

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAVUK KARKASLARINDA MİKRODALGA UYGULAMA İLE
CAMPYLOBACTER JEJUNİ HEDEFLİ YÜZEY DEKONTAMİNASYON
PROSES TASARIMI İÇİN SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Ezgi SON

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2021

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TAVUK KARKASLARINDA MİKRODALGA UYGULAMA İLE *CAMPYLOBACTER JEJUNİ* HEDEFLİ YÜZEY DEKONTAMİNASYON PROSES TASARIMI İÇİN SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Ezgi SON

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Campylobacter jejuni, tavuk karkaslarında gıda güvenliği konusunda önemli bir problem olup gastroenteritin en önemli sebeplerinden biridir. Tüm dünyada insanlardaki akut campylobacteriosis salgınlarının ortaya çıkmasında, kanatlı etleri özellikle de tavuk eti ve ürünleri başlıca enfeksiyon kaynağını oluşturmaktadır. Bu kapsamda campylobacteriosis salgınlarını engellemek adına farklı çalışmalar yapılmış fakat ürünün tekstürünün bozulması, duysal kalite kaybı ve lokal sıcaklık artışı gibi çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır.

Bu çalışmada, bahsedilen sorunlar yaşanmadan tavuk karkaslarındaki *Campylobacter jejuni* sorununun engellenmesi amacıyla mikrodalga proses uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ancak mikrodalga uygulama sırasında literatürde de belirtilen lokal ısınma ve ürün yüzeyi yanında iç kısmında da meydana gelen sıcaklık artışı engellemek amacıyla ürün yüzeyine NaCl çözeltisi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda ürün yüzeyi dielektrik özellikleri değiştirilerek sınırlanan penetrasyon derinliğinin azaltılması ve mikrodalga uygulamanın sadece ürün yüzeyinde gerçekleştirilmesi yolu ile yüzey dekontaminasyon uygulaması planlanmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde matematiksel model geliştirme ve deneysel doğrulama çalışmaları tamamlanmıştır. Ayrıca %1, 2 ve 4 konsantrasyonundaki NaCl çözeltisinin ürün yüzeyinin mikrodalga uygulaması sırasında sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir. Daha sonra gerçekçi bir tavuk geometrisi ile silindirik ve dikdörtgensel mikrodalga kaviterde endüstriyel ölçekte modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Silindirik kavite için 915 ve 2450 MHz frekans, dikdörtgensel kavite için ise 2450 MHz frekans kullanılmıştır.

Bu çalışmalarda tavuk karkasının but geometrisi içerip içermemesi ve kavite içerisindeki konumunun sıcaklık dağılımına etkisi belirlenmiş ve lokal sıcaklık artışlarını elimine edebilmek amacıyla kavite içerisinde su akışı ve vurgulu hava jeti uygulaması gibi yenilikçi yaklaşımlar denenmiştir. Sonuç olarak farklı proses uygulamaları sonucunda tavuk karkası yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimine bağlı olarak *C.jejuni* konsantrasyonunda meydana gelen azalmalar belirlenmiş ve yüzey dekontaminasyonu kapsamında 3 ve 5 log evrelilik azalmalar için gerekli proses süreleri hesaplanmıştır. Ürün yüzeyinde meydana gelen yerel sıcaklık artışlarının engellenmesi amacıyla proses sırasında ürüne dönme işleminin uygulanması gerekliliği de geliştirilen model çalışmaları kapsamında belirlenmiştir.

Ocak 2021, 119 sayfa

Anahtar Kelimeler: Simülasyon, yüzey dekontaminasyonu, matematiksel modelleme, *Campylobacter jejuni*

ABSTRACT

Master Thesis

A SIMULATION STUDY FOR SURFACE DECONTAMINATION OF CHICKEN CARCASSES TARGETING *CAMPYLOBACTER JEJUNI* USING MICROWAVE PROCESSING

Ezgi SON

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Campylobacter jejuni is a significant food safety problem in chicken carcasses and is one of the most important causes of human gastroenteritis. In the emergence of acute campylobacteriosis outbreaks all over the world, poultry meat, especially chicken meat and its products are considered to be a main source of this infection. For this reason, various literature studies have been carried out to prevent campylobacteriosis outbreaks. However, various problems such as deterioration of the texture of the product, loss of sensory quality and local temperature increases over the product surface have been observed.

