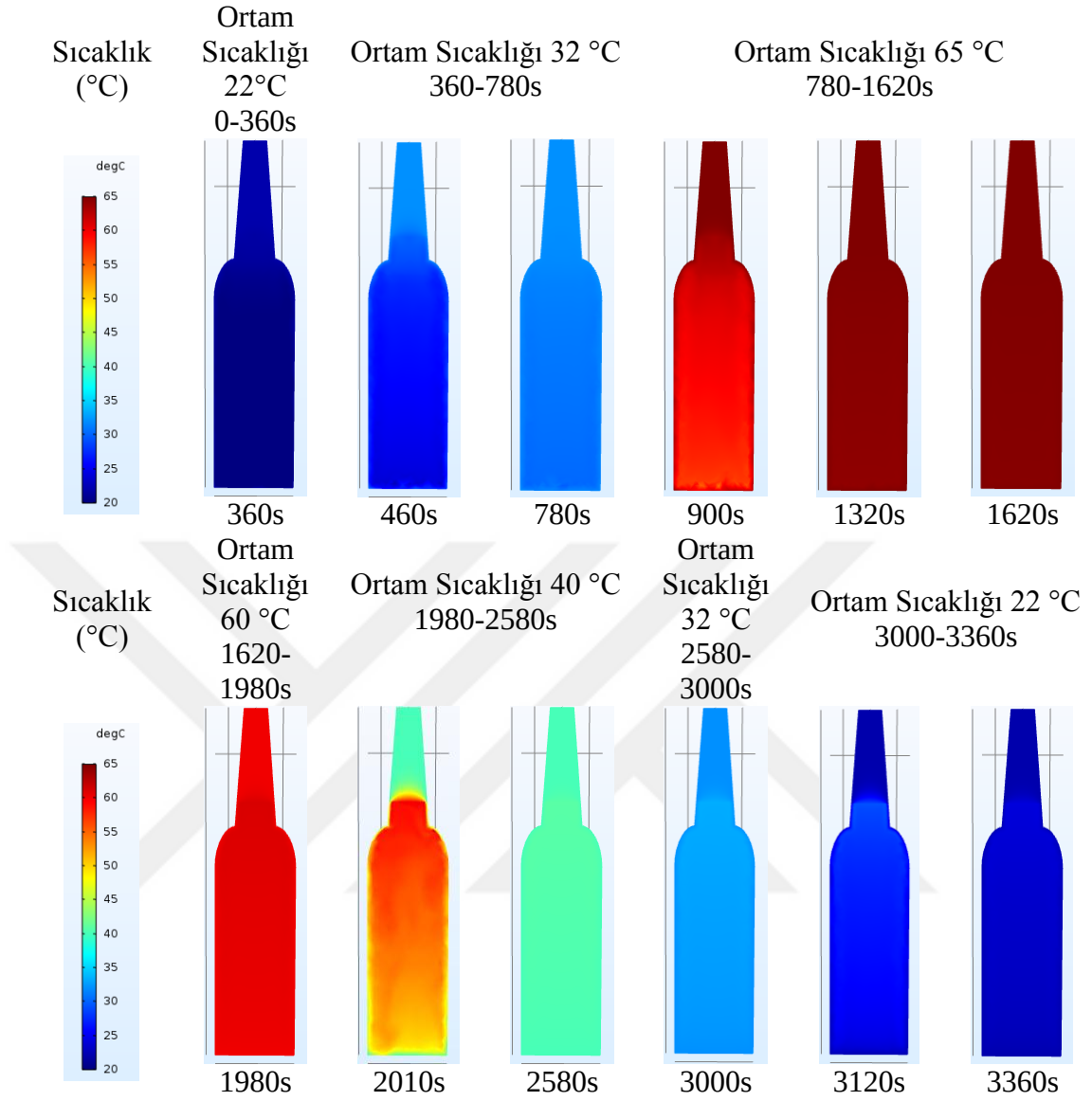
ANSYS – Fluent yazılımı ile EoE etkisinin belirlenmesi kapsamındaki çalışmalara başlamadan önce, Çizelge 3.3’de 7 kademeli tünel pastörizasyon prosesi için verilen ortam ısı transfer katsayısı ve ortam sıcaklığı değerleri kullanılarak 3-boyutlu bir sistemde ürün sıcaklık değişiminin belirlenmesi konusunda Fluent programı kullanılarak bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma, bu aşamadan sonraki dönme etkisi kapsamında yapılacak olan model çalışmalarında kullanılacak olan model çözüm parametrelerine karar vermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. ANSYS – Fluent çalışmalarında da bira şişesi duvar kalınlığı model çalışmalarında kullanılmamıştır. Bu modelden elde edilen ürün içi hacimsel sıcaklık ortalama değişiminin COMSOL yazılımı kullanılarak ve şişe cam kalınlığı ihmal edilerek yapılan model çalışmasından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 4.21’de gösterilmekte olup, elde edilen bu

sıcaklık değişimi üzerinden hesaplanan PU değeri 52.31 dk olarak bulunmuştur. Bu değer, COMSOL yazılımı kullanılarak aynı koşullarda –kullanılan model de ise 57.53 dk olarak hesaplanmıştır. COMSOL Multiphysics programı kullanılarak bira şişesinin duvar kalınlığı ihmal edilen 3 boyutlu model çalışmasında ürün içerisinde sıcaklık profilleri Şekil 4.22 de, ANSYS - Fluent programı kullanılarak bira şişesinin duvar kalınlığı ihmal edilen 3 boyutlu model çalışmasında ürün içerisindeki sıcaklık profilleri ise Şekil 4.23 de gösterilmiştir.

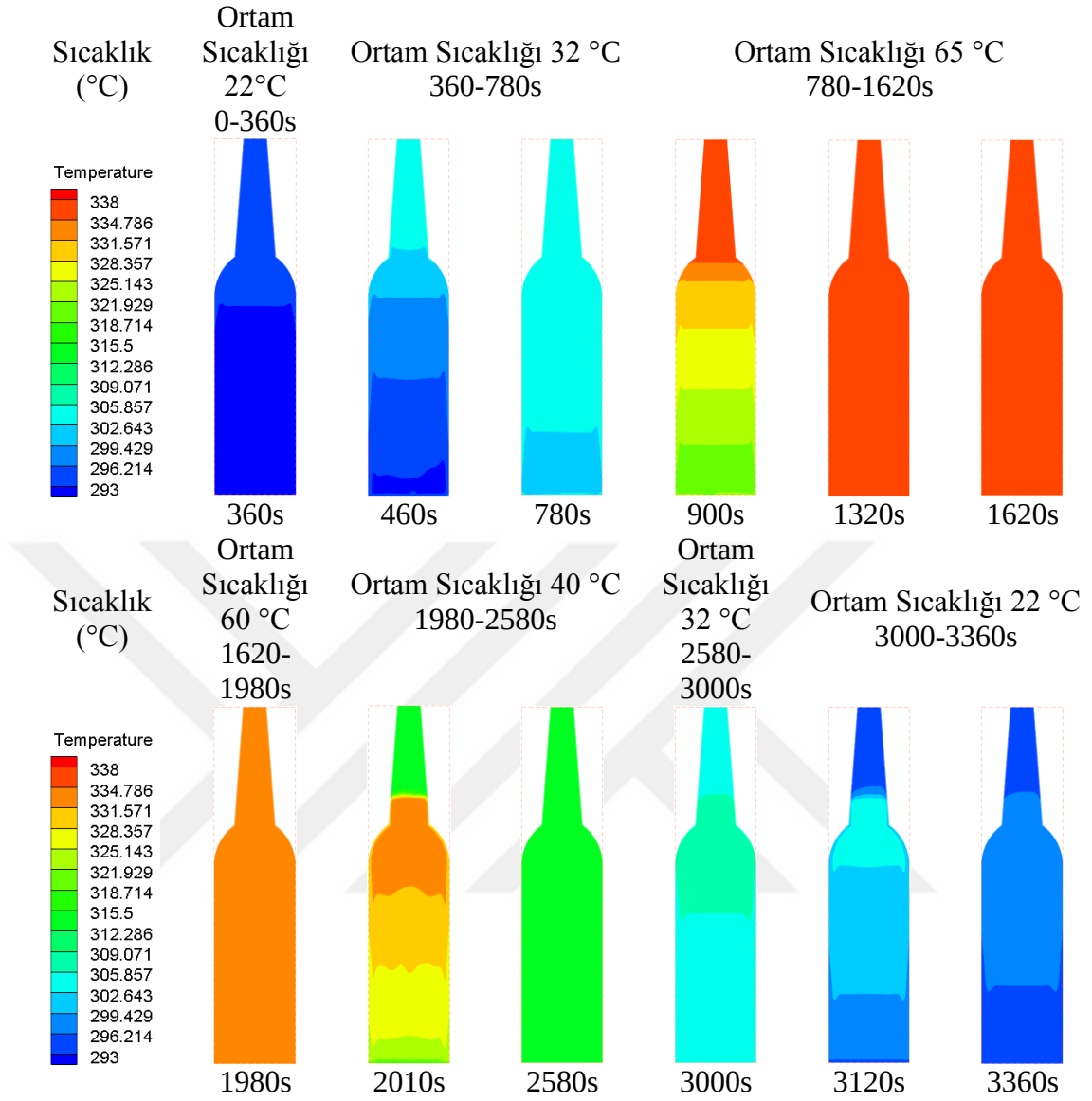
Şekil 4.21’de gösterilen iki model sonuçlarından da anlaşılacağı üzere iki model arasında önemli bir fark bulunmamakta olup PU değerleri arasındaki fark tamamen PU değerindeki akümülayonun logaritmik olarak artmasına bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Bu şekilde doğrulanan Ansys – Fluent modeli, bu aşamadan sonra EoE hareketi etkisinin ürün sıcaklık değişimine etkisini belirlemek amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 4.21 Ansys - Fluent ve COMSOL programı kullanılarak hazırlanan 3-boyutlu modellerden elde edilen ürün hacimsel sıcaklık ortalaması değişiminin karşılaştırılması



Şekil 4.22 COMSOL Multiphysics programı kullanılarak hazırlanan 3 boyutlu modelden elde edilen sonuçlara göre farklı proses sürelerinde ürün içi sıcaklık dağılımının ürün dikey kesitindeki değişimi



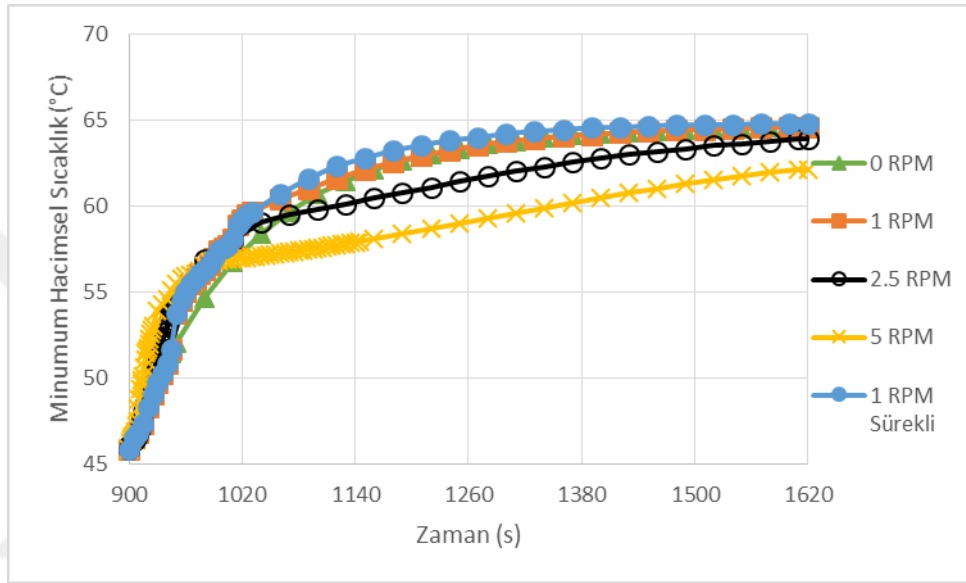
Şekil 4.23 ANSYS Fluent programı kullanılarak hazırlanan 3 boyutlu modelden elde edilen sonuçlara göre farklı proses sürelerinde ürün içi sıcaklık dağılımının ürün dikey kesitindeki değişimi

EoE dönme prosesinin başlangıç noktasını seçebilmek için, 7 aşamalı tünel pastörizasyon prosesi sırasında ürün sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla kullanılan ve 3360 s proses süresi olarak tanımlanan matematiksel model sonuçları incelenmiştir. Buna göre, ürün içi sıcaklık dağılımı ve sıcaklık farklarının önemli bir şekilde değiştiği – arttığı zaman olarak ısıl işlemin başlamasından sonraki 2. dakika (proses süresinin 900. saniyesi) belirlenmiştir. Prosesin 900. saniyesinden itibaren ürüne uygulanacak olan EoE dönme hareketinin ürün içi sıcaklık dağılımını tekdüze edebileceği düşünülerek, farklı dönüş hızlarının 2 tam tur dönme olacak şekilde kullanılması

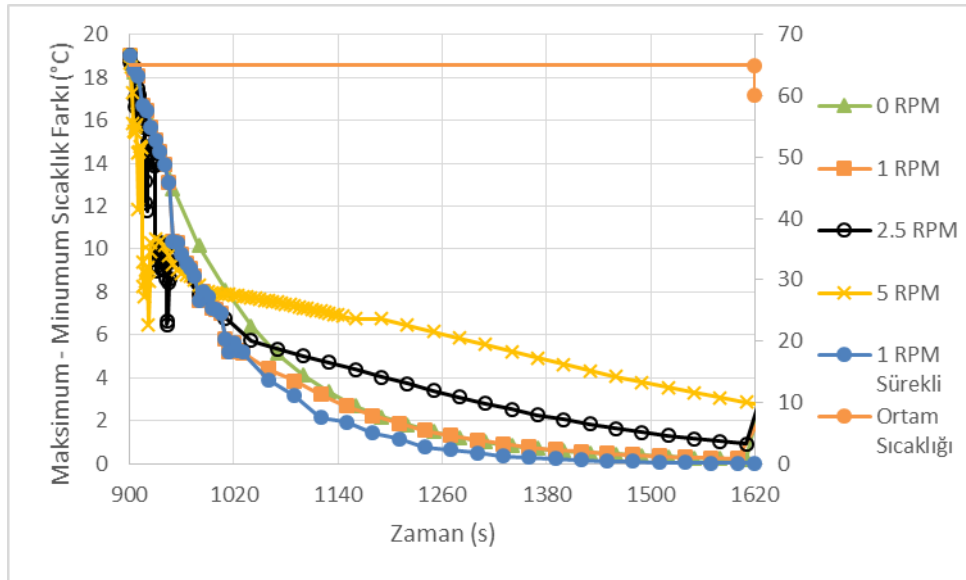
planlanmıştır. Buna göre 3 farklı dönüş hızında (1, 2.5 ve 5 rpm) EoE dönme etkileri incelenmiştir. 2 tur tam dönme için 1 rpm’de 120, 2.5 rpm’de 48 ve 5 rpm’de 24 saniye süren EoE dönme prosesi uygulanmış ve her üç hızda da dönme prosesi tamamlandıktan sonra model çalışmaları 1980 s’ye kadar dönme olmadan devam ettirilerek tamamlanmıştır. Uzun hesaplama sürelerinden dolayı Çizelge 3.3’de gösterilen ön soğutma ve soğutma bölümleri bu model çalışmalarına dahil edilmemiştir. Bu 3 dönme modeli dışında prosesin 900. saniyesinden ısıl işlem bölümünün sonuna kadar 1 rpm EoE dönme hızında devam eden bir model çalışması da ayrıca tamamlanmıştır. Bu modellerden elde edilen sonuçların ürün içerisinde elde edilen minimum sıcaklık açısından karşılaştırılması Şekil 4.24a’da, ürün içerisine elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark açısından karşılaştırılması ise Şekil 4.24b’de gösterilmektedir.

Bu şekilde gözlemlendiği üzere, ısıl işlemin başlamasıyla birlikte uygulanan dönme etkisi dönme hareketinin başlamasıyla birlikte ürün sıcaklık artışına önemli bir etki sağlamıştır. Özellikle 2 tur olarak 48 ve 24 saniye süren 2.5 ve 5 rpm dönme hızları ürün içerisindeki minimum sıcaklık değerini arttırmıştır. Ancak dönme işleminin tamamlanmasıyla, ürün içerisinde dönme sırasında meydana gelen santrifüj kuvvetlerinin etkisine bağlı olarak doğal konveksiyon hareketinin engellenmesinden dolayı, dönme işlemi ile sıcaklık artışının pozitif etkisi kaybolmuştur. Bu durum Şekil 4.24a’da net olarak gözlenmektedir. 120 saniye uygulanan 1 rpm EoE işleminde ise santrifüj kuvvetlerinin sınırlı etkisi nedeniyle 2.5 ve 5 rpm’de gözlenen olumsuz etki oluşmamış ancak yavaş dönmekten dolayı oluşan sınırlı karışmaya da bağlı olarak üründe önemli sıcaklık artışı oluşmamıştır. Aynı durum ısıl işlem düresince sürekli olarak uygulanan 1 rpm dönme etkisinde de gözlenmiştir. Ancak, ürün içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklık bölgeleri arasındaki farkın azaltılmasına yönelik olarak da en iyi etki 1 rpm dönme işlemi ile sağlanmıştır (Şekil 4.24b). Isıl işlem sürecinin başlamasından sonra sürekli uygulanan 1 rpm dönme işlemi ile önemli bir sıcaklık farkı azalması – sıcaklık dağılımında tekdüzelik yakalansa da ısıl işlem sürecinin sonunda doğru 120 s uygulanan 1 rpm dönme işlemi ile sürekli olarak uygulanan dönme işlemi arasındaki fark önemsiz hale gelmiştir. Bu, kısa süre uygulanan 1 rpm dönme işlemi sonunda belli bir karışma sağlandıktan sonra doğal konveksiyonun da sıcaklık dağılımına etkisini göstermektedir.

Isıl işlem sırasında uygulanan ısıtma işlemi sırasında kullanılan dönme hareketinin PU değerine etkisi ise şekil 4.25’de gösterilmektedir. Bu şekilde de net bir şekilde gösterildiği üzere 1 rpm EoE dönme hızı uygulamaları ürün içi PU değerinin artmasına önemli bir etki sağlamıştır. Yine, sistem içerisinde oluşan santrifüj kuvvetlerinin etkisiyle doğal konveksiyon hareketinin özellikle 5 rpm dönme hızında engellenmesinden dolayı en düşük PU artışı 5 rpm prosesinde gözlenmiştir.

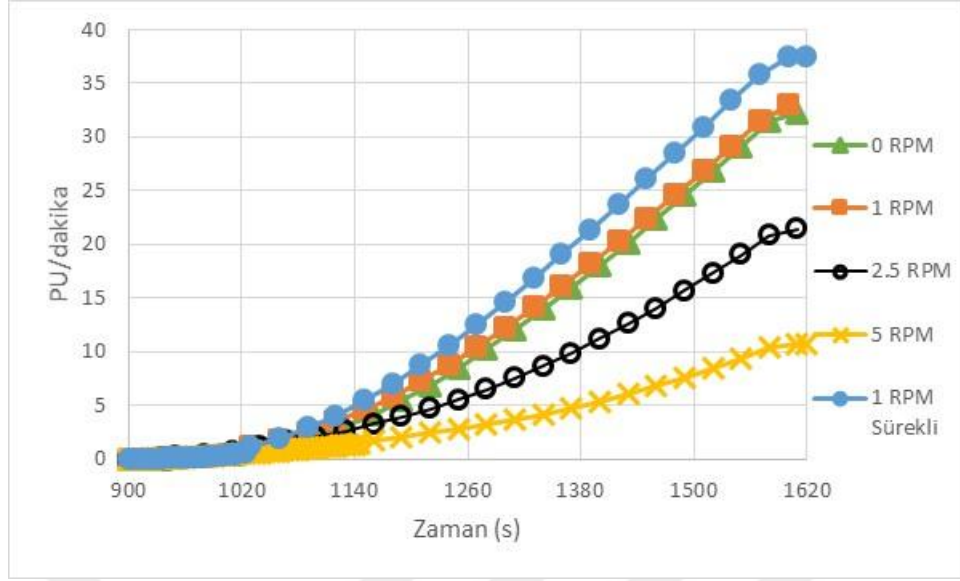


(a)



(b)

Şekil 4.24 Farklı dönme hızlarında dikey dönme (EoE) uygulamasının (a) ürün içi minimum sıcaklık değişimine, (b) ürün içerisine elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki farka etkisi

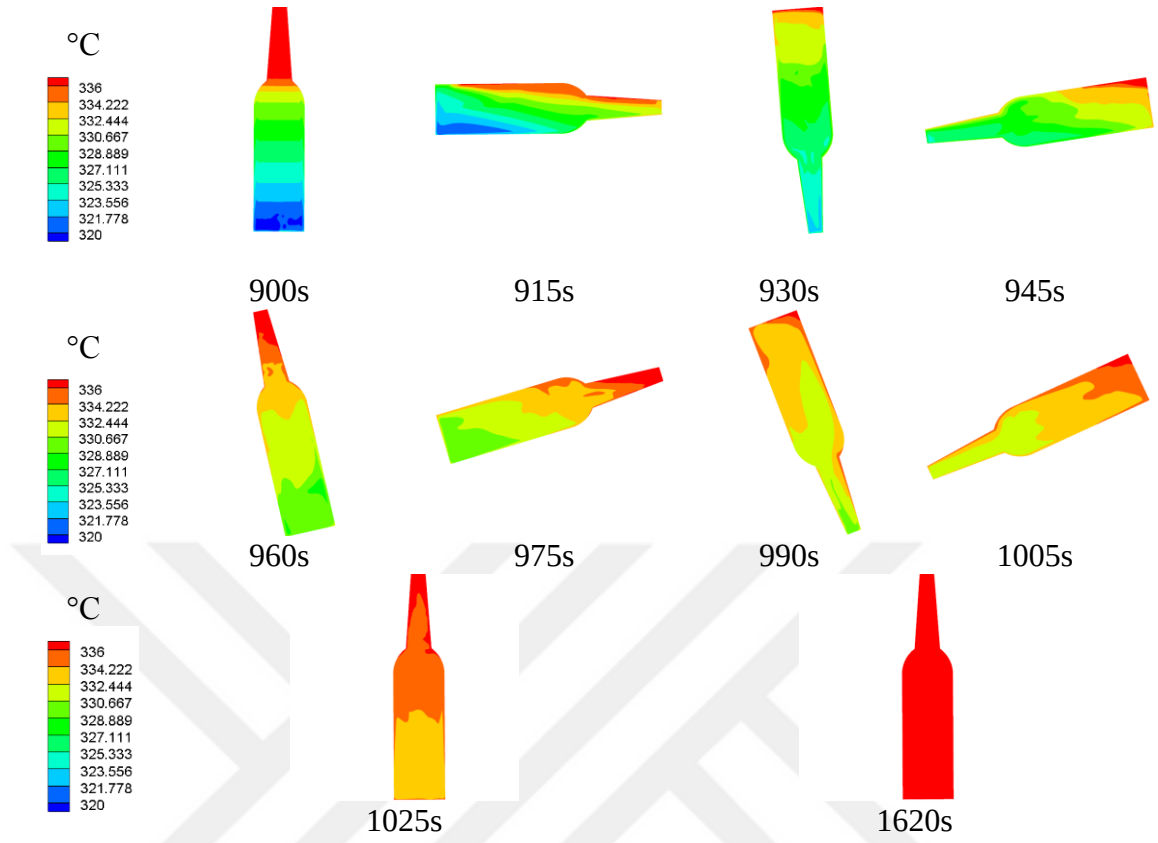


Şekil 4.25 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında uygulanan dikey dönme işleminin pastörizasyon değeri artışına etkisi (hesaplamalar minimum sıcaklık değerleri üzerinden yapılmıştır)

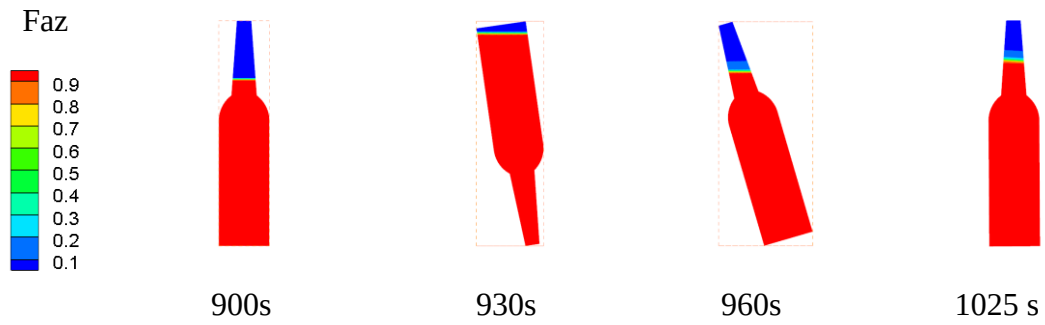
Uygulanan dönme işlemi sırasında ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve faz hareketleri şişe dikey kesitinde Şekil 4.26 – 4.32’de verilmektedir. Burada gözlemlendiği şekilde prosesin tam 900. saniyesinde ön ısıtma işlemi bitip ısıtma – pastörizasyon süreci başlarken ürün içerisinde mükemmel bir doğal konveksiyonla oluşan sıcaklık profili oluşmuştur. Ürün taban kısımlar halen soğuk bölgeyi oluştururken, doğal konveksiyon etkisiyle şişe duvarlarından başlayan ve yukarı doğru oluşan hız profillerine bağlı olarak ürün üst kesimleri de sıcak bölgeyi oluşturmuştur. Aynı zamanda hava bölümünde havanın düşük özgül ısı kapasitesine de bağlı olarak hızlı bir ısınma meydana gelmiştir. Şekil 4.26’da 120 saniye süren 1 rpm dönme işlemi sırasında ürün içerisinde önemli bir karışma sağlandığı ve dönme işlemi devam ederken ürün içerisinde sıcaklığın tekdüze olması anlamından önemli bir etki olduğu görülmektedir. Şekil 4.28’de ise sürekli olarak devam eden 1 rpm dikey dönme işleminde ise ürün içi karışmaya bağlı olarak sıcaklık dağılımının tekdüze olduğu görülmektedir. Bu iki şekilde dönme sırasında doğal konveksiyon etkisinin de devam ettiği de gözlenmektedir. Şekil 4.29 ve 4.31’de ise 2.5 ve 5 rpm dönme hızlarında ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımlarının proses sürecinde değişimi gösterilmektedir. 5 rpm uygulamada ürün içi sıcaklık dağılımı dönme işleminin başlamasından yaklaşık 10-15 saniye sonra tekdüze bir hal almakta ve geri kalan süreçte bu durum devam

etmektedir. Ancak bu süreçte doğal konveksiyonun da etkisini kaybetmeye başladığı gözlenmektedir.

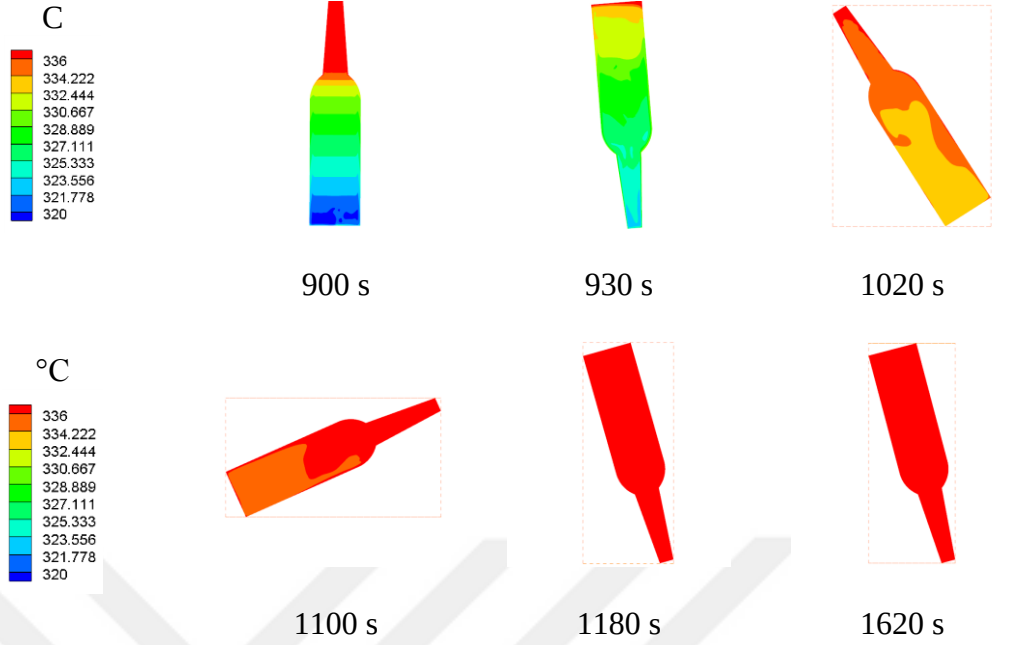
Bira şişesine uygulanan dikey dönme hareketi sonucunda ürün içerisinde oluşan sıcaklık değişimleri ile hesaplanan ve Şekil 4.25 de gösterilen PU/dakika değerleri incelendiğinde, bira pastörizasyonu için önerilen 15-30 PU/dakika aralığında dönme hareketinin proses süresini kısalttığı ve olumlu etkilediği görülmektedir. 15 PU/dakika değeri incelendiğinde, EoE hareketi uygulanmayan bira şişeleri bu değere ≈ 1350 saniyede ulaşırken, 120 saniye boyunca 1 rpm dönüş hızı ile uygulanan EoE hareketinde bira şişeleri bu değere ≈ 1330 saniyede ulaşmıştır. Bira şişelerine sürekli olarak uygulanan 1 rpm EoE hareketinde ise hedeflenen bu değere ulaşması süresi ≈ 1300 saniyedir. Hedef olarak seçilen PU/dakika değeri arttıkça, EoE hareketi ile kazanılan bu süre farkı da artmaktadır. 30 PU/dakika değeri hedeflendiğinde, EoE hareketi uygulanmayan bira şişesi ≈ 1580 saniyeye gereksinim duyarken, 120 saniye boyunca uygulanan 1 rpm EoE hareketi ile bu süre ≈ 1540 saniye olmaktadır ve sürekli olarak uygulanan 1 rpm EoE hareketi ile de ≈ 1500 saniye proses süresi gereklidir. Uygulanan EoE hareketi ile daha hızlı bir bira pastörizasyonu sağlanmakta olup, düşük hızlarda uygulanan EoE hareketi ile birlikte ürün içerisinde daha tekdüze bir sıcaklık karışımı elde edilmektedir. Bu kapsamda belirtilen 80 s'lik süre, tünel pastörizasyon işleminde ısıtma bölümünün 840 s sürdüğü gözönüne alınırsa, proses süresinde $\approx 10\%$ azalmaya karşılık gelmektedir. 1 rpm yerine 2.5 ya da 5 rpm EoE dönme hareketi uygulanması durumunda ise bu tasarrufun çok daha yüksek olacağı açıktır. Bu kapsamda bira aroma ve duyu parametrelerinin ısıtma işlemiyle azalmasına dair kinetik parametrelerin kullanılması ile bir proses optimizasyon çalışmasının yapılması da ayrıca planlanmaktadır.



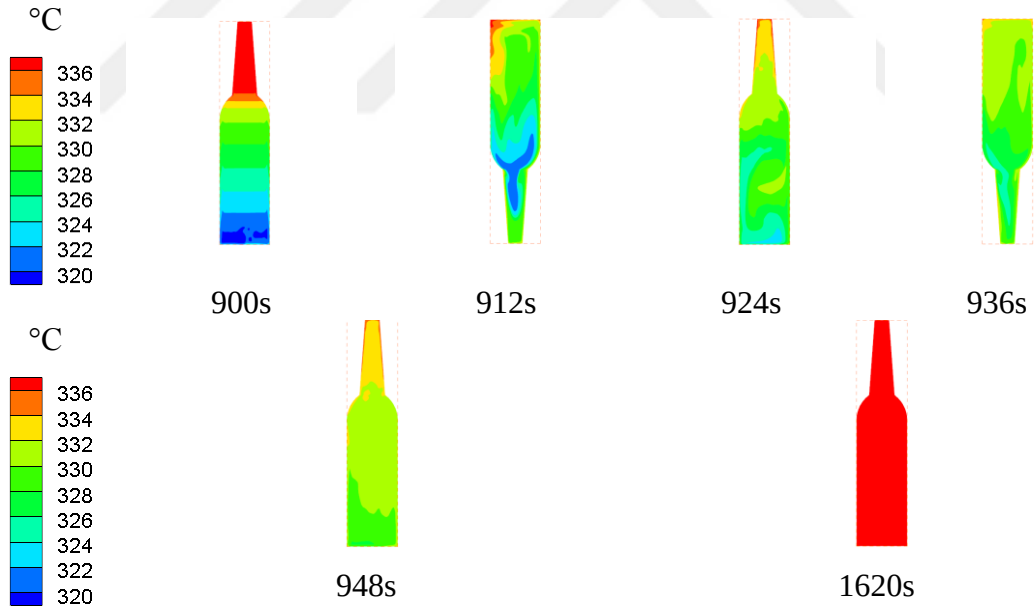
Şekil 4.26 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 120 saniye uygulanan 1 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi



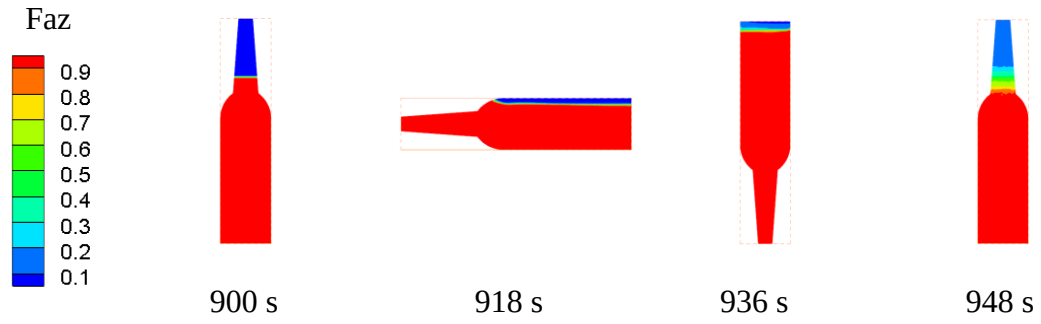
Şekil 4.27 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 120 saniye uygulanan 1 rpm dikey dönme işlemi sırasında ürün içi faz hareketi



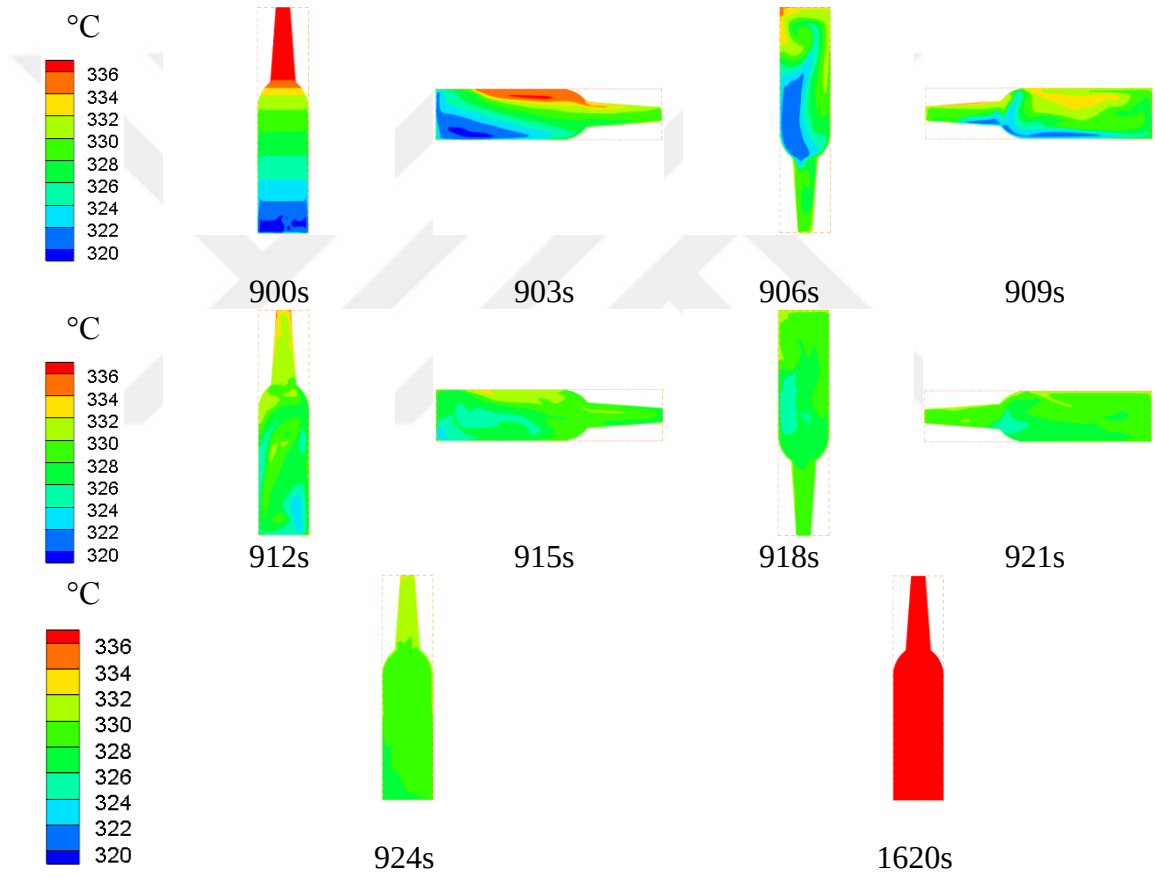
Şekil 4.28 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında sürekli uygulanan 1 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi



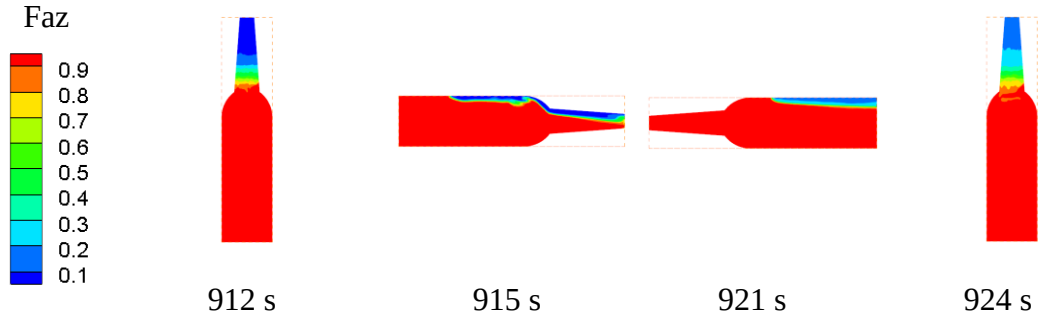
Şekil 4.29 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 48 saniye uygulanan 2.5 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi



Şekil 4.30 Şekil 4.18 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 48 saniye uygulanan 2.5 rpm dikey dönme işlemi sırasında ürün içi faz hareketi



Şekil 4.31 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 24 saniye uygulanan 5 rpm dikey dönme işleminin ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi



Şekil 4.32 Isıl işlem sırasında 900-1620 saniyeler arasında 24 saniye uygulanan 5 rpm dikey dönme işlemi sırasında ürün içi faz hareketi

4.2 İnovatif – Mikrodalga Prosesi İçin Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

Konvansiyonal pastörizasyon prosesi sırasında sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla geliştirilen model çalışmalarında da görüldüğü üzere pastörizasyon prosesi ön ısıtma (2 kademe) – ısıl işlem ve soğutma (2 kademe) aşamalarından oluşan ve toplam süre olarak 1 saate yakın süren bir işlemdir. Genel olarak tünel pastörizasyon sistemlerinde farklı bölmelerde şişelenmiş ürüne farklı sıcaklık uygulamaları yapılarak gerçekleştirilmektedir. Uzun süren bu işlem sırasında üründe kaçınılmaz olarak tat – aroma değişiklikleri de meydana gelmektedir. Oluşan bu olumsuz duyuşal özelliklerden dolayı da son yıllarda pastörsüz bira olarak adlandırılan ve pastörizasyon işlemi uygulanmamış ürünler farklı bir yaklaşımla tüketiciye sunulmuştur.

Dielektrik ısıtma olarak da adlandırılan mikrodalga ve radyofrekans işlemleri üründe, ürünün dielektrik özelliklerine de bağlı olarak, hacimsel ısıtma sağlayabildiğinden hızlı ısıtma sistemleri olarak endüstriyel proseslerde kabul görebilecek sistemlerdir. Bu kapsamda, bira pastörizasyon prosesine farklı bir inovatif yaklaşım geliştirmek üzere bu tez kapsamında mikrodalga uygulama çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle pastörsüz bira örnekleri kullanılarak biranın sıcaklığın bir fonksiyonu olarak dielektrik özellikleri ölçülmüş, litertürden elde edilen ısısal – fiziksel değerler kullanılarak matematiksel model çalışmaları yapılmış, bu modeller deneysel koşullarda doğrulanmış ve doğrulanmış modeller kullanılarak ürün sıcaklığının proses sırasında tekdüze edilebilmesi için proses çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel model doğrulama çalışmalarında Şekil 3.6 ve 3.11’de resim ve model geometrisi gösterilen, deneysel çalışmalar için modifiye edilmiş laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistem kullanılmıştır. Üründe aşırı ısınma ve lokal ısınmaya bağlı olarak kaynama problemini

önlemek için 350 W güç ayarı (bu ayar kullanıldığında sistem içerisinde 223.08 W güç elde edilebildiği ayrıca deneysel çalışmalarla hesaplanmıştır) deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Daha düşük güç ayarlarında ısınma süresi uzamış daha yüksek ayarlarda ise üründe şiddetli köpürme ve kaynama gözlenmiştir.

4.2.1 Pastörsüz bira örneklerinin dielektrik özellikleri

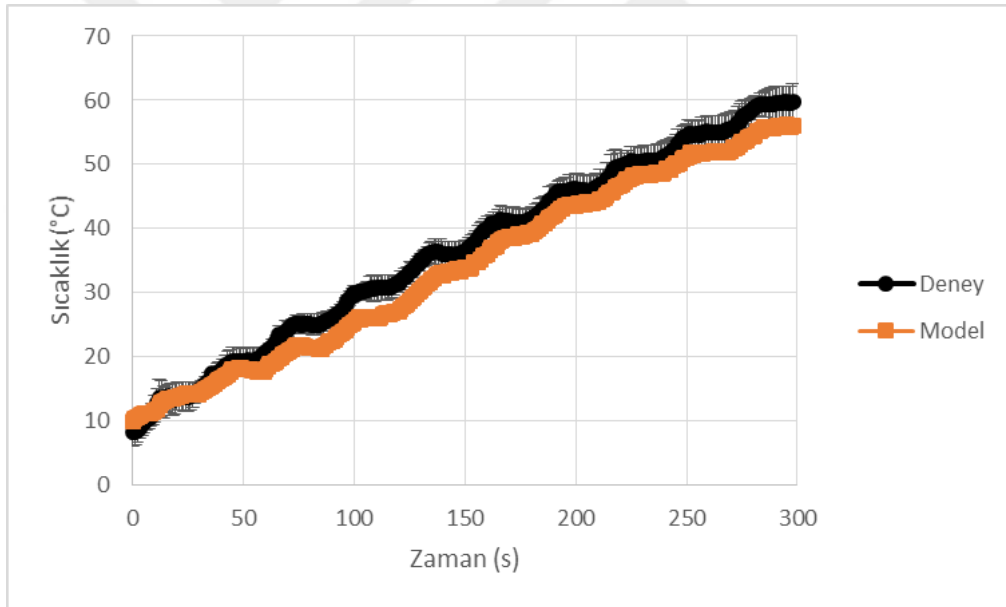
Matematiksel model çalışmalarında kullanılan biranın ısısal ve fiziksel (ısı iletkenlik katsayısı, özgül ısı kapasitesi, yoğunluk ve viskozite) özellikler için literatür değerleri kullanılmış (Çizelge 3.2), dielektrik özellikler (dielektrik sabiti - ϵ' ve dielektrik kayıp faktörü - ϵ'') ise, belirtildiği üzere, deneysel olarak sıcaklığın fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.1 2450 ve 915 MHz dielektrik özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.1 Bira örneklerinin 915 ve 2450 MHz frekansta sıcaklığa bağlı olarak ölçülen dielektrik özellikleri