In this study, microwave process was applied to prevent the *C. jejuni* problem for chicken carcasses for a surface decontamination objective. To prevent the volumetric heating feature of the microwave application and to obtain a surface heating – decontamination, NaCl solutions were applied over the surface. This application led to change of the dielectric properties by reducing the penetration depth of the electromagnetic wave. To demonstrate this approach, first a mathematical model development study was carried out in a lab scale microwave system, and experimental validation studies were completed in a chicken carcass like elliptical geometry. Then, NaCl concentration (1, 2 and 4%) effects were determined on the surface and volumetric average temperature change. Following this validation studies, mathematical modeling studies were carried out with chicken geometry in cylindrical and rectangular industrial scale system microwave cavities. 915 and 2450 MHz frequencies were used for the cylindrical cavity with 2450 MHz for the rectangular cavity. The latter case included 4 magnetrons through a tunnel geometry to enable the process of more than 1 product simultaneously. With and without the thigh on the carcass, geometrical and location effects on the temperature change were determined. Due to the observation of local unrequired temperature increases over the surface, air impingement and water flow inside the cavity were planned to modify the electromagnetic field distribution and uniform the temperature distribution. For all these cases, surface average temperature change of the chicken carcass was determined, and the required process time to enable 3 and 5 log cycle reduction in the *C.jejuni* was evaluated. All these studies indicated the requirement of a rotation process applied to the carcass through the process time to enable a surface temperature uniformity and prevent local temperature increases.

January 2021, 119 pages

Key Words: Simulation, surface decontamination, mathematical modeling, *Campylobacter jejuni*

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca gerek tez konum gerekse çalıştığım bütün konularda destek olan, kendimi geliştirerek geleceğime yatırım yapmam için yol gösteren, sabrı için minnet duyduğum danışmanım Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Çalışmalarım sırasında her zaman destek olan çalışma arkadaşlarım Ozan ALTIN, Ozan KARATAŞ, Hüseyin TOPÇAM ve Eda COŞKUN'a,

Attığım her adımda doğru ya da yanlış ayırt etmeden maddi ya da manevi her türlü desteklerini her zaman hissettiğim sevgili annem Asuman SON ve babam Mehmet SON'a,

Her daim yanımda olan, moral ve motivasyon kaynağım kardeşim Enes Egemen SON'a,

sonsuz teşekkür ederim.

Ezgi SON

Ankara, Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1 Gıda Güvenliği, Gıda Kaynaklı Patojen ve Hastalıklar	5
2.2 <i>Campylobacter jejuni</i>	7
2.3 Çiftlik Düzeyinde <i>Campylobacter jejuni</i> 'yi Önleme ve Azaltma Stratejileri.....	9
2.4 Kanatlı Eti Proses Aşamasında <i>Campylobacter jejuni</i> 'yi Önleme ve Azaltma Stratejileri.....	11
2.5 Yenilikçi Teknoloji Uygulama Stratejileri	14
2.6 Mikrodalga Uygulama	17
3. MATERYAL YÖNTEM	20
3.1 Deneysel çalışmalar	22
3.1.1 %2'lik agar kullanılarak yapılan deneyler	22
3.1.2 NaCl çözeltisi uygulanan tavuklarda tuz analizi.....	26
3.1.3 Dielektrik özellik ölçümleri	27
3.2 Matematiksel modelleme çalışmaları	29
3.2.1 Agar geometrisi kullanılarak hazırlanan matematiksel modeller.....	30
3.2.2 Tavuk geometrisi kullanılarak hazırlanan matematiksel modeller	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1 Dielektrik Özellik Ölçümleri.....	58
4.1.1 %2'lik agarın dielektrik özellikleri	59

4.1.2 NaCl çözeltisi uygulanmış tavuk but örneklerinin dielektrik özellikleri.....	59
4.2 NaCl çözeltisi uygulanan tavuklarda tuz konsantrasyonu analizi	61
4.3 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde matematiksel model geliştirme çalışmaları.....	61
4.3.1 Deneysel verilerle matematiksel model doğrulama çalışmaları.....	61
4.3.2 Ürün yüzeyindeki NaCl konsantrasyonunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi	68
4.4 Tavuk Geometrisi Kullanılarak Oluşturulan Matematiksel Modeller	75
4.4.1 Silindirik kavitede oluşturulan matematiksel modeller	75
4.4.2 Dikdörgensel kavitede oluşturulan matematiksel modeller	97
5. SONUÇ.....	109
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	119

SİMGELER

c	Işık hızı (2999792458 m/s)
cm	Santimetre
c_p	Özgül ısı (J/kg.K)
D	d-değeri (dk.)
Dk.	Dakika
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
F	Letalite
GHz	Giga Hertz
h	Isı transferi katsayısı (W/m ² .°C)
K	Kelvin
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.°C)
kob	Koloni oluşturan birim
m	Kütle (kg)
mL	Hacim (mililitre)
MHz	Mega Hertz
Q	Isı (J)
s	Saniye
S_{max}	Maksimum ağ boyutu
T	Sıcaklık(°C)
T_i	Başlangıç sıcaklığı (°C)
T_o	Çevre sıcaklığı (°C)
T_{ref}	Referans sıcaklık(K)
v	Hız (m/s)
W	Watt
z	z-değeri (°C)
$\vec{B}$	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
f	Frekans (Hz)
j	$\sqrt{-1}$
λ	Dalga boyu
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)

Kısaltmalar

MW	Mikrodalga
RF	Radyo frekans
NaCl	Sodyum Klorür

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 2010 – 2017 yılları arasında CDC’ye bildirilen <i>Campylobacter</i> kaynaklı salgınlara neden olan gıdaların dağılımı	7
Şekil 2.2 Farklı sürelerde ve sıcaklıklarda prosesten sonra <i>C. jejuni</i> sayımlarındaki (log10 kob / g) (n = 9, ± standart sapma) ortalama azalmalar	15
Şekil 2.3 2450 MHz mikrodalga fırında ısıtılan tavuk göğsünün proses sonu yüzey sıcaklıkları	16
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalar için kullanılan LG MS2022D model ev tipi mikrodalga fırın	23
Şekil 3.2 Deneysel çalışmalar için hazırlanan %2 agar çözeltisinin şekil alması için kullanılan polipropilen kap (a), hazırlanan agar çözeltisinin katı formu (b) ..	24
Şekil 3.3 (a) Fiso-UMI sıcaklık veri toplama sistemi ve (b) Fiber optik prob	24
Şekil 3.4 Deneyler sırasında mikrodalga sistem içerisine yerleştirilen %2’lik agar	25
Şekil 3.5 Agar çözeltisi ile yapılan deneylerde sıcaklık verilerinin alındığı noktalar ...	25
Şekil 3.6 Tuz analizi için gastronom küvete yerleştirilmiş tavuk but örneği	27
Şekil 3.7 Dielektrik özellikleri ölçmek amacıyla kullanılan cihaz	28
Şekil 3.8 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemin matematiksel modelleme için hazırlanan geometrik yapısı	31
Şekil 3.9 Mikrodalga sisteme ait dur-kalk döngüsü (a) deney 1, (b) deney 2, (c) deney 3.	32
Şekil 3.10 Matematiksel modelleri doğrulama çalışmaları kapsamında mikrodalga sistem içerisine yerleştirilen %2’lik agar	33
Şekil 3.11 Agar ve NaCl çözeltisine ait geometrik yapı	35
Şekil 3.12 Tez kapsamında hazırlanan tavuk geometrileri	37
Şekil 3.13 Tavuk karkas ana gövdesi geometrik yapısı	38
Şekil 3.14 Tez kapsamında hazırlanan dış yüzeyinde belirli bir NaCl konsantrasyonuna sahip (a) kanat kısmı çıkarılmış (b) kanat ve but kısmı çıkarılmış tavuk karkas geometrisi	38
Şekil 3.15 Silindirik kavite mikrodalga sistem geometrisi	42
Şekil 3.16 915 MHz frekansta oluşturulan modellerin özeti	45