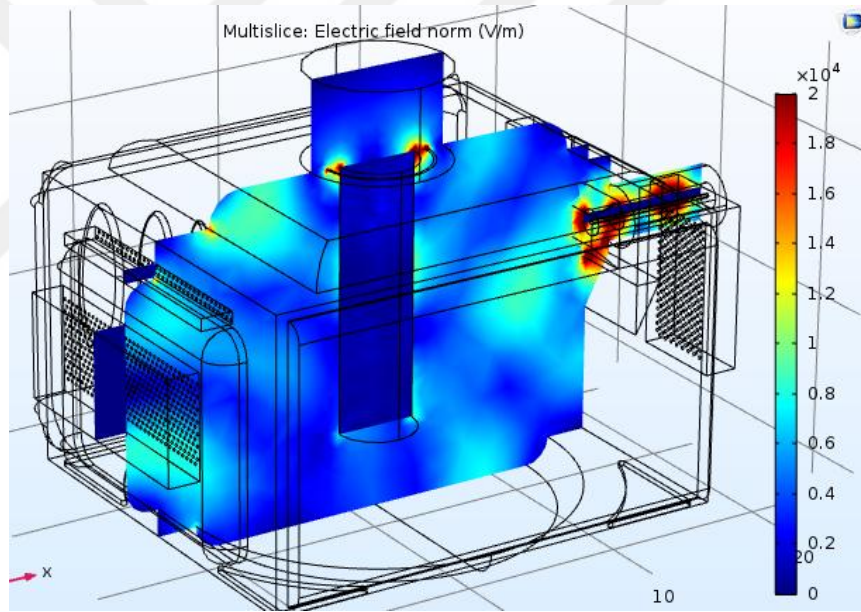
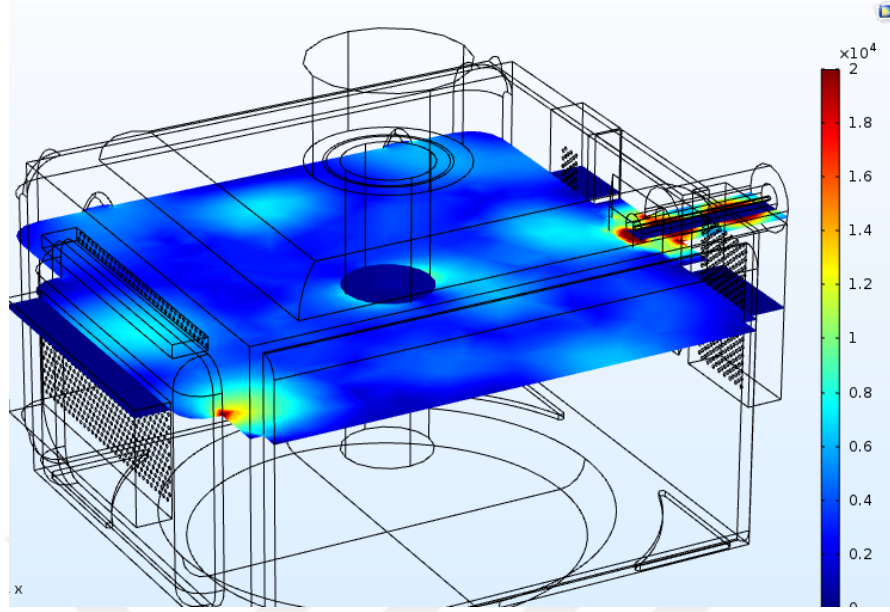
Frekans (MHz)	Sıcaklık (°C)	Dielektrik Sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')
915	4.2	88.77 ± 2.25	11.72 ± 0.59
	25.4	68.63 ± 0.79	7.46 ± 0.09
	40.3	42.75 ± 3.77	4.38 ± 0.39
	60	63.66 ± 0.94	7.46 ± 0.84
	75	58.88 ± 0.81	8.86 ± 0.36
2450	4.2	81.79 ± 1.91	22.04 ± 1.04
	25.4	66.18 ± 0.06	11.49 ± 0.42
	40.3	40.02 ± 4.47	4.64 ± 0.81
	60	62.63 ± 1.50	6.96 ± 0.41
	75	58.64 ± 0.93	6.37 ± 0.03

4.2.2 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar ve matematiksel model çalışmaları

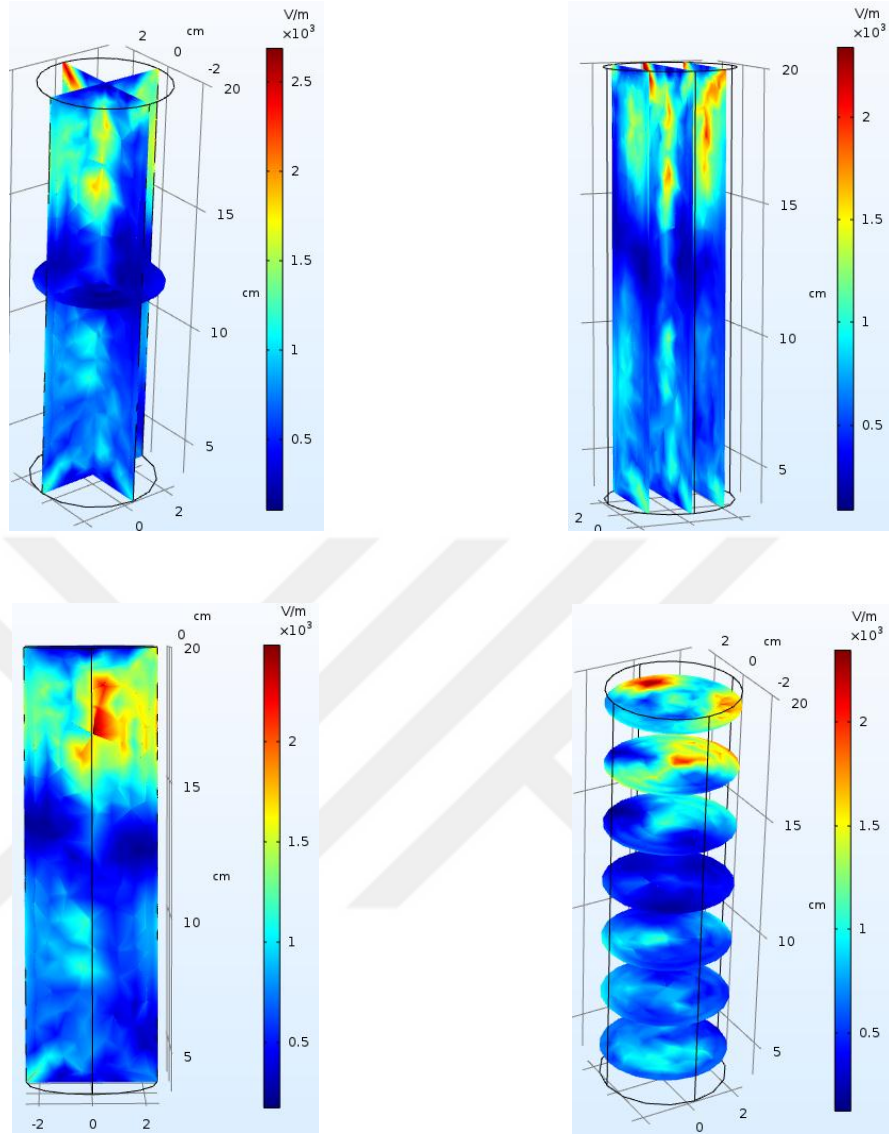
Materyal ve yöntem bölümünde detaylı olarak bahsedilen deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen deney sonuçları matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu aşamada, magnetrondan elde edilen çalışma döngülerinin (Şekil 3.21) benzer olması amacıyla farklı günlerde (magnetronda ısınma etkisi olmadan kullanma amacıyla), benzer koşullarda gerçekleştirilen 3 deneyin ortalama $\pm$ standart sapma değerlerinin model sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.33’de gösterilmektedir. Bu şekilde de gözleneceği üzere matematiksel model sonuçları deney verileri ile uyumludur. Sistem içerisinde gerçekleşen elektrik alan dağılımı sistemin farklı kesitlerinde Şekil 4.34’de ürün içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı ise ürünün farklı kesitlerinde ve farklı sürelerde Şekil 4.35’de verilmiştir.



Şekil 4.33 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde elde edilen deney sonuçları ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması



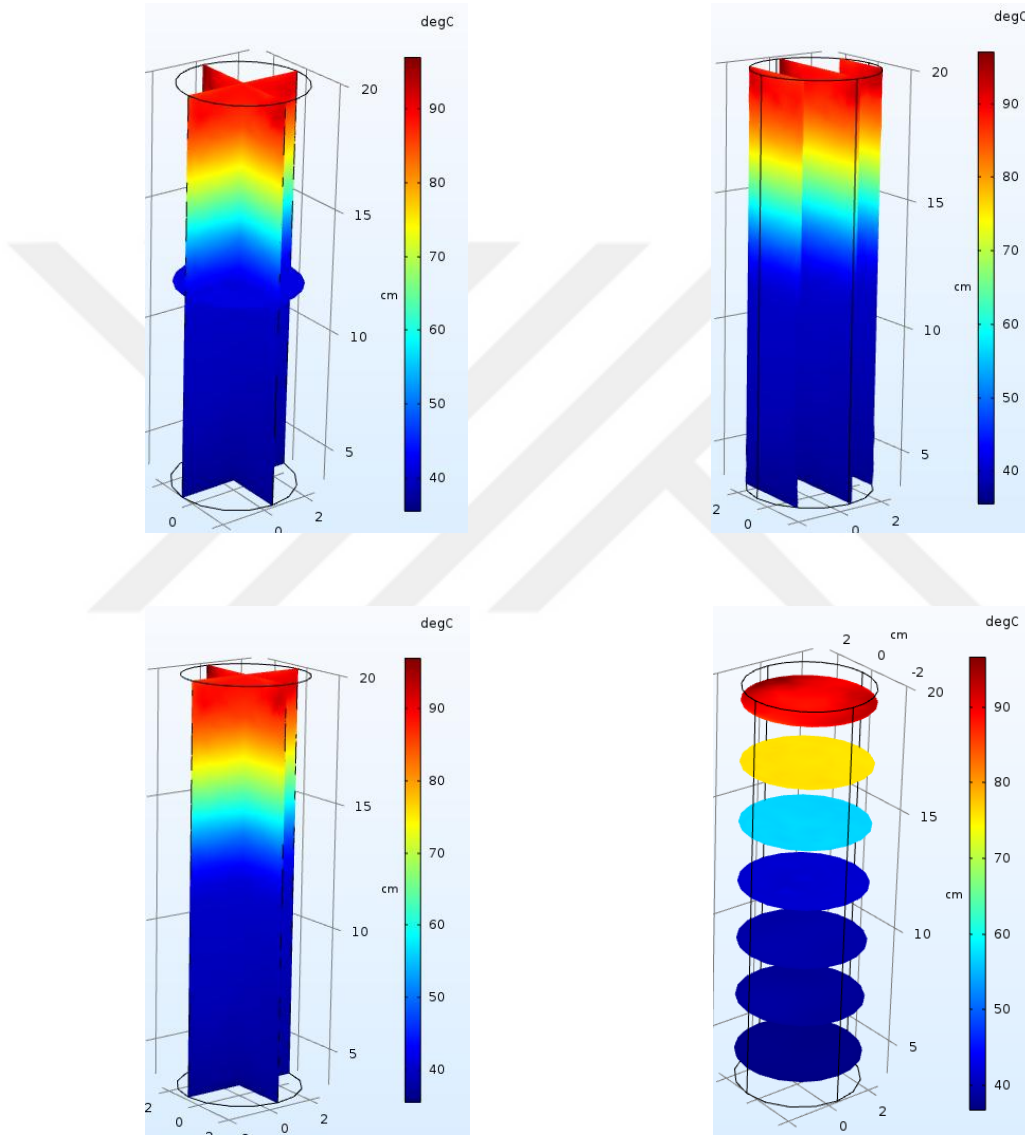
Şekil 4.34 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem içerisinde farklı kesitlerde oluşan elektrik alan dağılımı (V/m)



Şekil 4.35 Ürün içerisinde oluşan elektrik alan dağılımının farklı kesit ve farklı proses sürelerinde gösterilmesi (V/m)

Şekil 4.35’de gözlendiği şekilde, mikrodalga sistem geometrisinin de etkisine bağlı olarak ürün içerisinde oluşan elektrik alan daha çok ürünün üst bölgelerinde yoğunlaşmış olup buna bağlı olarak bu bölgelerde önemli bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir (Şekil 4.36). Benzer bir alan dağılımının endüstriyel bir proseste oluşacağı da düşünülürse ürün içerisinde bir karıştırma etkisinin yaratılarak sıcaklık dağılımının tekdüze edilmesi önemli bir proses tasarım parametresi olacaktır. Bu kapsamda literatürde Zhu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada ürün içerisinde Arşimet vida geometrili karıştırıcıların kullanılmasının ürün sıcaklık dağılımına etkisi gösterilmiştir.

Topcam vd. (2020) ise benzer proseslerde ürün akışının sağlandığı tüp duvarlarına uygulanan dönme hareketinin hem düşük vizkoziteli Newtonumsu hem de yüksek vizkoziteli Newtonumsu olmayan ürünlerdeki sıcaklık dağılımına etkisini incelemiş ve uygulanan dönme hareketinin endüstriyel proseslerde kullanımı için proses tasarım çalışmaları gerçekleştirmiştir.



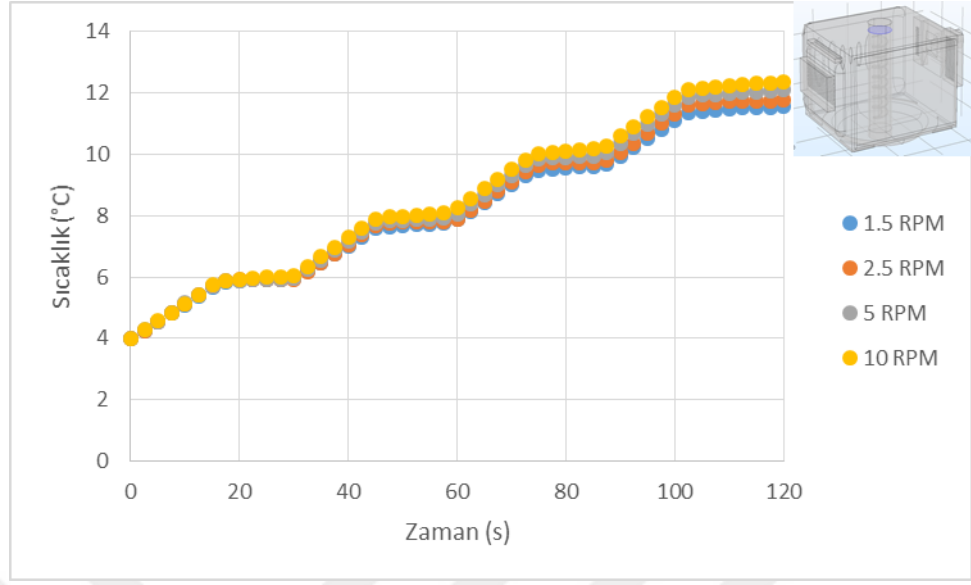
Şekil 4.36 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem içerisinde uygulanan ısıl işlem sırasında ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının ürün farklı kesitlerinde gösterilmesi (prosesin 120. saniyesi) (°C)

Bu tez çalışmasında da ürün içerisinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edebilmek amacıyla PTFE silindir içerisine bir Arşimet vidası yerleştirilebileceği varsayımıyla

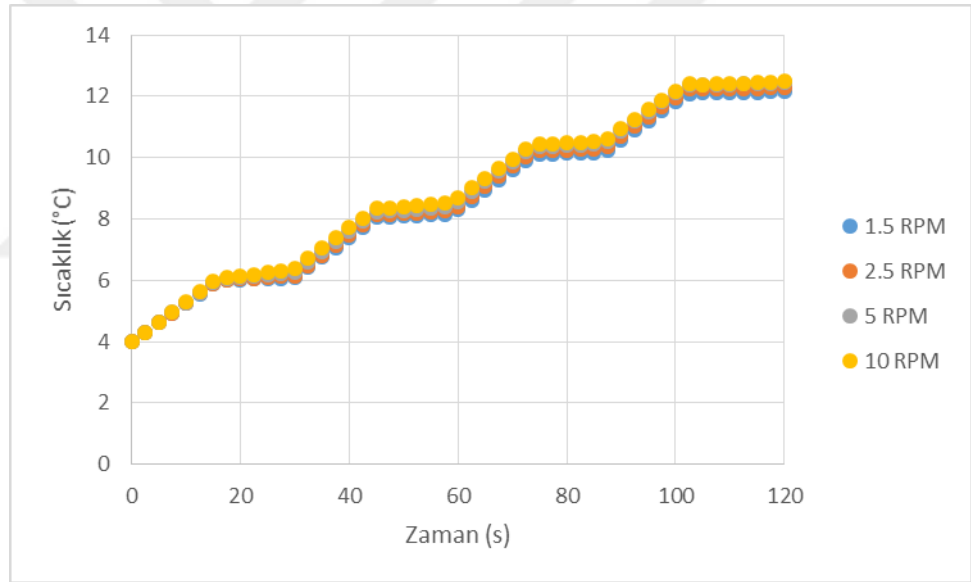
proses model çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün ilk aşamasında, deneysel çalışmalarda kullanılan, mikrodalga sistem çalışma döngü ve güç değeri kullanılmıştır. Sistem içerisindeki ürünün, endüstriyel bir prosese benzerilmesi amacıyla PTFE silindir alt ve üst yüzeyleri sistem dışarısına taşıyacak şekilde uzatılmış ve alt yüzey ürünün giriş bölgesi, üst yüzey ise ürünün çıkış bölgesi olarak tanımlanmıştır. Ürün hareketi amacıyla giriş hızı 0.01 m/s olarak tanımlanmış ve vida dönüş hızı 1.5, 2.5, 5 ve 10 rpm olarak kullanılmıştır. 5 ve 10 rpm dönüş hızlarının gerçek bir proseste bira da köpürme problemine yol açmaları ihtimali olsa da ürün içi sıcaklık değişimine dönme hızının etkisinin gözlenebilmesi amacıyla bu dönme hızları da kullanılmıştır. Bu çalışmalarda proses süresi 120 s olarak uygulanmıştır.

Şekil 4.37a ürün sistem çıkışında (PTFE silindir tepe yüzeyi) sıcaklık ortalama değerinin proses süresince değişimini gösterirken, ürün hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişimi ise Şekil 4.37b’de görülmektedir. Gözleendiği üzere kullanılan sistem çalışma döngüsü, düşük güç değeri ve ürün hızından dolayı ürün içerisinde önemli bir sıcaklık artışı ($\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$) gerçekleşmemiştir.

Proses sırasında sıcaklık değişimi yatışkın koşula ulaştıktan – dengeye geldikten sonra oluşan ürün içi sıcaklık dağılımının sistem farklı kesitlerinden görüntüsü Şekil 4.38 ve 4.39 da gösterilirken aynı kesitlerde meydana gelen hız profili değişimi Şekil 4.40 ve 4.41 de gösterilmiştir. Ürün içi sıcaklık dağılımına dönme uygulamasının tekdüze edici etkisi bu şekillerde de net olarak görülmektedir. Sistem geometrisine bağlı olarak ürün üst yüzey – PTFE silindir çıkış bölgesinde oluşan elektrik alanı bağlı olarak bu bölgede önemli bir sıcaklık artışı olduğu ve sistem içerisinde Arşimet vidası etkisiyle gerçekleştirilen dönme etkisinin ürün sıcaklık dağılımını tekdüze edebilecek şekilde gerçekleştiği ürünün sistemden çıkış kesitindeki sıcaklık ortalama değişimi kapsamında Şekil 4.38’de de net bir şekilde gözlenmektedir. Arşimet vidası etkisi ile sağlanan dönme uygulaması özellikle 5 ve 10 rpm ve üstü dönme hızlarında etkinliğini göstermektedir. Ürün içerisinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri Şekil 4.42a’da maksimum ve minimum sıcaklık bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının proses süresince değişimi ise Şekil 4.42b’de gösterilmiştir. Şekil 4.42b incelenirken sistem içerisine sürekli olarak $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de ürün girişi olduğu da dikkate alınmalıdır.

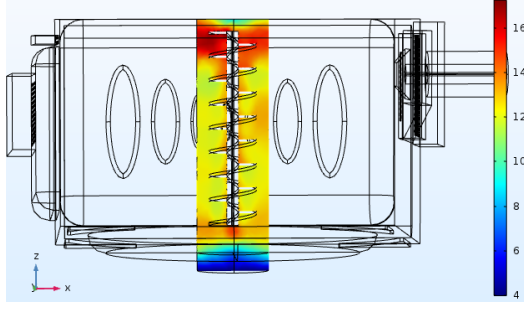


(a)

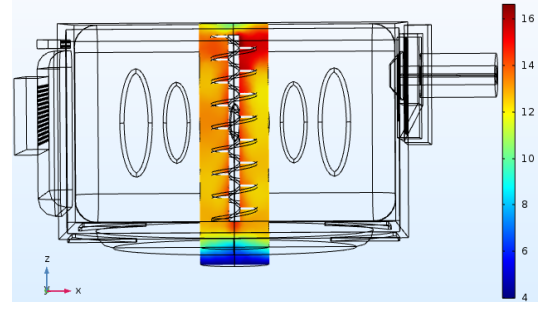


(b)

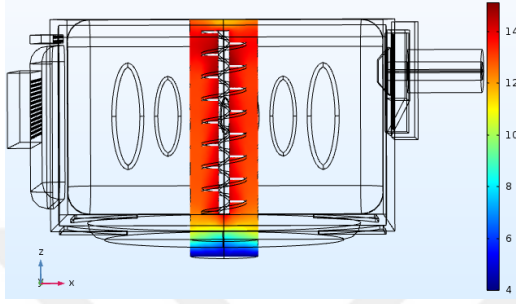
Şekil 4.37 (a) Sistem çıkışında (PTFE silindir tepe yüzeyi) ürün sıcaklık ortalama değerinin (b) ürün hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin proses süresince değişimi



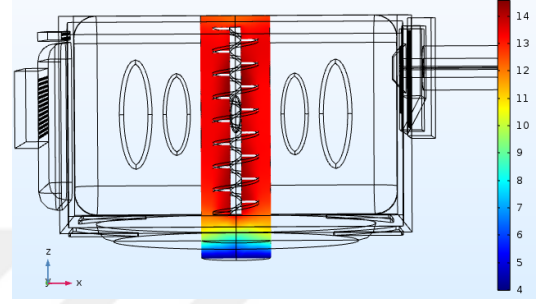
1.5 RPM



2.5 RPM

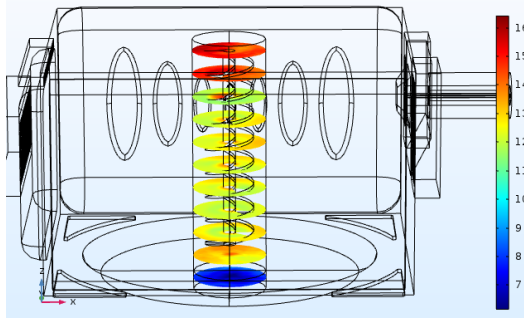


5 RPM

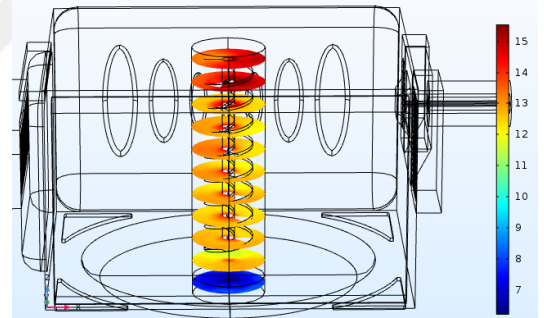


10 RPM

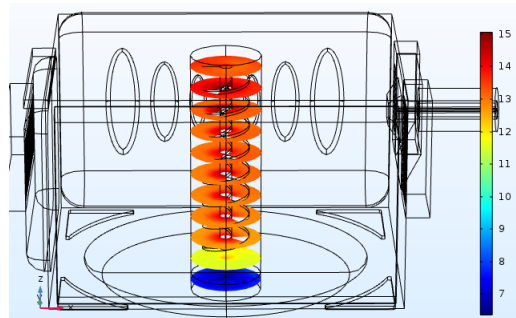
Şekil 4.38 Arşimet vidası tasarımı sistemlerde farklı dönme hızlarının prosesin 120. s'de ürün içi sıcaklık dağılımının sistem x-z kesitindeki görüntüsü (°C)