Şekil 3.17 Oluşturulan farklı sistemlere ait ağ yapısı	57
Şekil 4.1 %2 Agar çözeltisi kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması	63
Şekil 4.2 Deney 2 ve 3 için oluşturulan modellerde elektromanyetik alan.....	65
Şekil 4.3 Deney 1, 2 ve 3 için oluşturulan modellerde ürün yüzey sıcaklık dağılımı.....	66
Şekil 4.4 Deney 1, 2 ve 3 için oluşturulan modellerde alınan bir kesitte yüzey sıcaklık dağılımı	67
Şekil 4.5 % 1, % 2 ve % 4 NaCl çözelti katmanlarının hacimsel ortalama sıcaklıkları..	69
Şekil 4.6 Yüzeyi % 1, % 2 ve % 4 NaCl çözeltisi ile kaplanmış % 2'lik agarın hacimsel ortalama sıcaklığı.....	69
Şekil 4.7 Proses süresince elde edilen yüzey ortalama sıcaklıkları ..	70
Şekil 4.8 %1, %2 ve %4 NaCl içeren çözeltilerin penetrasyon derinliği	71
Şekil 4.9 NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modellerde elektromanyetik alan dağılımı (V/m)	72
Şekil 4.10 NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modellerde proses sonu ürün yüzey sıcaklık dağılımı (°C).....	73
Şekil 4.11 NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modellerde proses sonu ürünün bir kesitinde sıcaklık dağılımı (°C)	74
Şekil 4.12 Silindirik kavite 915 MHz frekansta tavuk karkasının konumu ve but geometrisinin elektromanyetik alana etkisi (V/m).....	76
Şekil 4.13 Dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları.....	77
Şekil 4.14 Proses sonunda zx- ekseninde alınan bir kesitte sıcaklık dağılımları	79
Şekil 4.15 Proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımları	80
Şekil 4.16 Proses boyunca vurgulu hava jeti içermeyen, 4 °C hava üflenene ve ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenene modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları	82
Şekil 4.17 Proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımları (°C).....	83
Şekil 4.18 Proses sonu ürün yüzey sıcaklık dağılımları (°C).....	84
Şekil 4.19 Su akışı bulunmayan (a) ve bulunan sistemde (b) elektromanyetik alan dağılımı (V/m).....	85
Şekil 4.20 Sisteme su akışı ilave edilmesi ile dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim	