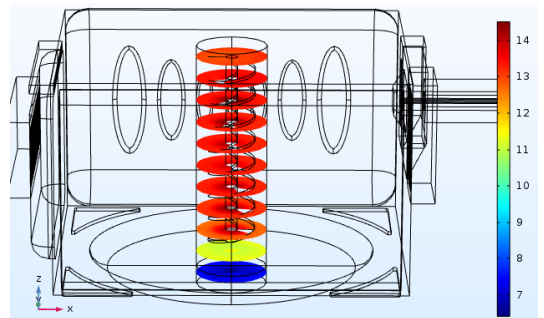
1.5 RPM – t = 120 s



2.5 RPM – t = 120 s

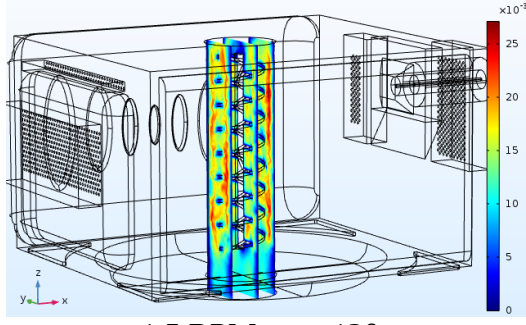


5 RPM – t = 120 s

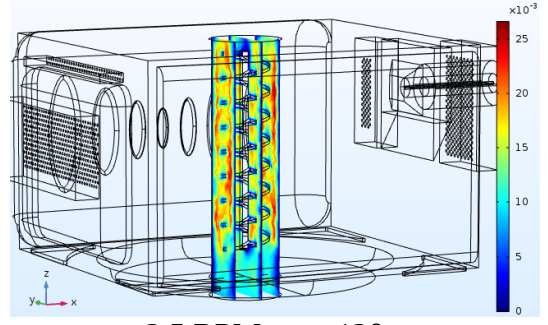


10 RPM – t = 120 s

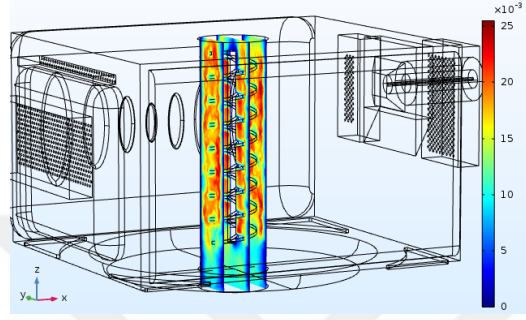
Şekil 4.39 Arşimet vidası tasarımı sistemlerde farklı dönme hızlarının prosesin 120. s'de ürün içi sıcaklık dağılımının sistem x-y kesitinde farklı yüksekliklerdeki görüntüsü (°C)



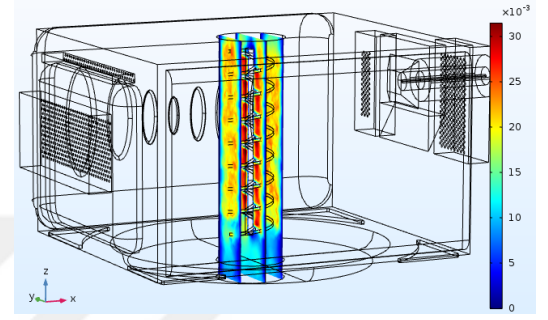
1.5 RPM – $t = 120$ s



2.5 RPM – $t = 120$ s

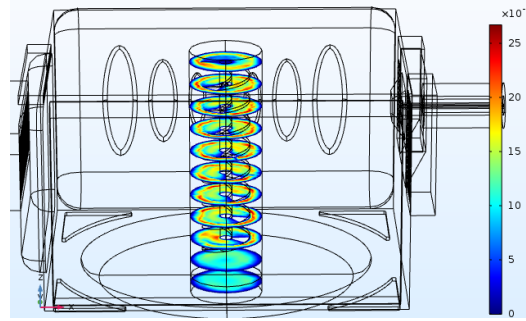


5 RPM – $t = 120$ s

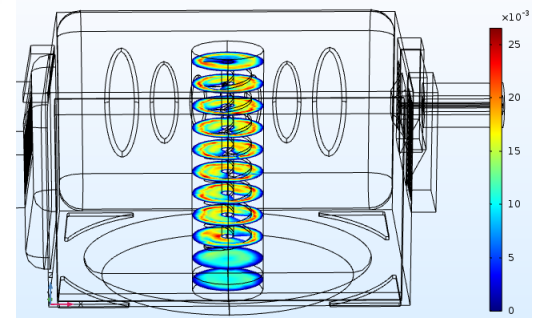


10 RPM – $t = 120$ s

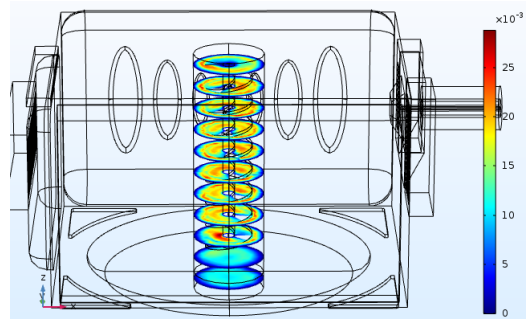
Şekil 4.40 Proses sırasında sıcaklık değişimi yatışkın koşula ulaşıttıktan – dengeye geldikten sonra oluşan ürün hız profili değişiminin sistem farklı kesitlerindeki görüntüsü (m/s)



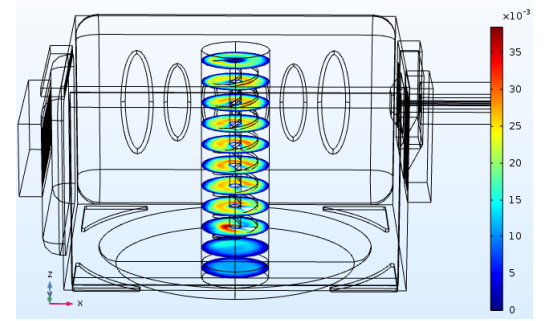
1.5 RPM – $t = 120$ s



2.5 RPM – $t = 120$ s

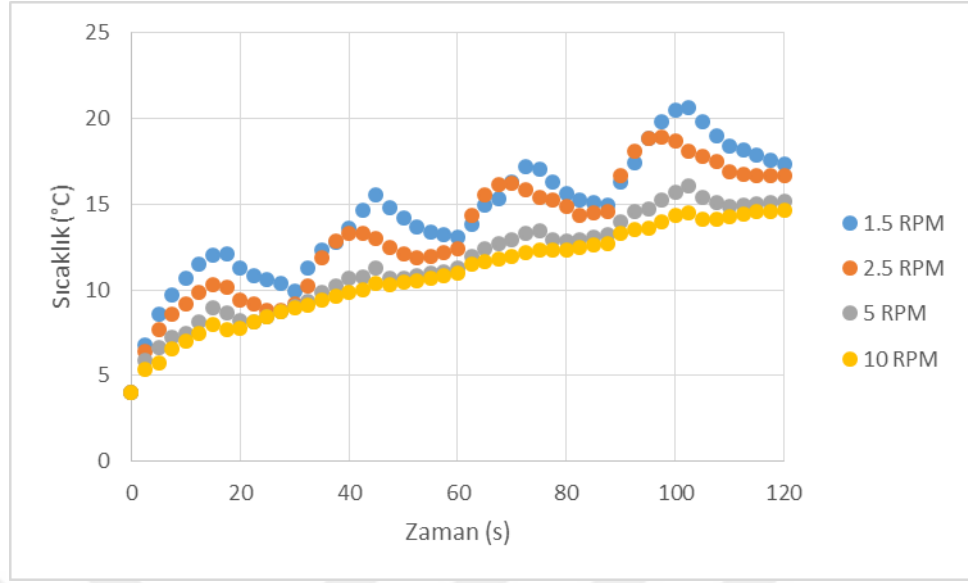


5 RPM – $t = 120$ s

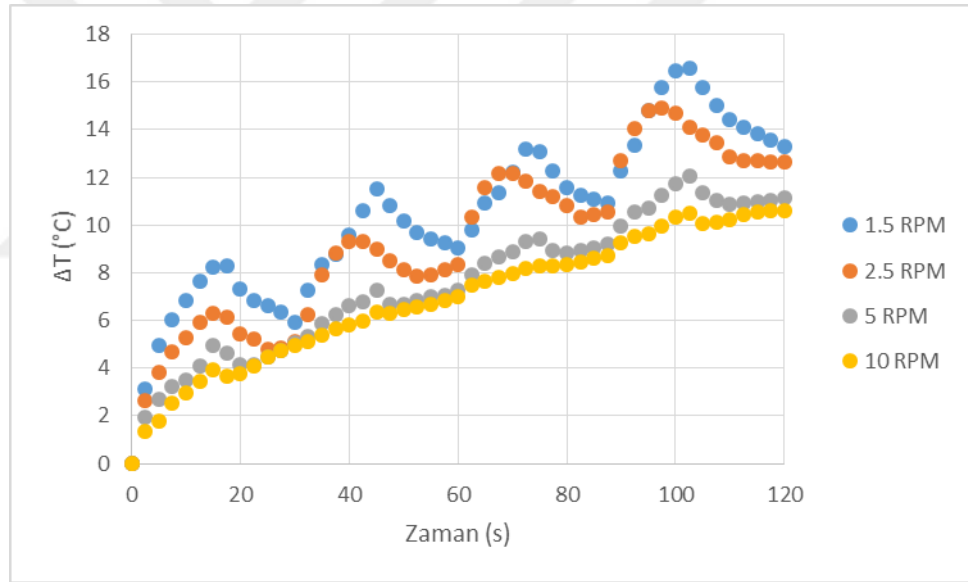


10 RPM – $t = 120$ s

Şekil 4.41 Proses sırasında sıcaklık değişimi yatışkın koşula ulaşıttıktan – dengeye geldikten sonra oluşan ürün hız profili değişiminin sistem farklı kesitlerindeki görüntüsü (m/s)



(a)



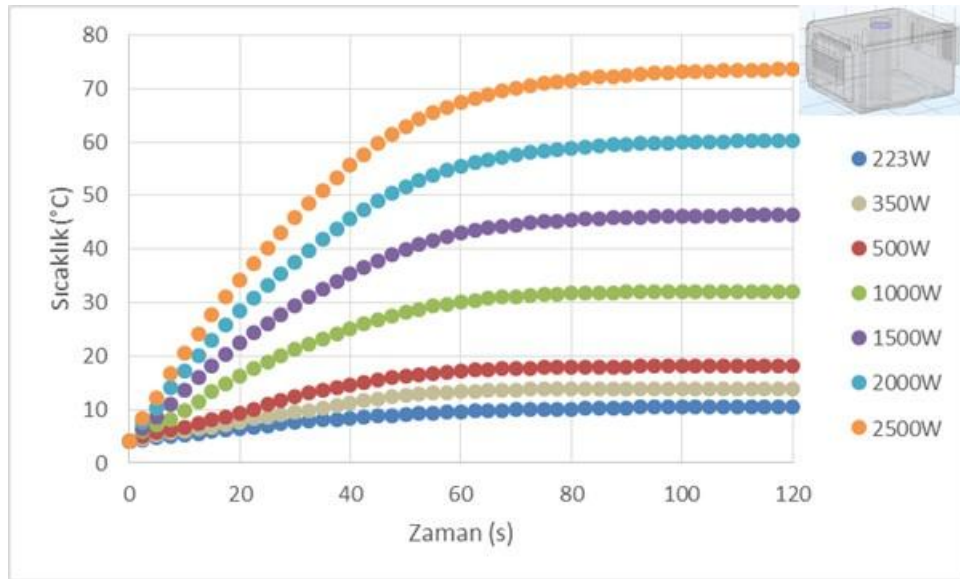
(b)

Şekil 4.42 (a) Ürün içerisinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri ve (b) Maksimum ve minimum sıcaklık bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının proses süresince değişimi

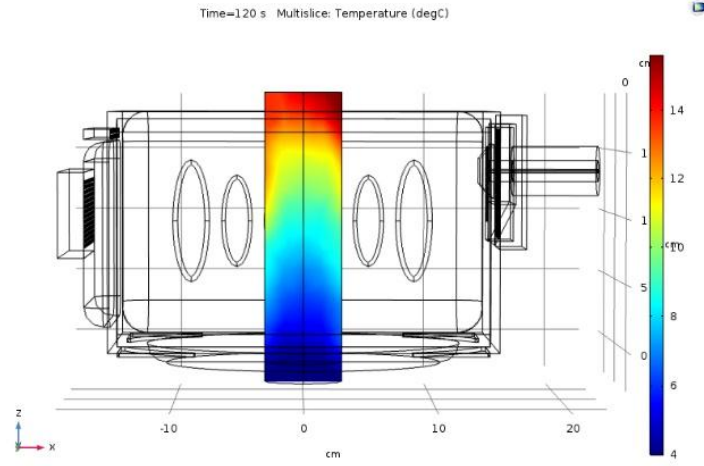
Kullanılan mikrodalga sistemde oluşan elektrik alanına bağlı olarak sistem çıkış bölgelerinde önemli bir elektrik alan yoğunluğu ve buna bağlı olarak da bir sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu durum özellikle kullanılan düşük dönme hızlarında da gözlenmiştir. Ancak 5 ve 10 rpm dönme ürün sıcaklığı hızlı bir şekilde dengeye gelmektedir. Dönme hızının sıcaklık tekdüzeliğine etkisi Şekil 4.42’de gösterilen sistem içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklık oluşan (sistem içerisinde minimum

sıcaklığın sürekli sistem özelliğinden dolayı sistem girişinde gözleneceği bu noktada dikkate alınmalıdır) bölgeler arası sıcaklık farkı değişiminde de açıkça ortaya konmuştur.

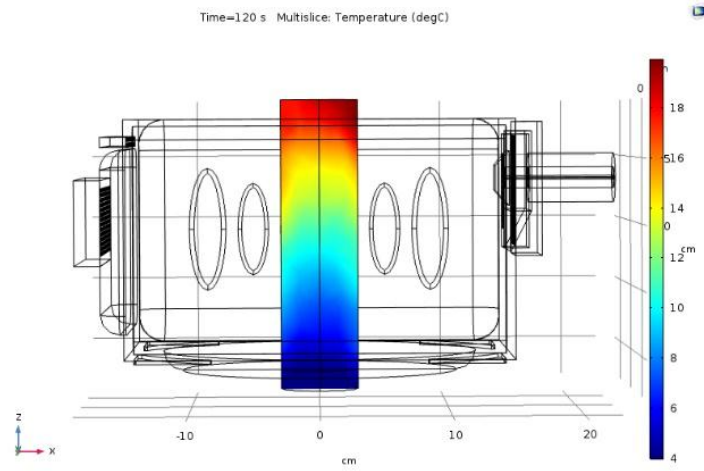
Mikrodalga sistemde ortaya çıkan çalışma döngüsü ve kullanılan düşük güç değerine de bağlı olarak, ürün içerisinde önemli bir sıcaklık artışı sağlanamamış ve dönme hareketine bağlı olarak ürünün sistem içerisinde kalma süresi uzadığından sıcaklık değişimi yatışkın koşullara da ulaşamamıştır. Bu nedenle sürekli bir enerji akışına gerek duyulacağı, endüstriyel bir prosese örnek olacağı ve kullanılan Arşimet vidasının mikrodalga sistem içerisinde etkinliğinin karşılaştırılabilmesi için aynı geometrik ölçülerde, Arşimet vidası kullanılmadan farklı güç değerlerinde 0.005 m/s akış hızında model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bira pastörizasyonu için istenilen sıcaklığa (mikrodalga sistemden çıkan üründe istenilen sıcaklık 60 °C) hangi güç değerinde ulaşacağını belirlemek için 223, 350, 500, 1000, 1500, 2000 ve 2500 W güç kullanımı hazırlanan mikrodalga modellerinde uygulanmıştır. Farklı – sürekli güç uygulamaları sonucu sistem çıkışında yüzey ortalama değeri olarak elde edilen sıcaklık değişimi Şekil 4.43’de, sistem içi x-z kesitinde elde edilen sıcaklık dağılımı ise Şekil 4.44’de gösterilmektedir. Bu modeller incelendiğinde pastörizasyon için gerekli sıcaklık değerinin 2000 kullanımı ile elde edilebildiği ve akış hızına da bağlı olarak ürün sıcaklık değişiminin dengeye geldiği ortaya çıkmıştır



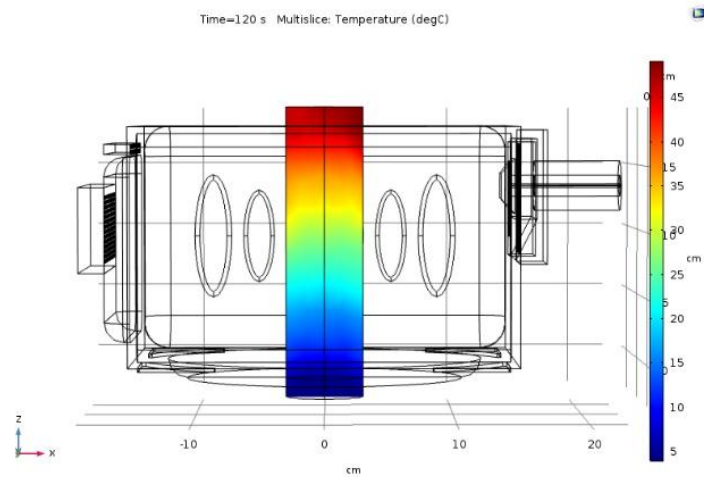
Şekil 4.43 Arşimet vidasının eklenmediği laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde prosesin 120. saniyesinde, mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri



350 W – t = 120 s



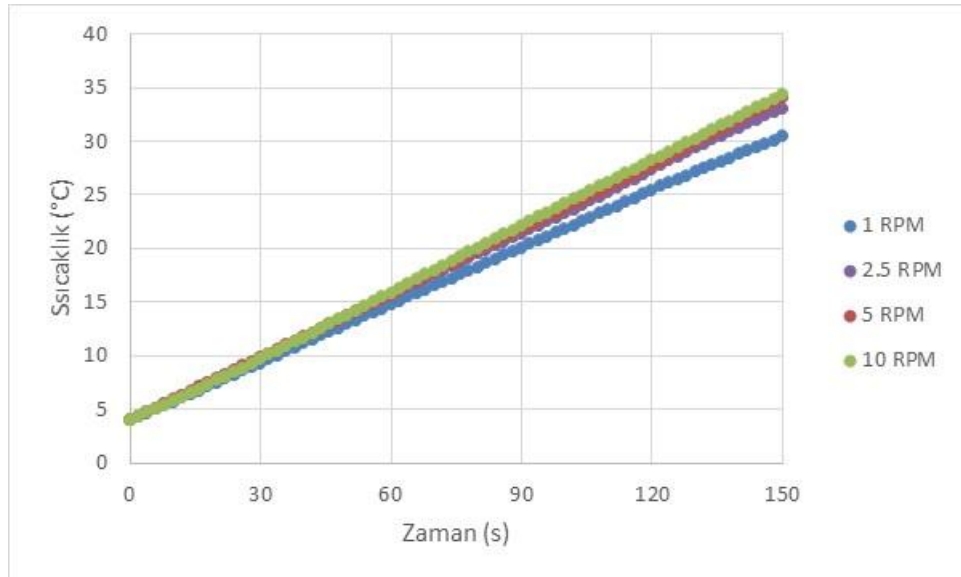
500 W – t = 120 s



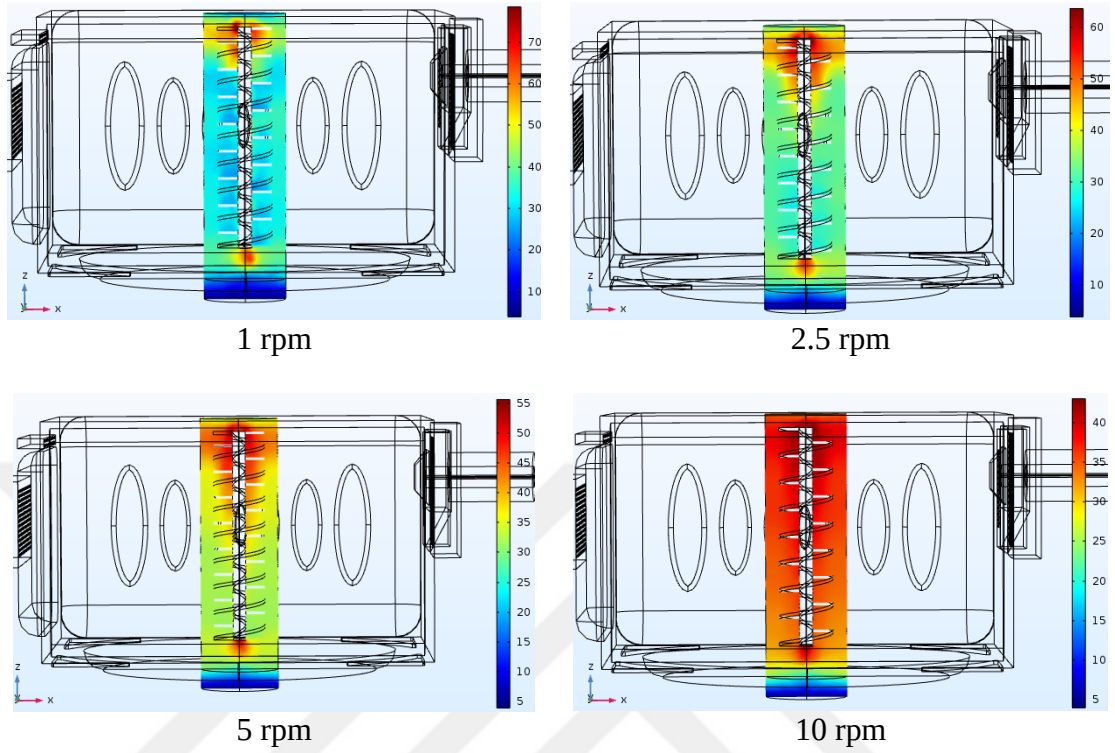
1500 W – t = 120 s

Şekil 4.44 Arşimet vidasının eklenmediği laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem modellerinde farklı güç uygulamaları ile elde edilen yatışkın koşul sıcaklık dağılımı

Sürekli akış özelliğine sahip sistemde, Arşimet vidasının etkisinin belirlenebilmesi için 350, 750 ve 1500 W güç değerlerinde, 1, 2.5, 5 ve 10 rpm dönüş hızları kullanılarak 0.005 m/s, 0.05 m/s ve 0.25 m/s akış hızlarını içeren farklı matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.45’de 350W güç - 0.005 m/s akış hızında 4 farklı dönüş hızına sahip matematiksel model çalışmalarından alınan ve mikrodalga sistem çıkışında elde edilen ortalama sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Arşimet vidası kullanılmadan, aynı koşullarda (350W güç ve 0.005 m/s akış hızı) elde edilen ortalama sıcaklık değeri ise ≈ 14 °C olup bu değere ürün yatışkın koşullarda ulaşmıştır. Arşimet vidası kullanımı ürünün mikrodalga sistem içerisinde daha fazla kalmasına, daha uzun süre mikrodalga enerji absorbe etmesine ve buna bağlı olarak da daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmasına katkıda bulunmaktadır. Buna bağlı olarak istenilen bir sıcaklık değerine çok daha düşük güç uygulaması ile ulaşılabilceği görülmektedir. Bu koşullarda ürüne uygulanan dönme hızının da önemli bir etkisi olduğu Şekil 4.45’de ortaya konmaktadır. Şekil 4.46’da ise belirtilen koşullarda ürün içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımı sistem dikey kesitinde gösterilmektedir. Şekil 4.47 ve 4.48’de ise Arşimet vidası kullanılan sistemlerde 750 W güç 0.005 m/s akış hızı kullanımı sonucu elde edilen sıcaklık değişimine dönme hızının etkisi ve bu koşullarda sistem içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımı gözlenmektedir. 1500 W güç uygulaması etkileri ise Şekil 4.49 ve 4.50’de verilmiştir.



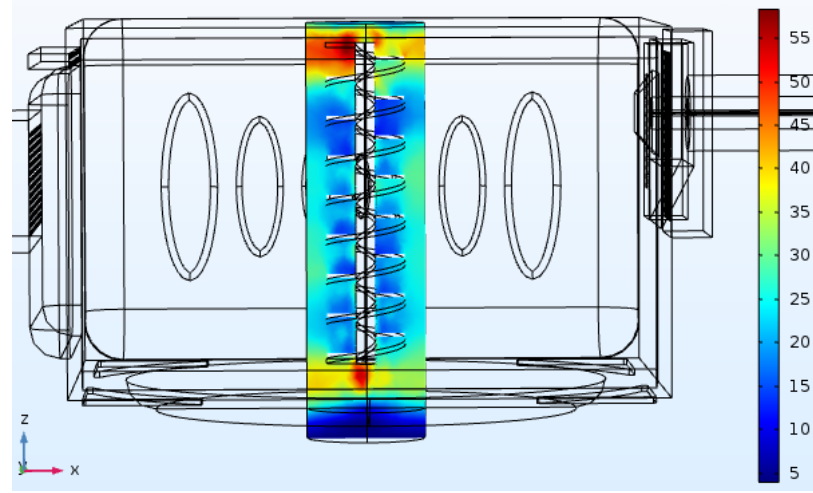
Şekil 4.45 350 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri



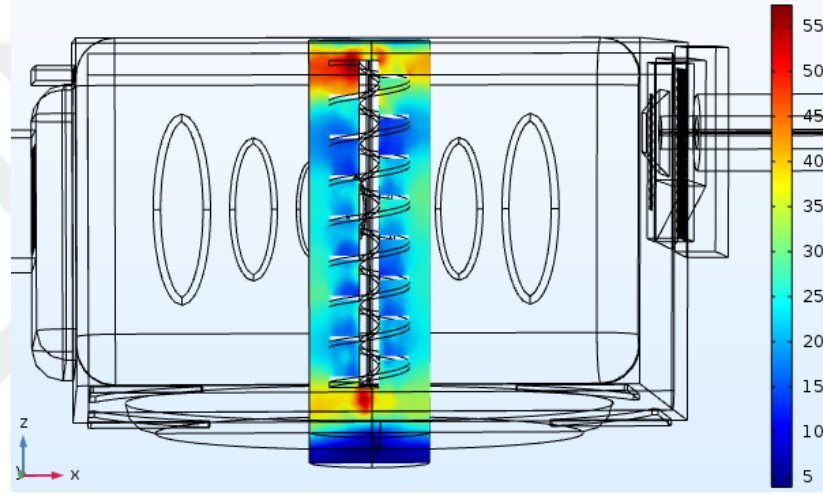
Şekil 4.46 350 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu dikey-kesitteki sıcaklık profilleri (°C – prosesin 150. saniyesi)



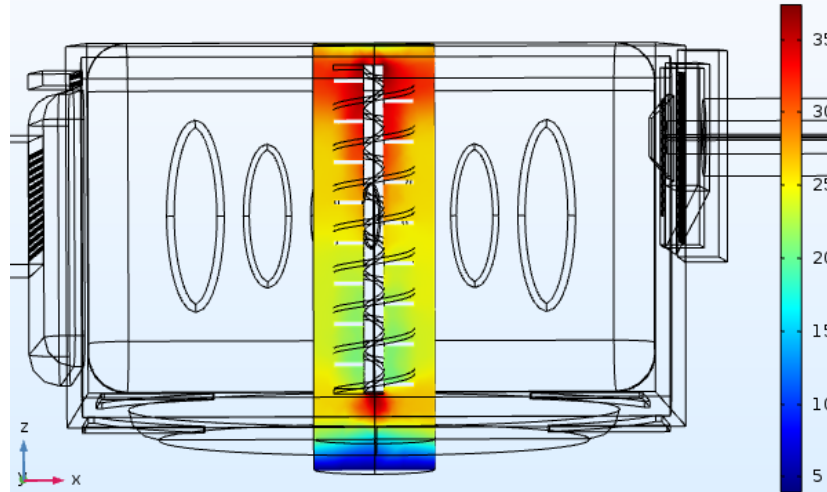
Şekil 4.47 750 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri



1 rpm

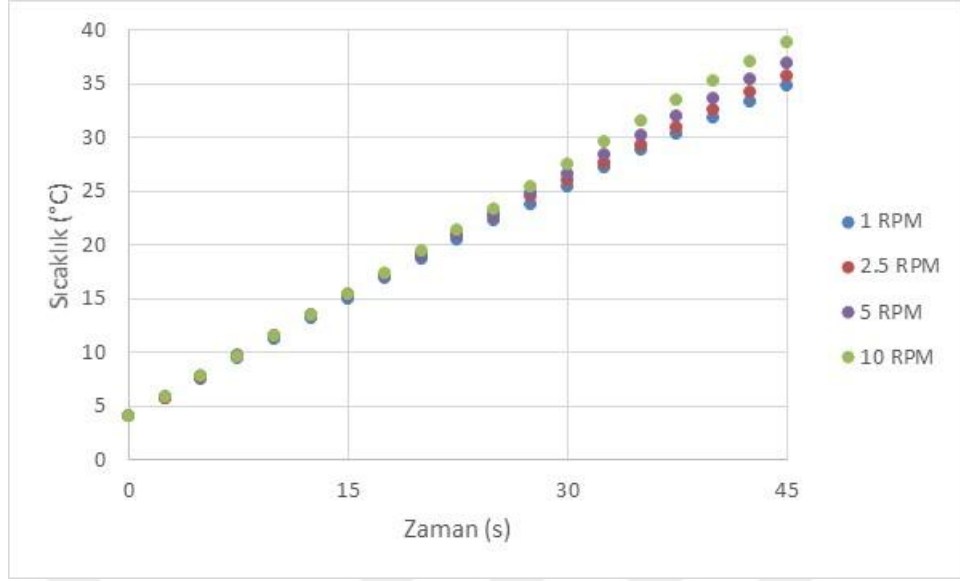


2.5 rpm

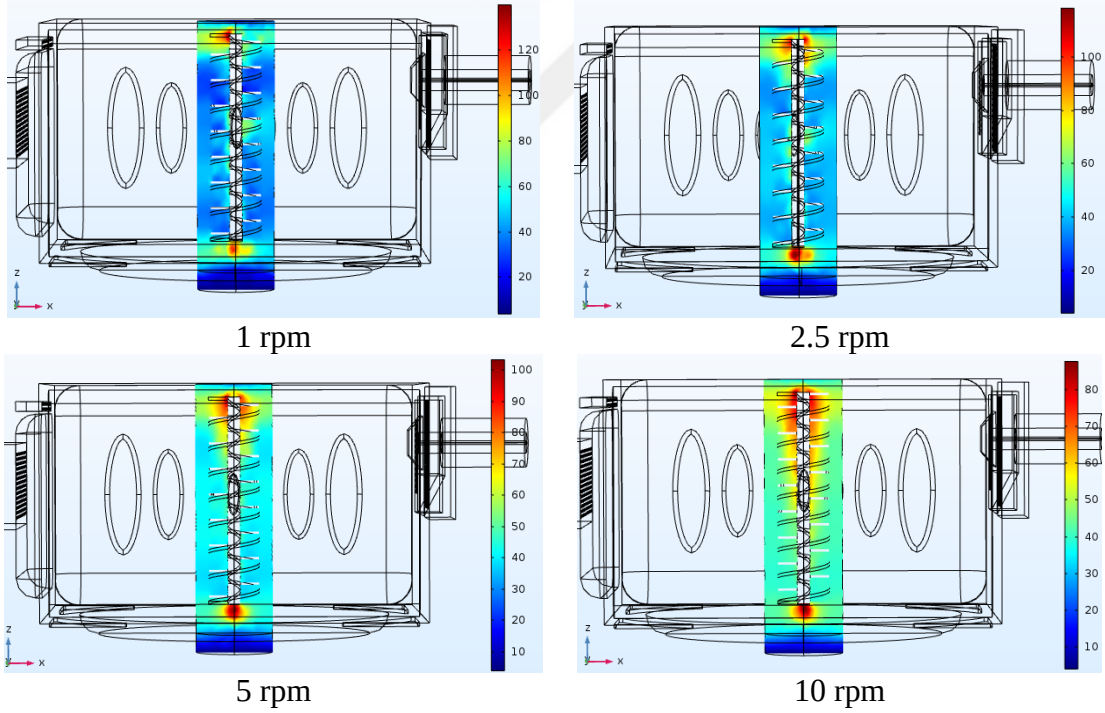


10 rpm

Şekil 4.48 750 W güç - 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde, uygulanan farklı dönüş hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu dikey-kesitteki sıcaklık profilleri (°C – prosesin 50. saniyesi)



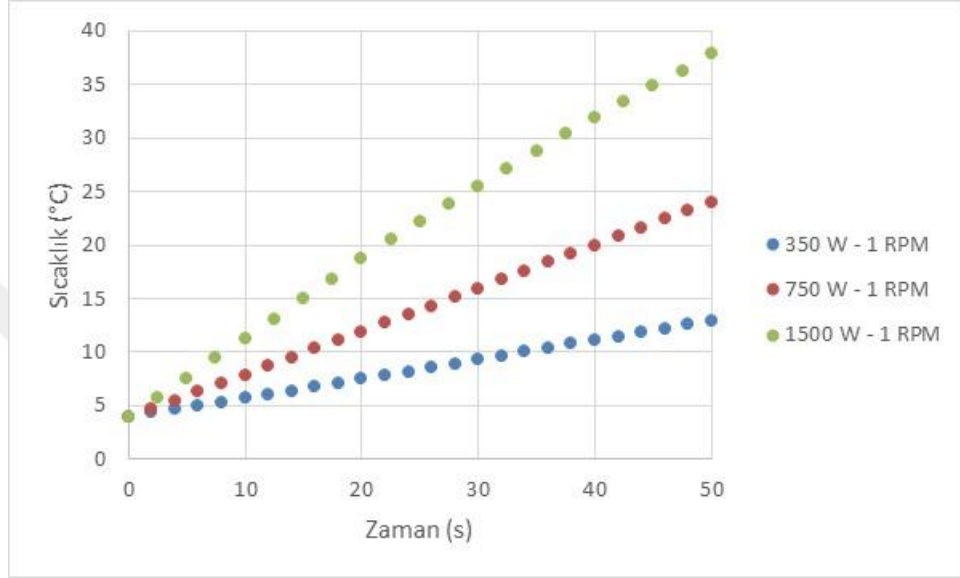
Şekil 4.49 1500 W güç – 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde uygulanan farklı dönüş hızlarının mikrodalga sistemden çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerleri



Şekil 4.50 1500 W güç - 0.005 m/s akış hızına sahip matematiksel modellerde, uygulanan farklı dönüş hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu dikey-kesitteki sıcaklık profilleri (°C – prosesin 45. saniyesi)

Arşimet vidası uygulaması gerçekleştirilen modellerde dönme hareketine bağlı olarak, ürünün sistem içerisinde kalma süresinin uzamasına bağlı olarak uzun proses

sürelerinde dahi ürün içi sıcaklık değişimi açısından yatışkın koşullara ulaşılamamış, ancak artan dönüş hızı etkisine bağlı olarak ürün sıcaklık dağılımının sistem çıkışında tekdüze olarak elde edilebildiği ve istenilen sıcaklık değerlerine daha düşük güç uygulamaları ile ulaşılabildiği ortaya konmuştur. Şekil 4.51 uygulanan güç değerlerinin sabit dönme hızında sistem çıkışında ürün sıcaklık değişimine etkisini göstermektedir.



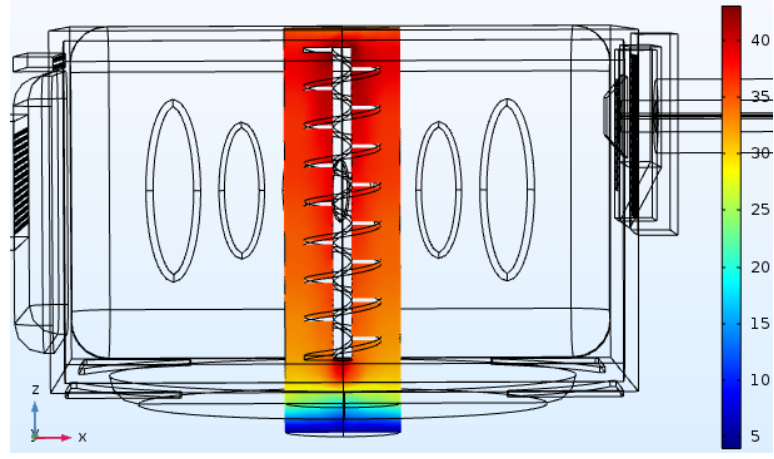
Şekil 4.51 0.005 m/s akış hızı ve 1 rpm dönüş hızına sahip mikrodalga matematiksel modellerden alınan, mikrodalga sistemden çıkış noktasında ürünün ortalama sıcaklık değerleri



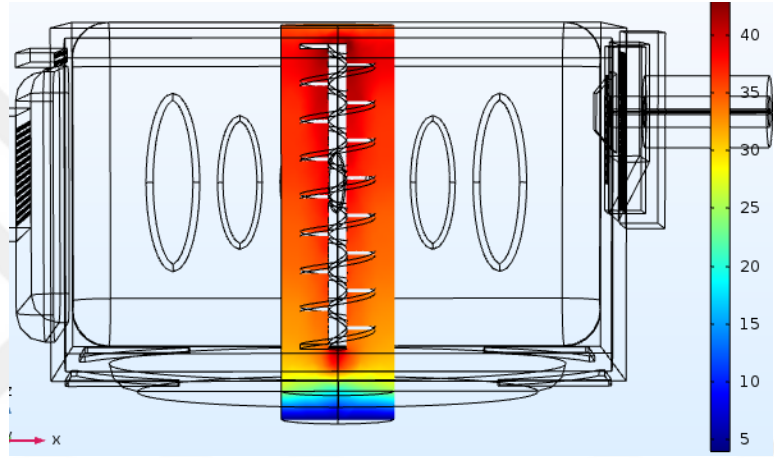
Şekil 4.52 350W güç - 10 rpm Arşimet vidası dönüş hızına sahip mikrodalga sistemde uygulanan farklı akış hızlarının, mikrodalga sistemde çıkış noktasında üründen alınan ortalama sıcaklık değerlerine olan etkisi

Ürünün sisteme giriş hızının incelenmesi için gerçekleştirilen düşük güç – yüksek dönme hızı uygulama sırasındaki etkisi ise Şekil 4.52’de verilmiştir. Burada gözleneceği üzere ürünün sisteme giriş hızının düşük uygulama gücü ve yüksek dönme hızlarında önemli bir etkisi gözlenmemiş ve proses dönme hızının kontrolü altında devam etmiştir. Bu kapsamda elde edilen ürün sıcaklık değişimi ise Şekil 4.53’de gösterilmektedir. Bu şekilde kullanılan giriş hızının artması ile sistem içi sıcaklık dağılımının, uygulanan yüksek dönme hızına rağmen, tekdüze özelliğini kaybetmeye başlığı da net olarak gözlenmektedir.

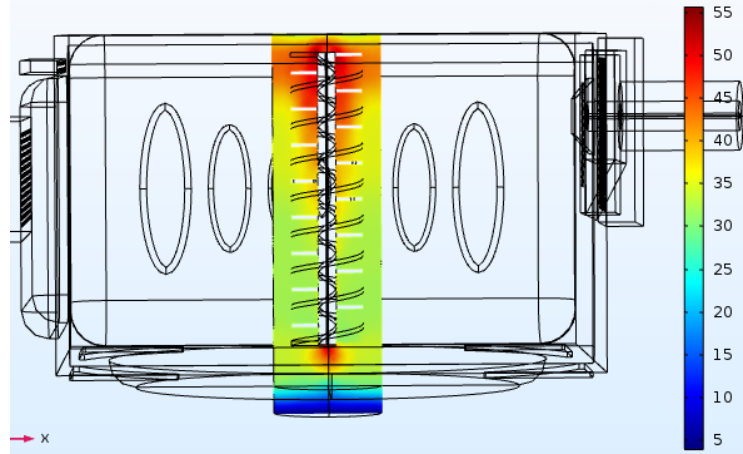
Şekil 4.54 ve 4.55’de ise 350 W güç değerinde 1 ve 2.5 rpm dönüş hızı kullanılması durumunda ürün çıkış sıcaklık değişimine uygulanan giriş hızının etkisi gösterilirken bu uygulamalarda elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 4.56 ve 4.57’de verilmiştir. Bu kapsamda görüldüğü üzere, sürekli bir sistemde düşük güç uygulamalarında sistem içi kullanılan dönme hızı ürün sıcaklık değişiminde ürünün sisteme giriş hızına göre daha etkin bir faktör olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca kullanılan sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımının sistem çıkışında daha yoğun oluşmasına ve dönme uygulaması ile ürünün sistem içerisinde daha uzun süre kalmasına bağlı olarak da proses sırasında yatışkın koşulların, Arşimet vidası kullanılmayan duruma göre, oluşması daha uzun süre alacaktır. Bu süreçte ürün içerisinde yüksek sıcaklık bölgeleri de oluşacağından simülasyonlara devam edilmemiştir.



0.005 m/s



0.1 m/s

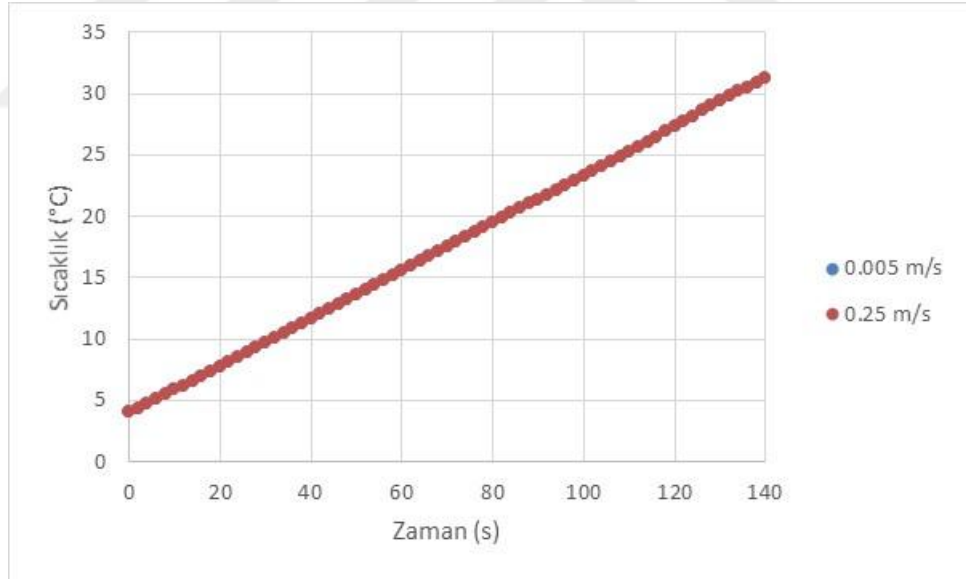


0.25 m/s akış hızı

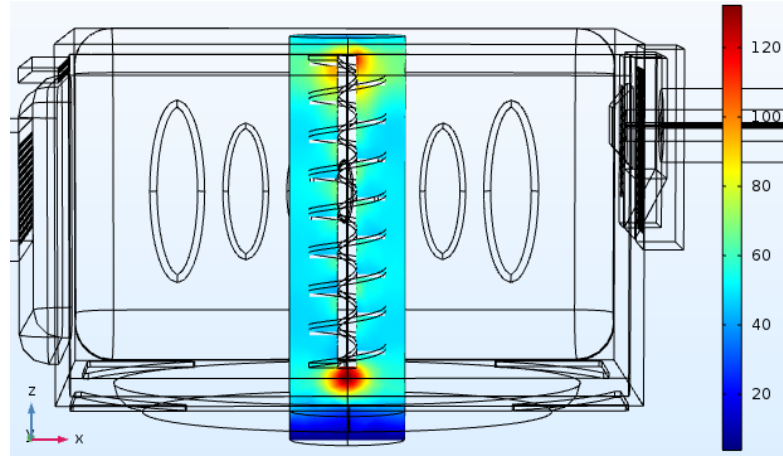
Şekil 4.53 350W güç - 10 rpm dönüş hızına sahip Arşimet vidalı mikrodalga sistemde uygulanan 3 farklı akış hızının ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı ($^{\circ}\text{C}$ – prosesin 150. saniyesi)



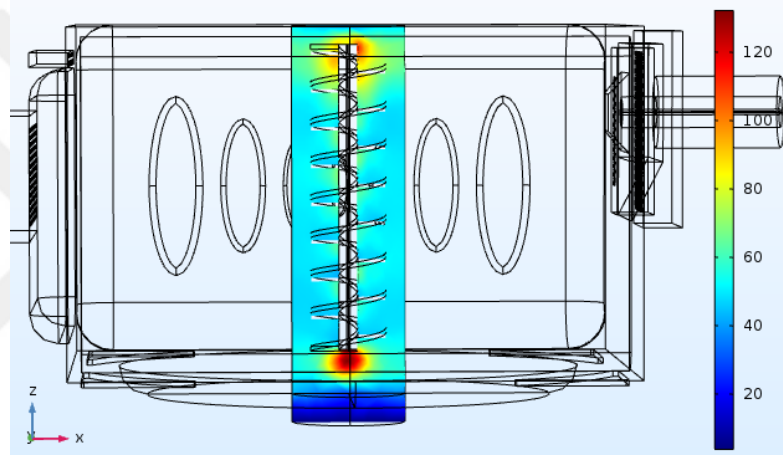
Şekil 4.54 350 W güç - 1 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürünlerin mikrodalga sistemden çıkış sıcaklıkları üzerine etkisi



Şekil 4.55 350 W güç – 2.5 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürünlerin mikrodalga sistemden çıkış sıcaklıkları üzerine etkisi

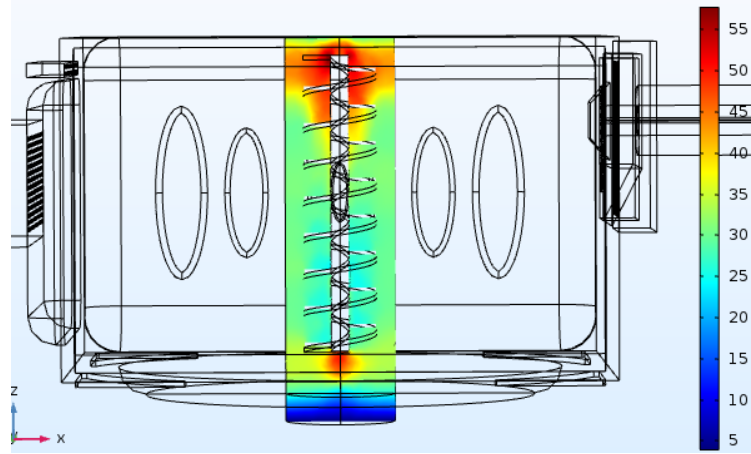


0.005 m/s akış hızı

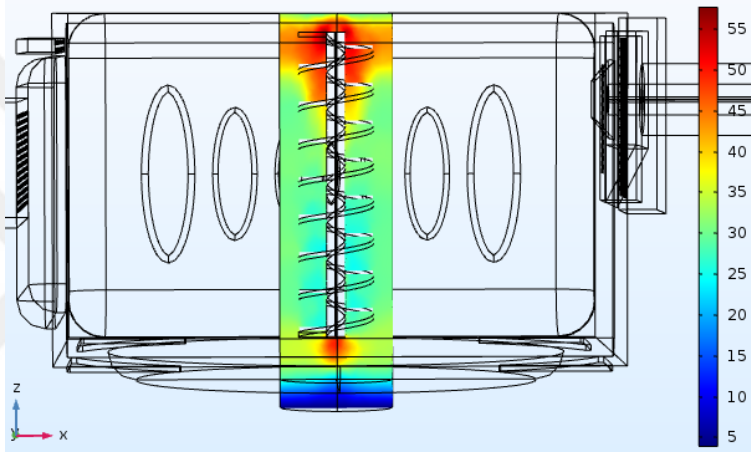


0.25 m/s akış hızı

Şekil 4.56 350 W güç - 1 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık profilleri (°C – prosesin 250. saniyesi)



0.005 m/s akış hızı

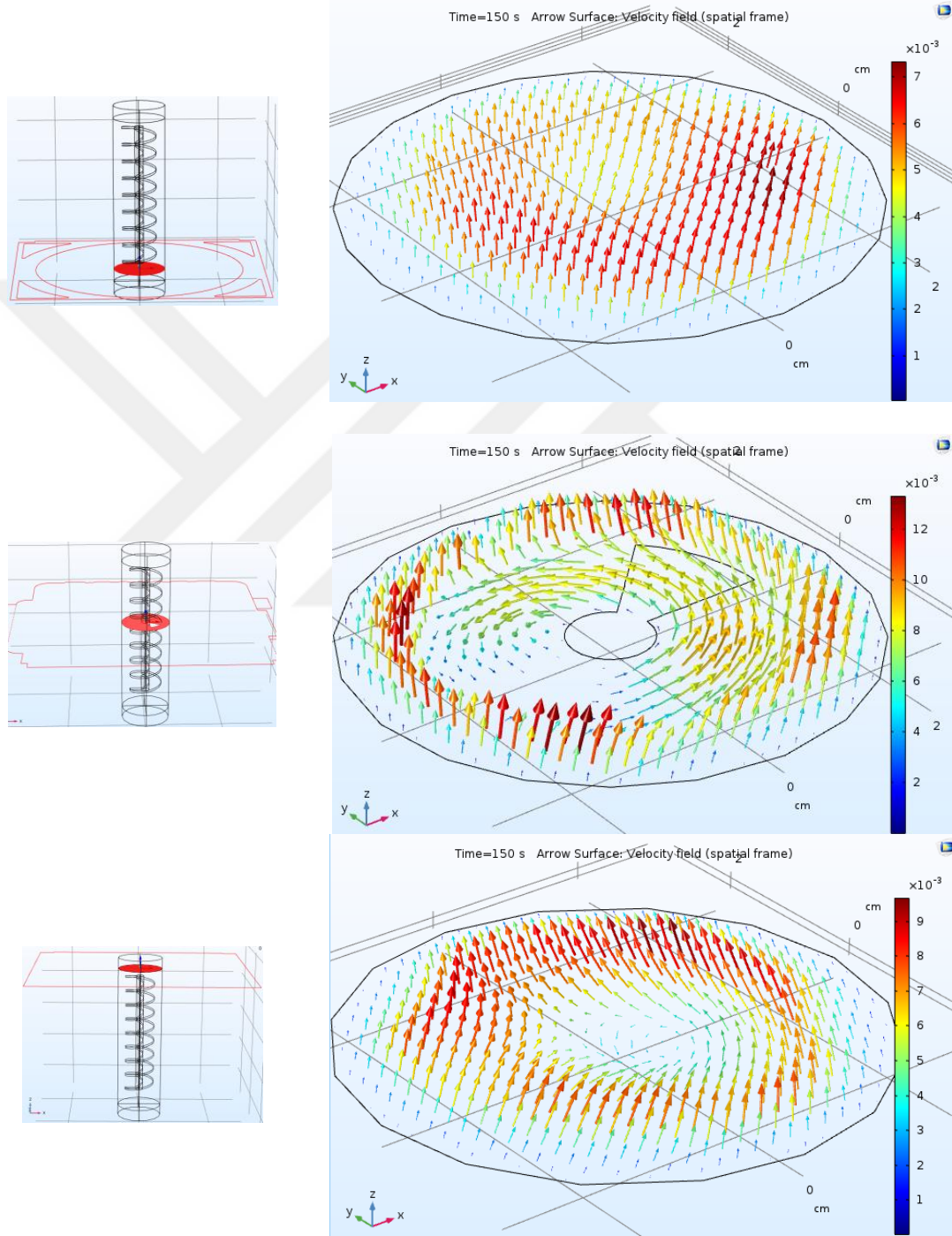


0.25 m/s akış hızı

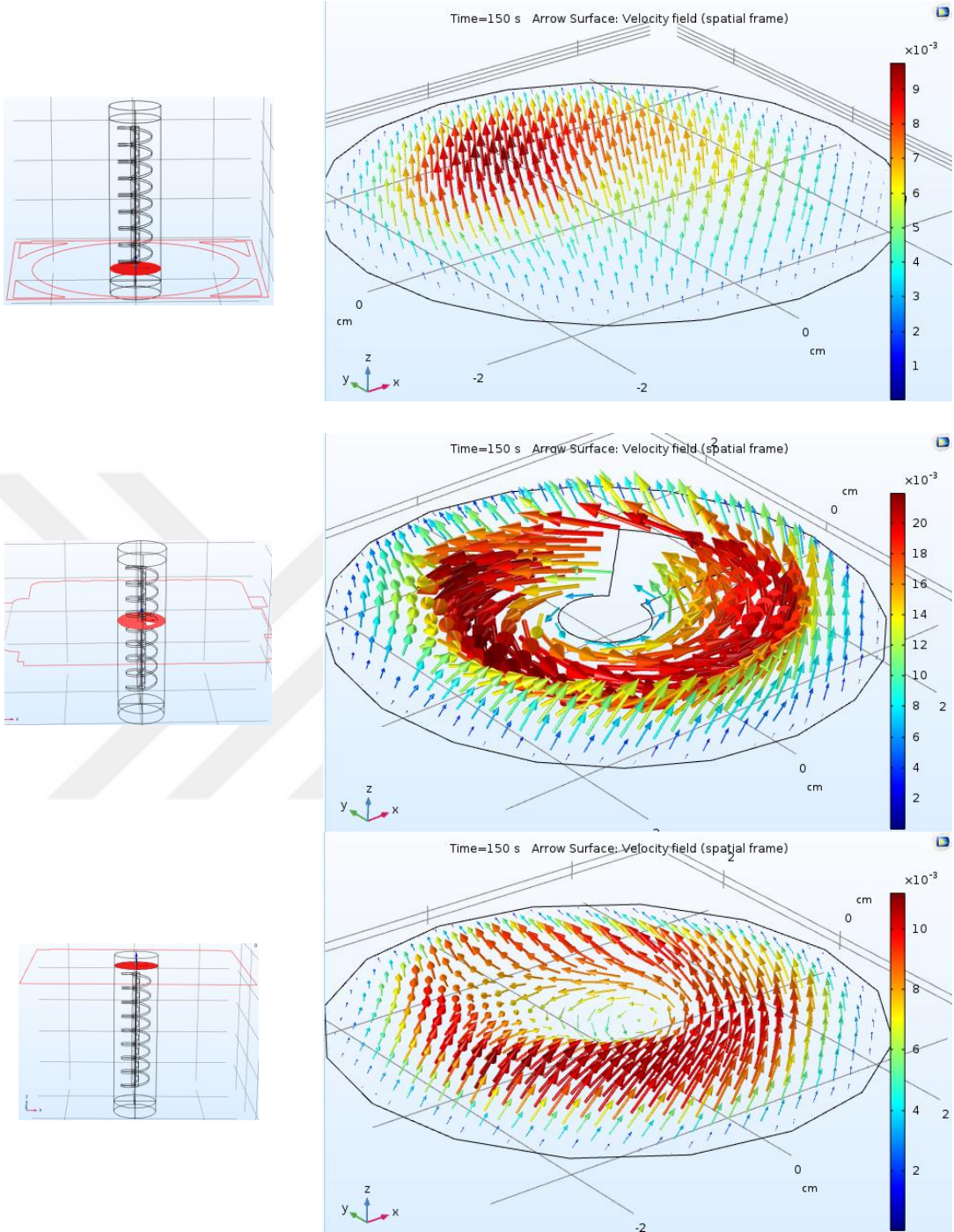
Şekil 4.57 350 W güç – 2.5 rpm Arşimet vidası dönüş hızında, uygulanan farklı akış hızlarının ürün içerisinde oluşturduğu sıcaklık profilleri (°C – prosesin 140. saniyesi)

Daha önce açıklandığı şekilde yüksek güç uygulamaları durumunda, akış ve dönme hızından bağımsız olarak ürün içerisinde sıcaklığı fazla yükselen bölgeler oluşmaktadır. Bu nedenle biraya uygulanacak ısıtma işlemi sırasında düşük güç kullanımları istenilen sıcaklık değerine ulaşmak önemli bir noktadır. Sürekli akış sistemlerinde düşük güç kullanılması durumunda, ürün sıcaklık değişiminde kullanılan dönme hızının önemli bir etki gösterdiği yukarıda açıklanmıştır. Şekil 4.58 – 4.60’da sistem içerisinde kullanılan giriş hızı ve dönme etkisine bağlı olarak meydana gelen hız profilleri gösterilmektedir. Şekil 4.58 ve 4.59 karşılaştırıldığında giriş hızına göre yüksek bir dönme hızı kullanılması durumunda ürünün sistem içerisinde önemli bir dönme etkisine maruz kaldığı gözlenmektedir. Şekil 4.60’da (0.005 ve 0.25 m/s giriş hızlarının üzerine 10 rpm dönme etkisi) ise giriş hızı arttırıldığında ortaya çıkan kombine etki gösterilmiştir.

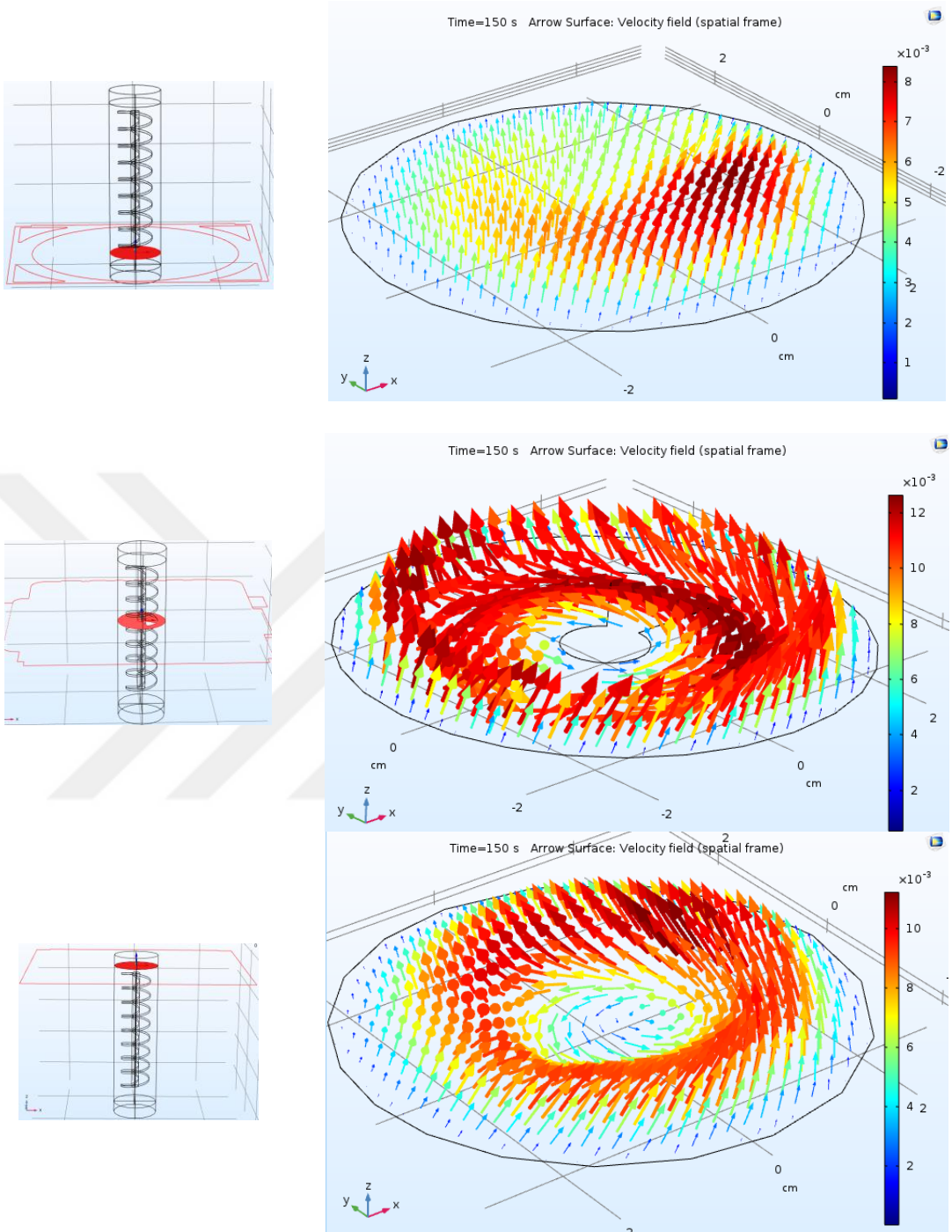
Ancak Şekil 4.52’de de görüldüğü üzere bu etkilerin sistem çıkışı sıcaklık değişimine bir etkisi olmamıştır. Şekil 4.45 ve 4.49’da ise dönme hızının farklı giriş hızlarına bağlı olarak sıcaklık değişimine etkisi gösterilmiştir. Bu da sistem içerisinde dönme hızının önemli bir etkisi olduğu konmaktadır.



Şekil 4.58 350 W güç - 1 rpm dönüş hızı ve 0.005 m/s akış hızı kullanılması durumunda sistemin farklı kesitlerinde elde edilen hız profili (prosesin 150. saniyesi)



Şekil 4.59 350 W güç - 10 rpm dönüş hızı ve 0.005 m/s akış hızı kullanılması durumunda sistemin farklı kesitlerinde elde edilen hız profili (prosesin 150. saniyesi)



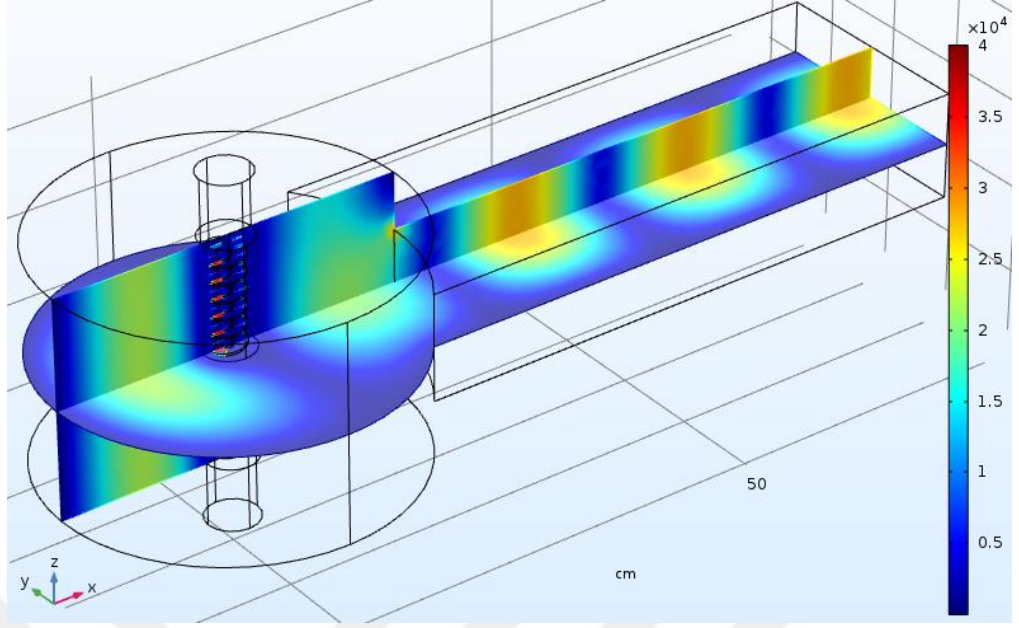
Şekil 4.60 350 W güç - 10 rpm dönüş hızı ve 0.25 m/s akış hızı kullanılması durumunda sistemin farklı kesitlerinde elde edilen hız profili (prosesin 150. saniyesi)

Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem kullanarak planlanan sürekli bir sistemde gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında ürün içi sıcaklık dağılımı kapsamında en uygun sonuç 1 rpm dönüş hızına sahip 350 W güç uygulaması durumunda elde edilmiş

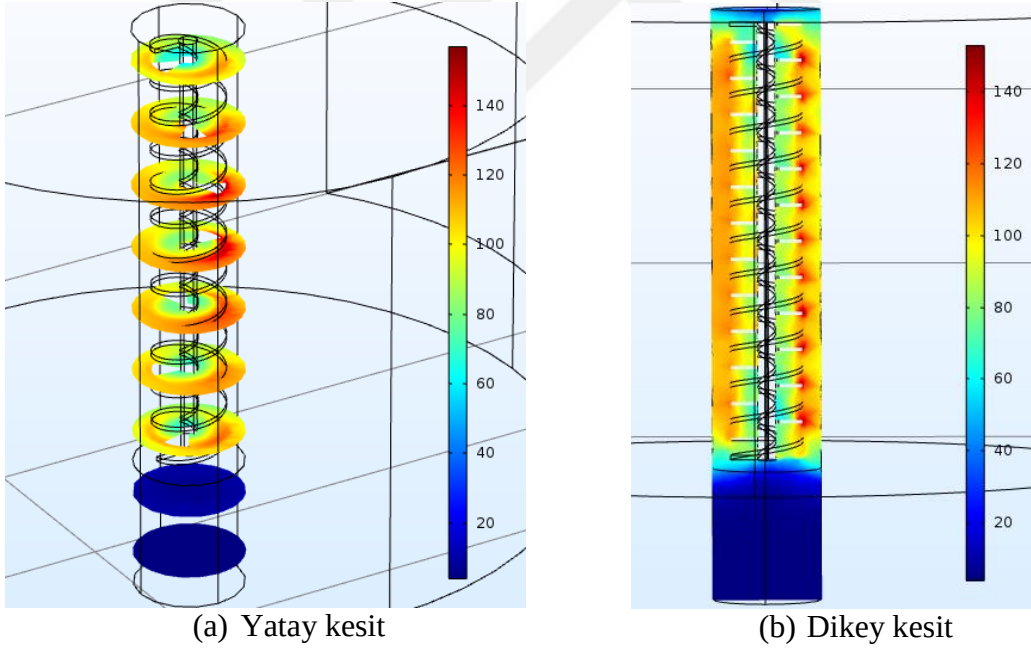
ve ürün sıcaklık değişiminde kullanılan giriş hızının önemli bir etkisi olmadığı gösterilmiştir. Bu koşullarda ürün sıcaklığının, sistem çıkışında 30 °C'ye ulaşması 150 s sürmüştür. Arşimet vidası etkisi ile dönme uygulaması olmadan yapılan çalışmalarda ise 150 s sonunda ürünün sistem çıkışda 30 °C'ye ulaşması ancak 1000 W'lık yüksek bir güç kullanılması durumunda oluşmuştur. Bu değerler mikrodalga uygulamanın, konvansiyonel sistemlerde kullanılan ön ısıtma işlem bölümü amacıyla kullanılarak istenilen sıcaklık değerine çok daha kısa bir sürede ulaşılabilceğini göstermektedir. Bu kapsamda proses süresinden %83.3 gibi bir oranda kısaltma sağlanabilmektedir.

4.2.3 Endüstriyel mikrodalga sistem kullanılarak yapılan matematiksel model çalışmaları

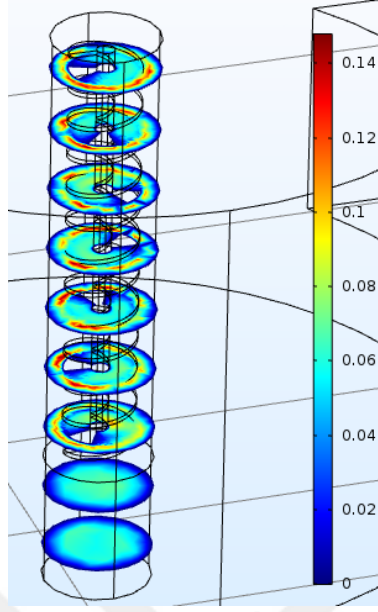
Bu bölümde, öncelikle Arşimet vidası kullanımı ile üründe sağlanan karışmanın ürün sıcaklık değişimine etkisi endüstriyel bir sistem boyutlarında incelenmiştir. Sistem boyutları olarak Topçam (2018) tarafından kullanılan geometri bazında çalışmalar yapılmıştır. Bu sistemde, sistem merkezine yerleştirilmiş olan PTFE boru çapı, daha önceki bölümlerde kullanıldığı gibi, 6 cm olarak planlanmış ve bu sistem içerisine karışmayı sağlayacak bir Arşimet vidasının yerleştirildiği varsayılmıştır (Şekil 3.20). Bu kapsamda yapılan ilk simülasyon çalışmasında 0.05 m/s giriş hızı kullanılarak 1 rpm - 1000 W parametreleri kullanılarak sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı, ürün sıcaklık değişimi ve üründe oluşan hız profili belirlenmiştir. Şekil 4.61, 4.62 ve 4.63 sırasıyla bu değişimler prosesin 90. saniyesinde gösterilmektedir. Kullanılan bu parametrelerde elde edilen sonuçlara göre sistem içerisinde özellikle sistem akışın gerçekleştiği boru duvarlarına yakın bölgelerde önemli sıcaklık artışları meydana gelmiştir. Ürünün sistem içerisine girdikten sonra karşı karşıya kaldığı dönme etkisi ise Şekil 4.63'de net olarak görülmektedir. Bu da, daha önce laboratuvar ölçekli sistemde alınan sonuçlarda da görüldüğü şekilde, ürünün sistem içerisinde direkt çıkışa yönelmek yerine kavisli bir yol çizdiğini buna bağlı olarak da sistem içerisinde kalış süresinin arttığını ve önemli sıcaklık yükselmelerinin ortaya çıktığını açıklamaktadır. Bu nedenle, Arşimet vidası kullanılmadan sadece boru duvarlarına uygulanacak dönme etkisinin ürün sıcaklık değişimine etkisinin belirlenmesi konusunda simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



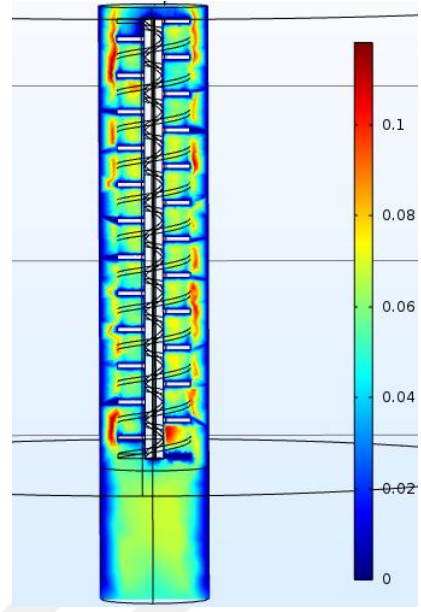
Şekil 4.61 Arşimet vidası ile modifiye edilmiş endüstriyel mikrodalga sistemde oluşan elektrik alan dağılımı ($V/m - t = 90s$)



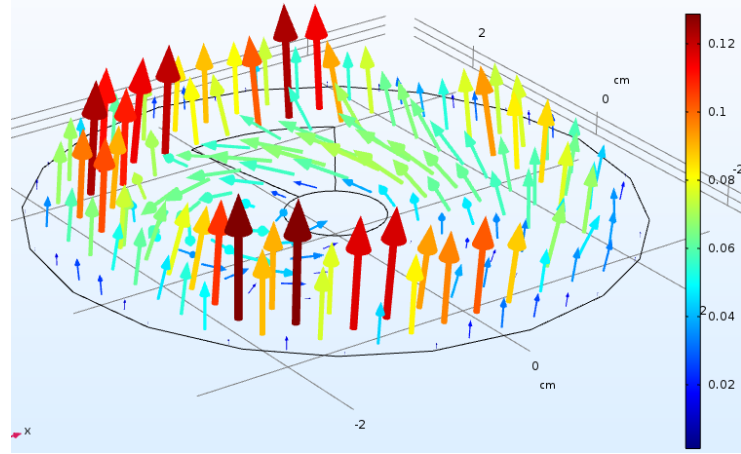
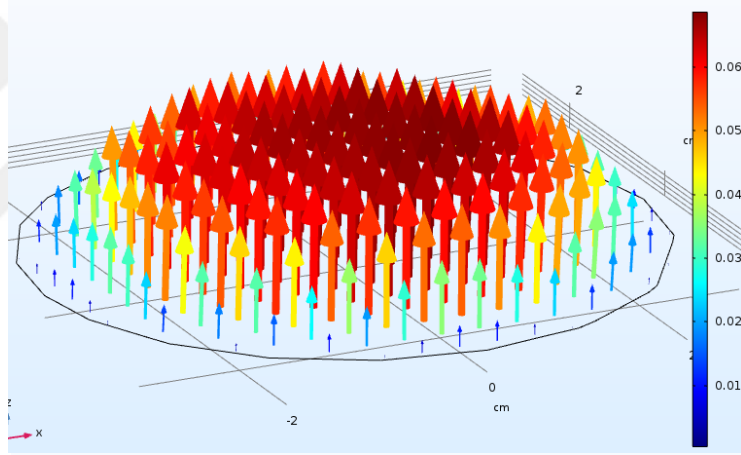
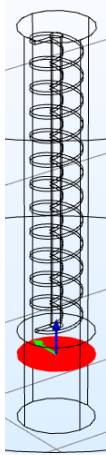
Şekil 4.62 Sistem farklı kesitlerinde ürün içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ($^{\circ}C - t = 90s$)



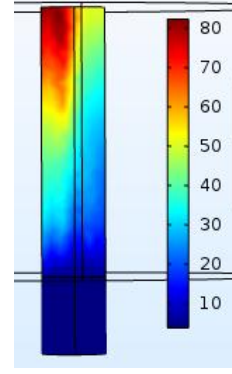
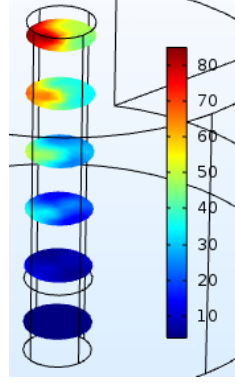
(a) Yatay kesit



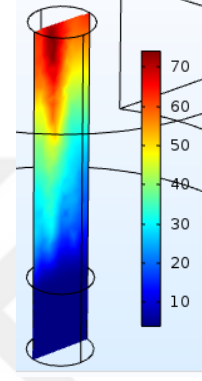
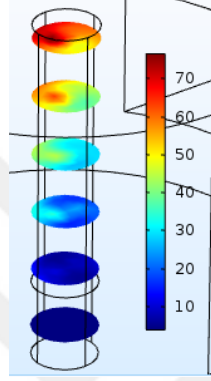
(b) Dikey kesit



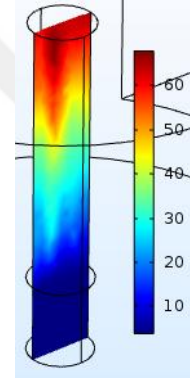
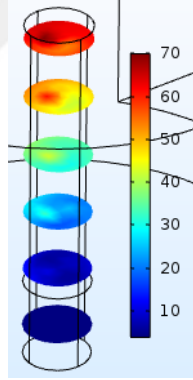
Şekil 4.63 Sistemin farklı kesitlerinde ürün içerisinde meydana gelen hız profili değişimi (m/s, $t=90s$)



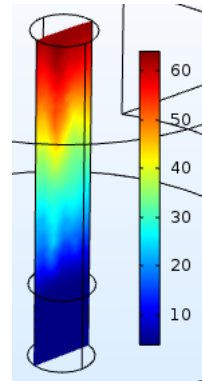
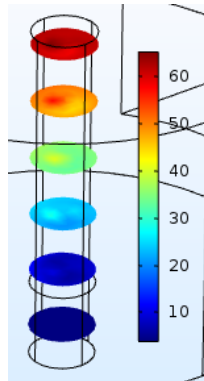
1 rpm



2.5 rpm



5 rpm

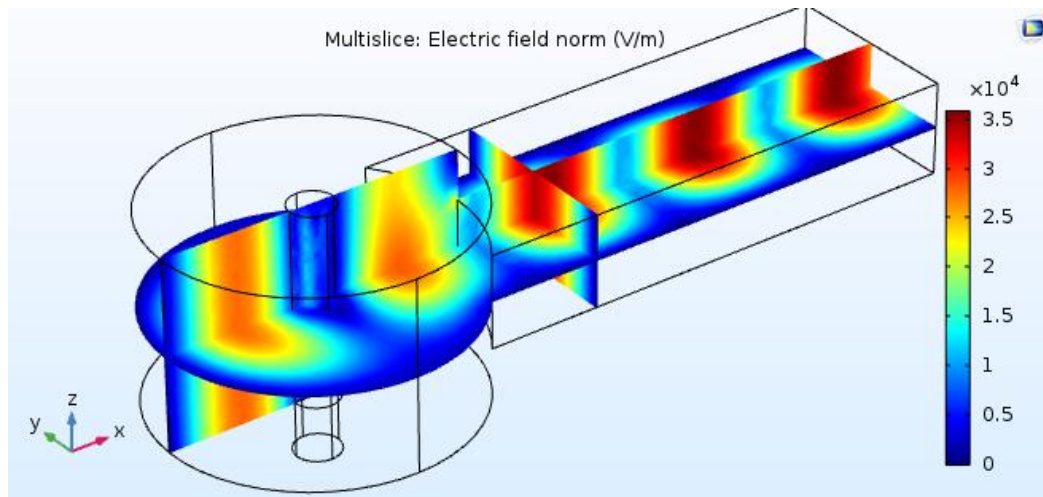


10 rpm

Şekil 4.64 8000 W güç - 0.015 m/s giriş hızı uygulanan endüstriyel mikrodalga sistemde boru dönüş hızının üründe oluşan sıcaklık değişimine etkisi (°C – yatışkın koşul)

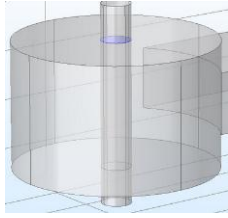
Boru duvarlarına uygulanacak dönme hızının sıcaklık değişimine etkisi kapsamında yapılan ön çalışmalarda kullanılan sistem boyutlarına göre 8000 W güç ve 0.015 m/s giriş hızı ile istenilen sıcaklık değişimlerinin elde edilebileceği saptanmıştır. Bu değerler kullanılarak boru duvarına uygulanan 1, 2.5, 5 ve 10 rpm dönme hızlarının ürün sıcaklık değişimine etkisi Şekil 4.64’de verilmiştir. . Bu sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı ise Şekil 4.65’de verilmektedir. Sistem çıkışında elde edilen yüzey ortalama ve maksimum – minimum sıcaklık değerleri arasındaki farklar Çizelge 4.2’de verilmiş olup 2.5 rpm ve yukarısında uygulanan dönme etkisi ile ürün sıcaklığının tekdüze bir hal aldığı net olarak görülmektedir Dönme hızı arttıkça boru içerisinde meydana gelen inertia etkisiyle üründe meydana gelen karışma hızı artmakta ve bu da sistem çıkışında ürün sıcaklık dağılımının tekdüze olarak elde edilebilmesini sağlamaktadır. Şekil 4.66 – 4.69’da boru duvarlarına uygulanan farklı dönme hızlarının (2.5, 5 ve 10 rpm) ürün içerisinde oluşturduğu akış profillerine olan etkisi gösterilmiştir. Ayrıca gösterilen şekillerde uygulanan dönme hızının ürün içerisinde alınan bir kesitteki akış profiline olan etkisi açıkça ortaya çıkmaktadır. ,

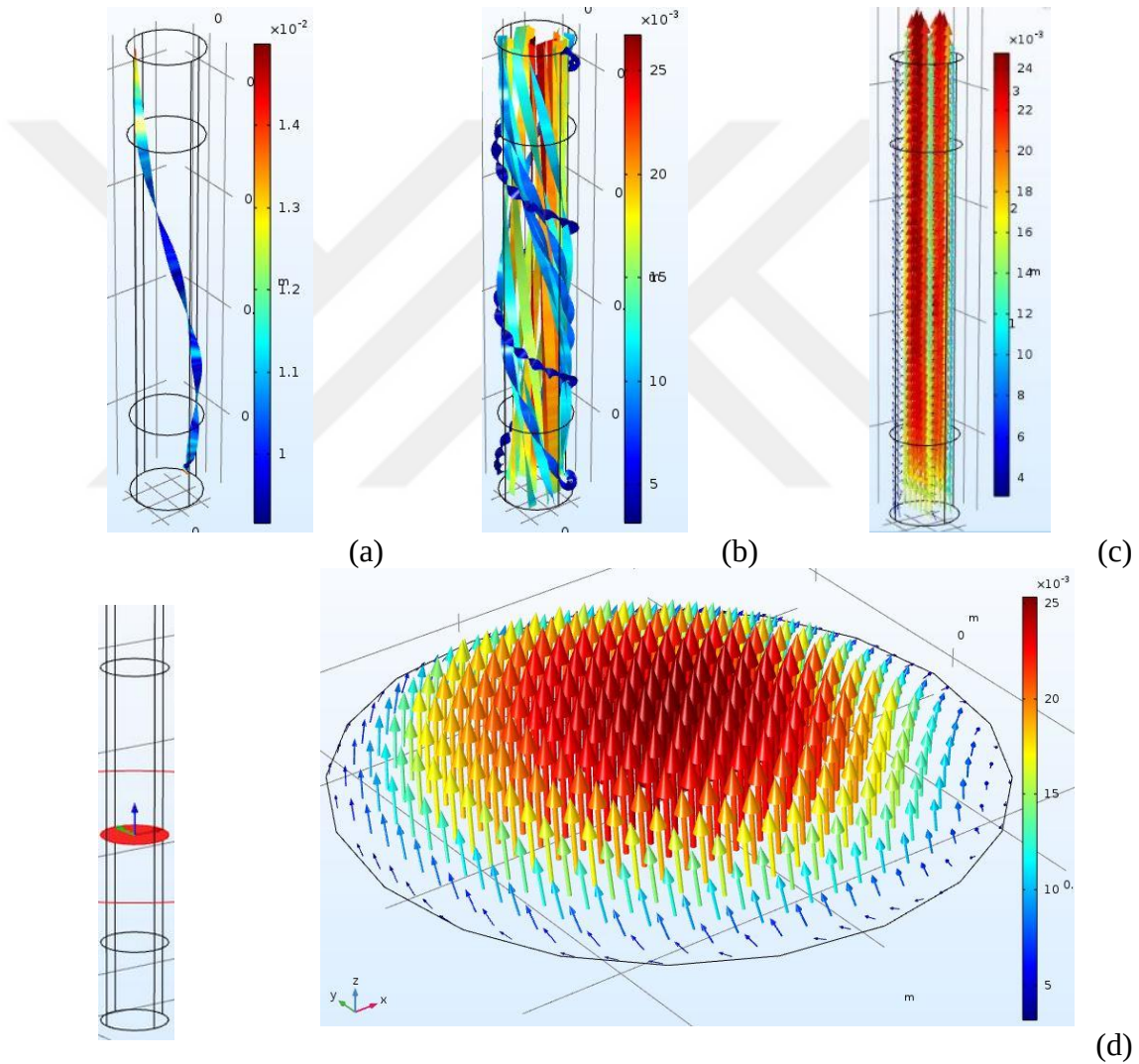
Endüstriyel bir proseste ise ürünün sistem çıkışından itibaren bir tutma tüpü ile istenilen PU değerine geritilebilmesi ya da uygun bir ambalaj malzemesine dolum yapıldıktan sonra istenilen PU değeri için EoE işleminin de uygulanabileceği bir prosese edilebilmesi önerilecek proses yenilikleri olarak düşünülebilir.



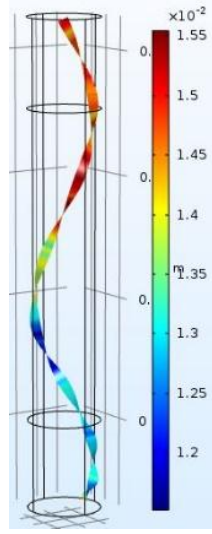
Şekil 4.65 Endüstriyel sistem içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı

Çizelge 4.2 Endüstriyel sistem tasarımında 8000 W güç ve 0.015 m/s giriş hızı kullanıldığı durumda boru dönme hızının sistem çıkışın ürün sıcaklık değişimine etkisi

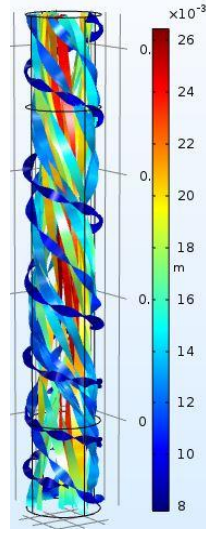
	Dönüş hızı (rpm)	T_{avg} (°C)	$T_{max}-T_{min}$
	0	70.13	67.63
	1	62.69	44.39
	2.5	62.83	25.22
	5	62.92	11.12
	10	63.05	3.91



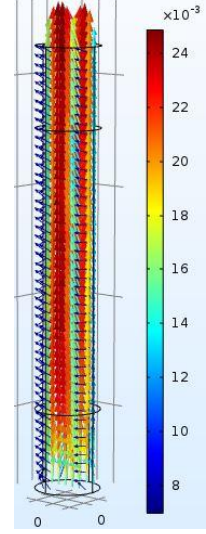
Şekil 4.66 Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 1 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeyel akış profili



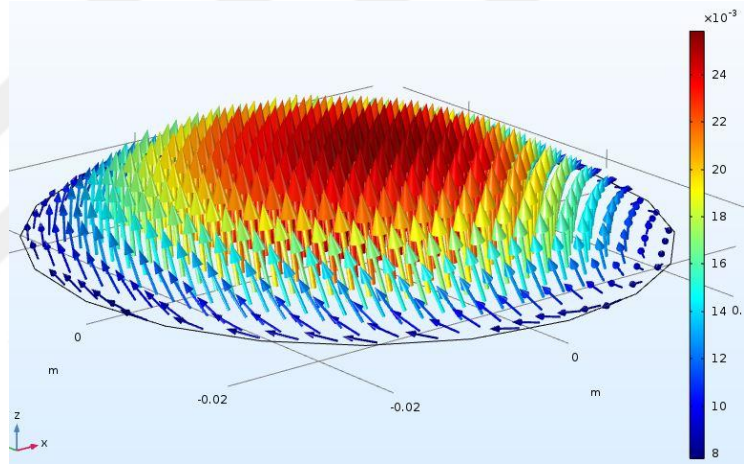
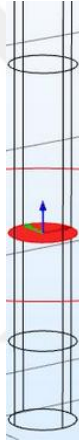
(a)



(b)

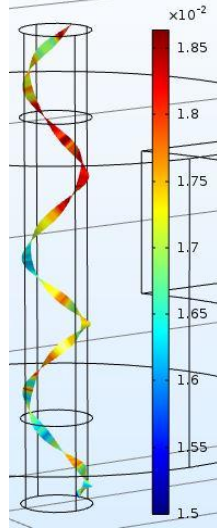


(c)

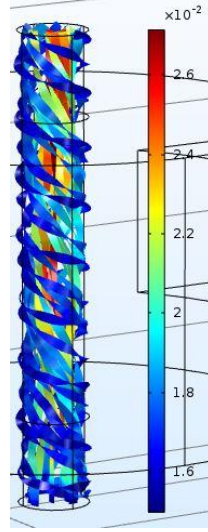


(d)

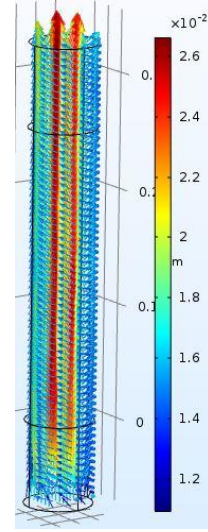
Şekil 4.67 Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 2.5 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeyel akış profili



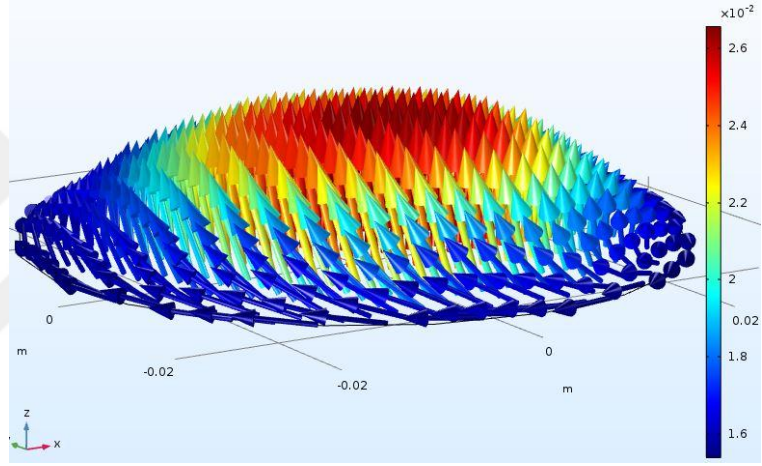
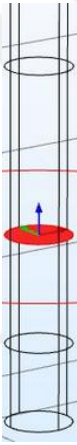
(a)



(b)

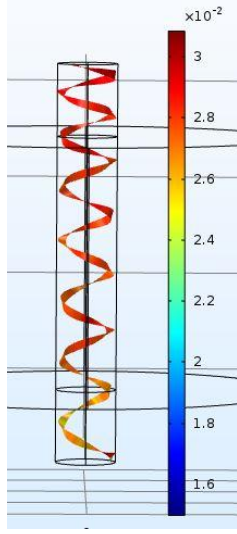


(c)

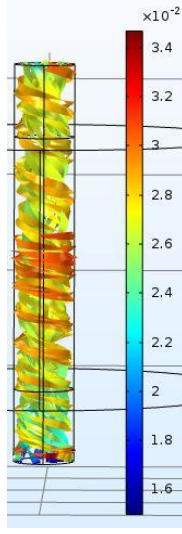


(d)

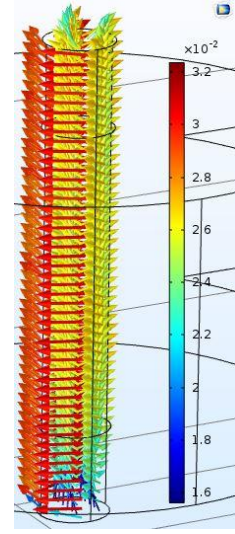
Şekil 4.68 Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 5 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeysel akış profili



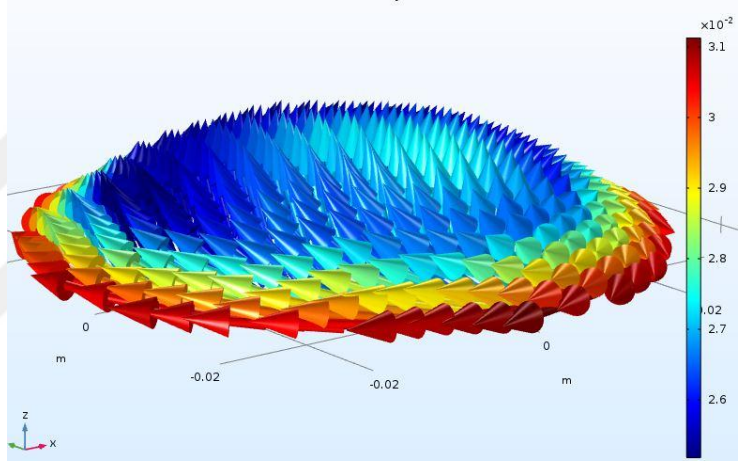
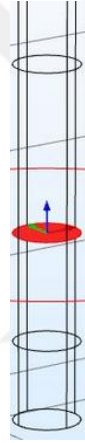
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.69 Endüstriyel proses koşullarında (8000 W – 0.015 m/s giriş hızı – 10 rpm) boru dönme hareketi sonucu sistem içerisinde oluşan akış profilleri; (a) sistem girişinden çıkışına 1-hat boyunca değişen akış profili, (b) sistem girişinden çıkışına 20-hat boyunca değişen akış profili, (c) sistem içerisindeki hacimsel akış profili, (d) sistem orta kesitinde (x-y) oluşan yüzeysel akış profili

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, bira endüstrisinde kullanılan tünel pastörizasyon ve hızlı pastörizasyon yöntemlerine alternatif olacak ya da bu yöntemlerle kombine biçimde kullanılabilecek dikey dönme (EoE) ve mikrodalga uygulama prosesleri sırasında ürün sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu modeller deneysel verilerle doğrulanarak farklı proses tasarım amacıyla kullanılmıştır. Mikrodalga uygulama kapsamında sürekli bir sistem içerisine yerleştirilebilecek olan bir Arşimet vidası ya da boru duvarlarına uygulanan dönme hareketi ile sağlanacak karıştırma etkisinin ürün sıcaklık değişimine etkisi de bu model kapsamında incelenmiştir.

Çalışma sırasında izlenen adımlar ve alınan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmektedir:

- Tünel pastörizasyon işleminin modellenmesi ve bira şişelerine uygulanan dikey-dönme hareketinin etkisinin belirlenmesinden önce matematiksel model geliştirme ve deneysel olarak doğrulama amacıyla bira şişesi geometrisinde sabit ve değişken sıcaklıklarda deneyler yapılmış ve elde edilen sıcaklık değişimleri model doğrulama amacıyla kullanılmıştır.
- Deneysel çalışmalar ile doğrulanan matematiksel model ayrıca literatür verileri de kullanılarak, tam bir tünel pastörizasyon prosesinde oluşan sıcaklık değişimi ve pastörizasyon değerini hesaplamak amacıyla doğrulanmıştır.
- Konvansiyonel tünel pastörizasyon işlemi sırasında ürüne uygulanacak dikey dönme – EoE hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisini belirlemek amacıyla farklı dönme hızları prosesin belli bir noktasından itibaren belli bir süre ile uygulanmış ve ürün sıcaklık değişimleri ve pastörizasyon değeri değişimleri hesaplanmıştır. Bu kapsamda konvansiyonel bir prosesten elde edilen proses sıcaklık ve zaman verileri kullanılarak ısıtma işlem süresinde aynı pastörizasyon değerini elde etmek kapsamında sağlanabilecek kısaltma süresi %10 olarak belirlenmiştir.
- Dikey dönme uygulaması sırasında özellikle 2.5 rpm ve üstü dönme hızlarında ürün içerisinde oluşan santrifüj kuvvetine bağlı karıştırma etkisinin doğal konveksiyonu baskıladığı ve ürün sıcaklık artışının yavaşladığı gözlenmiştir. Buna göre 1 rpm dönme hızı uygulaması ile ürün içerisinde karışma sağlandığı

ve doğal konveksiyonun da etkin bir şekilde ısı transferi mekanizması olarak rol oynadığı belirlenmiştir.

- Hızlı pastörizasyon uygulamalarına alternatif olabilecek inovatif bir yaklaşım amacıyla kullanılabilecek mikrodalga prosesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda 2450 MHz frekansta çalışan bir sistemde 350 W güç değeri ile deneyler yapılmıştır. Daha yüksek uygulanan güç değerlerinde bira içerisinde lokal ısınmalara bağlı olarak şiddetli bir köpürme olduğu gözlenmiştir. Bu sistemde gerçekleştirilen deneysel veriler kullanılarak geliştirilmiş olan matematiksel model doğrulama çalışmaları yapılmıştır.
- Mikrodalga uygulama sırasında ürün içerisinde oluşan lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin elimine edilebilmesi ve proses sırasında tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilmesi amacıyla kullanılan mikrodalga sistem bazında sürekli bir sistem geometrisi planlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle sistem içerisinde kullanılan ve akışın gerçekleştiği boru içerisine üründe karışmayı sağlayacak bir Arşimet vidası yerleştirilmiştir. Bu sistem içerisinde uygulanan dönme hızının 5 ve 10 rpm gibi değerler kullanıldığı durumda ürün sıcaklık dağılımına tekdüze edici bir etki sağladığı belirlenmiştir. Birada meydana gelecek köpürme problemine dayanarak daha yüksek dönme hızlarının etkisi proses tasarım çalışmaları kapsamında uygulanmamıştır. Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem kullanarak planlanan ve sürekli bir sistem varsayımıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında ürün içi sıcaklık dağılımı kapsamında en uygun sonuç 1 rpm dönüş hızına sahip 350 W güç uygulaması durumunda elde edilmiş ve ürün sıcaklık değişiminde kullanılan giriş hızının önemli bir etkisi olmadığı gösterilmiştir. Bu koşullarda ürün sıcaklığının, sistem çıkışında 30 °C'ye (konvansiyonel sistemlerde ön ısıtma bölümü – 960 s - sonucunda ürünün ulaştığı sıcaklık değeri) ulaşması 150 s sürmüştür. Arşimet vidası etkisi ile dönme uygulaması olmadan yapılan çalışmalarda ise aynı sürede aynı sıcaklık değerine ulaşılması için gerekli güç kullanım değeri 1000 W olarak belirlenmiştir. Ayrıca, böyle yüksek bir güç kullanımı durumunda ürün içerisinde lokal olarak yüksek sıcaklık bölgelerinin oluştuğu da belirlenmiştir.. Bu değerler mikrodalga uygulamanın, konvansiyonel sistemlerde kullanılan ön ısıtma işlem bölümü amacıyla kullanılarak istenilen sıcaklık değerine çok daha kısa bir

sürede ulaşılabilirliğini göstermektedir. Bu kapsamda, mikrodalga uygulamanın konvansiyonel proste ön ısıtma işlem bölümü yerine kullanılması ile proses süresinden %83.3 gibi bir oranda kısaltma sağlanabilecektir.

- Endüstriyel skalada planlanan çalışmalarda sistem boyutları olarak Topçam (2018) tarafından kullanılan geometri bazında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu endüstriyel sistemde öncelikle sistem merkezine yerleştirilmiş olan PTFE boru içerisine karışmayı sağlayacak bir Arşimet vidası yerleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk simülasyon çalışmasında 0.05 m/s giriş hızı kullanılarak 1 rpm - 1000 W parametreleri kullanılmış. Elde edilen sonuçlara göre sistem içerisinde özellikle sistem akışın gerçekleştiği boru duvarlarına yakın bölgelerde, 1 rpm dönme hızı ile elde edilen karışmaya rağmen, önemli sıcaklık artışları meydana gelmiştir. Daha önce laboratuvar ölçekli sistemde alınan sonuçlarda da görüldüğü üzere, ürünün sistem içerisinde direkt çıkışa yönelmek yerine kavisli bir yol çizmesi ve buna bağlı olarak sistem içerisinde kalış süresinin artması ürün içerisinde önemli sıcaklık artışlarına neden olmaktadır. Bu nedenle, Arşimet vidası kullanılmadan sadece boru duvarlarına uygulanacak dönme etkisinin ürün sıcaklık değişimine etkisinin belirlenmesi konusunda simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Bu kapsamda boru duvarlarına uygulanacak dönme hızının sıcaklık değişiminin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan ön çalışmalarda kullanılan sistem boyutlarına bağlı olarak 8000 W güç ve 0.015 m/s giriş hızı ile istenilen sıcaklık değişimlerinin (sistem çıkışında ürünün pastörizasyon sıcaklığı elde edebilmek için 60 °C'nin üzerine çıkması hedeflenmiştir) elde edilebileceği saptanmıştır. Bu değerler kullanılarak boru duvarına uygulanan 1, 2.5, 5 ve 10 rpm dönme hızının ürün sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir. Dönme hızı arttıkça boru içerisinde meydana gelen santrifüj kuvvetleri etkisiyle üründe meydana gelen karışma hızı artmış ve bu da sistem çıkışında ürün sıcaklık dağılımının tekdüze olarak elde edilebilmesini sağlamıştır. Arşimet vidası kullanılmadan, sadece sıvı ürün akışının gerçekleştiği boru duvarına uygulanan dönme hareketi ile en iyi sonuç kullanılan en yüksek dönme hızı olan 10 rpm değerinde elde edilmiştir. Topçam (2018) tarafından sıvı ürünlerde 20 rpm gibi dönme uygulamalarında çok daha iyi sonuçların elde edilebildiği belirlenmiş, ancak birada meydana

gelebilecek köpürme problemi nedeniyle 10 rpm'in üzerindeki değerler bu tez çalışması kapsamında kullanılmamıştır.

- Boru duvarına 10 rpm dönme etkisi uygulanması denemelerinde, 0.015 m/s giriş hızı ile sisteme giren bira örnekleri ≈ 22 s mikrodalga sistem içerisinde kalarak sistem çıkışında ortalama 63 °C değerine ulaşmışlardır. Bu durumda sistem çıkışında ürün içerisinde oluşan maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark 3.91 °C olmuştur. Bira pastörizasyonu için beklenen PU değerine (15-30 PU) ulaşmak için sistemden çıkan bira örneklerinin 60 °C'lik bir tutma borusunda 0.015 m/s akış hızı ile ≈ 20 dakika tutulduktan sonra 20 PU/dakika değerine ulaşacağı hesaplanmıştır. Böylelikle ≈ 1 saat süren konvansiyonel pastörizasyon işleminin yaklaşık ≈ 20 dakikada tamamlanabileceği belirlenmiştir.
- Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar dahilinde geliştirilen inovatif bir yöntem olan mikrodalga sistemlerin bira pastörizasyonu için tek başına yeterli olmayabileceği, ancak kombine sistemler için oldukça elverişli bir yöntem olduğu belirlenmiştir.
- Bu kapsamda mikrodalga sistemlerin ön ısıtma işlemi için kullanılabilmesi ve sonrasında dolum gerçekleştirilip EoE dönme işlemi ile daha kısa sürede proses edilebilmesinin ürün duyusal ve tat kayıplarını engelleyebileceği anlaşılmıştır.
- Bu kapsamda, tez sonuçlarına ek olarak, aroma – duyusal değişimlerin kinetik sabitlerin bilinmesi ile bir proses optimizasyon çalışmasının yapılmasının bira endüstrisine önemli bir veri sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Augusto, P.E.D., Pinheiro, T.F. ve Cristianini, M. 2010. Using computational fluid-dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30, 980-986.
- Bailey, R.T. ve Elban, W.L. 2011. Thermal performance of aluminum and glass beer bottles. *Heat Transfer Engineering*, 29, 643-650.
- Barigou, M., Mankad, S. ve Fryer, P.J. 1998. Heat transfer in two-phase solid-liquid food flows. A review. *Food and Bioproducts Processing*, 76, 3-29.
- Basak, T. ve 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, 932-944.
- Bhuvaneswari, E. ve Anandharamakrishnan, C. 2014. Heat transfer analysis of pasteurization of bottled beer in a tunnel pasteurizer using computational fluid dynamics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 23, 156-163.
- Bradshaw, S. M., Van Wyk, E. J. ve 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, 201-210.
- Brandon, H., Gardner, R., Huling, J. ve Staack, G. 1984. Time-dependent modeling of in-package pasteurization. *MBAA Technical Quarterly*, 21, 153-159.
- Briggs, D.E., Boulton, C.A., Brookes, P.A. ve Stevens, R. 2004. *Brewing science and practice*. Woodhead Publishing in Food Science and Technology.
- Buzrul, S. 2007. A suitable model of microbial survival curves for beer pasteurization. 2007. *LWT – Food Science and Technology*, 40, 1330-1336.
- Buzrul, S., Alpas, H ve Bozoğlu, F. 2005. Effect of high hydrostatic pressure on quality parameters of lager beer. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 1672-1676.
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, S., Turk, M., Perino, S., Fabriano-Tixier, A.S. ve Abert-Vian, M. 2017. Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 357-377.

- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.G., Meullemiestre, A., Fabriano-Tixier, A.S. ve Abert-Vian, M. 2017. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560.
- Dagan, G.F. ve Balaban, M.O. 2006. Pasteurization of beer by a continuous dense-phase CO₂ system. *Journal of Food Science*, 71, 164-169.
- 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.
- Deng, Y., Bi, H., Yin, H., Yu, J., Dong, J., Yang, M. ve Ma, Y. 2018. Influence of ultrasound assisted thermal processing on the physicochemical and sensorial properties of beer. *Ultrasonic Sonochemistry*, 40, 166-173.
- Dilay, E., Vargas, J.V.C., Amico, S.C. ve Ordonez, J.C. 2006. Modeling, simulation and optimization of a beer pasteurization tunnel. *Journal of Food Engineering*, 77, 500-513.
- Evrendilek, G.A., Dantzer, S.LI.W.R. ve Zhang, Q.H. 2004. Pulsed electric field processing of beer: microbial, sensory, and quality analyses. *Journal of Food Science*, 69, 228- 232.
- Franchi, M.A., Tribst, A.A.L. ve Cristianini, M. 2011. Effects of high pressure homogenization on beer quality attributes. *Journal of the Institute of Brewing*, 117, 195-198.
- Fricker, R. 1984. The flash pasteurization of beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 90, 146-152.
- Gad, A ve Jayaram, S.H. 2015. Processing of carbonated beer by pulsed electric fields. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51, 4759-4765.
- Hebbar, H. U. ve 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.
- Hoover, D.G. 1998. High-pressure pasteurization. San Antonio, Tex. *Activities Rep R & D Assoc* 49/50:294-6.
- Horn, C.S., Franke, M. ve Blakemore, F.B. 1997. Modelling and simulation of pasterurization and staling effects during tunnel pasteurization of bottle beer. *Transactions of the Instituion of Chemical Engineers*, 75, 23-33.

- Khan, S., Amares, Keshavalu ve Ghosh, S. 2017. Dense phase carbon dioxide: an emerging non thermal technology in food processing. *Physical Science International Journal*, 16, 1-7.
- Laero, C., Fryer, P.J. ve Barigou, M. 1997. The fluid mechanics of two-phase solid-liquid food flows: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 105, 75-73.
- Lewicki, P.P., Walczak, W. ve Goss, B. 1983. Heat transfer in a tunnel pasteuriser. Part i. Factors affecting the rate of heating of liquid in a bottle. *Journal of Food Engineering*, 2, 309-322.
- Liu, S., Fukuoka, M. ve Sakai, N. 2013. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 115, 49-62.
- Lu, G., Li, C., Liu, P., Cui, H., Yao, Y. ve Zhang, Q. 2010. UV inactivation of microorganisms in beer by a novel thin-film apparatus. *Food Control*, 21, 1312-1317
- Mello, P. A., Barin, J. S. ve Guarnieri, R. A. 2014. Microwave heating. In: microwave-assisted sample preparation for trace element analysis. Flores, E. M. M.(ed), Elsevier, 59-75, USA.
- Mertens, B. ve Knorr, D. 1992. Developments of nonthermal processes for food preservation. *Food Technology*, 46, 124-133.
- Metaxas, A. C. 1991. Microwave heating. *Power Engineering Journal*, 5, 237-247.
- Metaxas, A. C., ve Meredith, R. J., 1983. Industrial microwave heating. Peter peregrinus, 357, London.
- Mezui, A.M. ve Swart, P. 2010. Effect of UV-C disinfection of beer-sensory analyses and consumer ranking. *Journal of the Institute of Brewing*, 116, 348-353.
- Milani, E.A., Alkhafaji, S. ve Silva, F.V.M. 2015. Pulsed electric field continuous pasteurization of different types of beers. *Food Control*, 50, 223-229.
- Milani, E.A., Ramsey, J.G. ve Silva, F.V.M. 2016. High pressure processing and thermosonication of beer: Comparing the energy requirements and *Saccharomyces cerevisiae* ascospores inactivation with thermal processing and modeling. *Journal of Food Engineering*, 18, 35-41.
- Milani, E.A. ve Silva F.V.M. 2017. Ultrasound assisted thermal pasteurization of beers with different alcohol levels: Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* ascospores. *Journal of Food Engineering*, 198, 45-53.

- Nasrollahzadeh, F., Varidi, M., Koocheki, A. ve 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.
- Pedreño-Molina, J. L., Monzó-Cabrera, J. ve 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, 142-152.
- Plaza-Gonzalez, P., Monzó-Cabrera, J., Catalá-Civera, J. M. ve 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, 1672-1678.
- Sakamoto, K ve Konings, W.N. 2003. Beer spoilage bacteria and hop resistance. *International Journal of Food Microbiology*, 89, 105-125.
- Sarghihi, F., De Vivo, A. ve Erdoğdu, F. 2017. Analysis of heat and momentum transfer in screw-driven heat transfer systems. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 2017.
- Sarghini, F. ve Erdoğdu, F. 2016. A computational study on heat transfer characteristics of particulate canned foods during end-over-end rotational agitation: Effect of rotation rate and viscosity. *Food and Bioprocess Technology*, 100, 496-511.
- Topçam, H. 2018. Mikrodalga uygulama ile ısıtma işlemi sırasında sıvı ürünlerin sıcaklık değişimi ve sıcaklığın tekdüzeliği üzerine ürün dönme hızı ve viskozitesinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018.
- Topçam, H., Karataş, O., Erol, B. ve Erdoğdu, F. 2020. Effect of rotation on temperature uniformity of microwave processed low – high viscosity liquids: a computational study with experimental validation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, Kabul aşamasında.
- Wei, W., Yin, H. M. ve Tang, J. 2012. An optimal control problem for microwave heating. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 75, 2024-2036.
- Yeom, H.W., Streaker, C.B., Zhang, Q.H. ve Min, D.B. 2000. Effects of pulsed electric fields on the quality of orange juice and comparison with heat pasteurization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 4597-4605.

- Yin, H., Dong, J., Yu, J., Chang, Z., Qian, Z., Liu, M., Huang, S., Hu, X., Liu, X., Deng, Y. ve Wang, D. 2016. A preliminary study about the influence of high hydrostatic pressure processing on the physicochemical and sensorial properties of a cloudy wheat beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 122, 462-467.
- Yousefi, T., Mousavi, S. A., Saghir, M. Z. ve Farahbakhsh, B. 2013. An investigation on the microwave heating of flowing water: A numerical study. *International Journal of Thermal Sciences*, 71, 118-127.
- Zhang, H. 2007. Electrical properties of foods. *Food Engineering*, 1, 110-119.
- Zhang, Q., Barbosa-Conavas, G.V. ve Swanson, B.G. 1995. Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 25, 261-281.
- Zhang, W., Liu, F., Nindo, C. ve Tang, J. 2013. Physical properties of egg whites and whole eggs relevant to microwave pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 118, 62-69.
- 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, 509-529.
- Zhu, J., Kuznetsov, A. V. ve 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.
- Zhu, H., Ye, J., Gulati, T., Yang, Y., Liao, Y., Yang, Y. ve Huang, K. 2017. Dynamic analysis of continuous-flow microwave reactor with a screw propeller. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1456-1461.
- Zufall, C. ve Wackerbauer, K. 2000. The biological impact of flash pasteurization over a wide temperature interval. *Journal of the Institute of Brewing*, 106, 163-168.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ozan KARATAŞ

Doğum Yeri : Bahçelievler / İSTANBUL

Doğum Tarihi : 01/01/1994

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Hürriyet Anadolu Lisesi (2012)

Lisans : Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü (2017)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği

Anabilim Dalı (Eylül 2017 – Aralık 2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

- 1- **Simplex Bilgi Teknolojileri A.Ş.** – Gıda Mühendisi (Haziran 2018 – Temmuz 2019)
- 2- **İstanbul Halk Ekmek** – Stajyer (Ağustos 2016 – Eylül 2016)
- 3- **Università Degli Studi Di Salerno, Italy**, Endüstri Mühendisliği Bölümü Erasmus Staj Programı Proje: COMSOL Multiphysics v.5.0 programı ile “Gıdaların radyofrekans sisteminde ısınmasının modellenmesi” (Haziran 2015 – Eylül 2015)
- 4- **Orta Doğu Teknik Üniversitesi**, Gıda Mühendisliği Bölümü - Stajyer Bioproses Laboratuvarı (Temmuz 2014 – Ağustos 2014)

Uluslararası Yayınlar:

- 1- Erdogdu, F., **Karatas, O.** and Sarghini, F. 2018. A Short Update on Heat Transfer Modelling for Computational Food Processing. Current Opinion in Food Science, 23, 113-119.
- 2- Erdogdu, F., **Karatas, O.** And Sarghini, F. 2019. Computational Evaluation of Reciprocally Agitated End-over-End (RA-EoE) Processing of Canned Food Products. Chemical Engineering Transactions, 74, 535-540.

Sunumlar:

- 1- **Karatas, O.**, Erdogdu, F., Marra, F. 2018. "Computational strategies for temperature uniformity during radio frequency heating/thawing: product – electrode movement for an industrial process scale-up," 32nd EFFoST International Conference, Nantes, France, 2018. **Sözlü Sunum ve Poster Sunumu,**
- 2- 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 effect," 32nd EFFoST International Conference, Nantes, France, 2018. **Poster Sunumu,**
- 3- Altuntas, H., **Karatas, O.**, Uyar, R., Erdogdu, F. 2018. "Mathematical Modeling of Infrared Heating for Process Design," 13. International Conference of Food Physicists, Antalya, Turkey, 2018. **Poster Sunumu,**
- 4- 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," 13. International Conference of Food Physicists, Antalya, Turkey, 2018. **Sözlü Sunum,**
- 5- **Karatas, O.**, Erol, B., Celik, S.Y. and Erdogdu, F. 2017. "Microwave (MW) decrystallization of pine honey: mathematical modelign for optimal process conditions," 31st EFFoST International Conference, Sitges, Spain, 2017. **Sözlü Sunum,**

- 6- 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,” 31st EFFoST International Conference, Sitges, Spain, 2017. **Sözlü Sunum**

Alınan Ödüller

- 1- **2018 - Yılın Yüksek Lisans Öğrencisi Ödülü** – 1.lik Ödülü, 32nd EFFoST International Conference, 6-8 Kasım 2018 | Nantes, France
- 2- **En iyi Poster Sunumu Ödülü**, 13. International Conference of Food Physicists, 25-25 Ekim 2018 | Antalya - Turkey