ortalama (b) sıcaklıkları.....	86
Şekil 4.21 Su akışı bulunmayan (a) ve bulunan sistemde (b) zx- ekseninde orta kesitte sıcaklık dağılımı (°C)	87
Şekil 4.22 Su akışı bulunmayan (a) ve bulunan sistemde (b) proses sonu ürün yüzey sıcaklık dağılımı (°C).....	88
Şekil 4.23 Dış katmana farklı dielektrik özelliklerin tanımlandığı modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları	90
Şekil 4.24 Dış katmana %2 NaCl çözeltisinin (a), herhangi bir işlem uygulanmamış tavuk derisinin (b) ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk but derisinin (c) dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C)..	90
Şekil 4.25 Dış katmana %2 NaCl çözeltisinin (a), tavuk derisinin (b) ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk but derisinin (c) dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile proses sonu yüzey sıcaklık dağılımı (°C)	92
Şekil 4.26 Silindirik kavitede 2450 MHz frekansta çalışan sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı (V/m).....	95
Şekil 4.27 Silindirik kavitede 2450 MHz frekans ile çalışan sistem için oluşturulan modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları.....	95
Şekil 4.28 Silindirik kavitede 2450 MHz frekansta çalışan sistem içerisinde proses edilen tavuk karkasının proses sonu yüzey sıcaklık dağılımı (°C)	96
Şekil 4.29 Silindirik kavitede 2450 MHz frekansta çalışan sistem içerisinde proses edilen tavuk karkasının proses sonu alınan bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C)97	
Şekil 4.30 Dikdörtgensel kavitede oluşan elektromanyetik alan dağılımı (V/m).....	98
Şekil 4.31 Dikdörtgensel kavite için oluşturulan modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları	99
Şekil 4.32 Dikdörtgensel kavitede proses edilen tavuk karkaslarının proses sonu alınan bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C).....	101
Şekil 4.33 Dönme hareketinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi (°C).....	102
Şekil 4.34 Mikrobiyal yükte 5 logaritmik evre azalma görülebilmesi için çeşitli sistemlerde proses süresi.....	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 ABD’de 2017 yılında gıda kaynaklı hastalık salgınları, salgınla ilişkili hastalıklar ve hastaneye yatışlar (CDC 2017)	6
Çizelge 2.2 Tavuk etinde izole edilen <i>C. jejuni</i> için belirlenmiş olan D- ve z-değerleri...	9
Çizelge 3.1 915 MHz frekansta % 2 (w/w) NaCl çözeltilerinin dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	35
Çizelge 3.2 2450 MHz frekansta %1, %2 ve %4 (w/w) NaCl çözeltilerinin dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi	36
Çizelge 3.3 2450 MHz frekansta tavuk göğsüne ait sıcaklıkla değişen dielektrik özellikler.....	38
Çizelge 3.4 915 MHz frekansta tavuk göğsüne ait sıcaklıkla değişen dielektrik.....	39
Çizelge 3.5 Çözümler sırasında kullanılan başlangıç koşulları	51
Çizelge 3.6 Çözümler sırasında kullanılan sınır koşulları	51
Çizelge 3.7 Laboratuvar ölçekli sistem için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri	53
Çizelge 3.8 But geometrisi içeren ve içermeyen modeller için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri	54
Çizelge 3.9 Sisteme vurgulu hava jeti ve su akışı ilave edilen modeller için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri	55
Çizelge 3.10 Dikdörtgensel kavite için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri	55
Çizelge 3.11 Tez kapsamında kullanılan sistemlerin ağ boyutu	56
Çizelge 4.1 Sıcaklığa bağlı ve 915 ve 2450 MHz frekansta %2 agar çözeltilisine ait dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü	59
Çizelge 4.2 NaCl çözeltisi uygulanan örneklerin dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü	60
Çizelge 4.3 Oluşturulan modellerde 3 ve 5 logaritmik azalma için gerekli süre.....	105

1. GİRİŞ

Dünyada, gıda güvenliği kapsamında ekonomik kayıplara neden olan en yaygın bakteriyel enfeksiyonlardan biri campylobacteriosis'tir. Campylobacteriosis'e neden olan *Campylobacter*'ler başta kanatlı hayvanlar olmak üzere çeşitli hayvanların bağırsak florasında bulunmaktadır (Çakmak ve Erol 2010). İnsan campylobacteriosisinin yaklaşık % 50-70'i kanatlı eti ve kanatlı hayvan ürünleri tüketiminden kaynaklanmaktadır (Allos 2001). Termofilik *Campylobacter*'ler olarak adlandırılan *Campylobacter jejuni* ve *Campylobacter coli*, insanlarda enfeksiyona neden olan başlıca türler (Friedman vd. 2000, Tam vd. 2003) olup vakaların yaklaşık olarak %90'ını *C. jejuni* oluştururken bunu %5-10 ile *C. coli* izlemektedir (Gillespie vd. 2002). Termofilik *Campylobacter* türleri, 37 ila 42 °C arasında gelişebilirken; optimum üreme sıcaklığı 41,5 °C olarak belirtilmektedir (Silva vd. 2011, Keener vd. 2004, Umaraw vd. 2017). Bu nedenle, kanatlılarda vücut sıcaklığı yaklaşık 41 °C – 42 °C olduğundan üremesi için uygun bir ortamdır (Çakmak ve Erol 2010, Altun vd. 2014). Ancak bu mikroorganizmanın 30 °C'nin altında ve 47 °C'nin üzerinde gelişmediği bilinmektedir. *Campylobacter*'ler ısıya karşı da oldukça duyarlı olup D değerleri 60 °C'de 1 dakikadan daha kısadır. Bu nedenle ısıl işlem uygulamaları ile kolaylıkla elimine edilebilmektedirler (Keener vd. 2004, Blankenship ve Craven 1982).

Son yıllarda tavuk eti tüketimi, yüksek besin değerine sahip olması ve ucuz olması nedeniyle artmıştır. TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verilerine göre 2018 yılında Türkiye'de kişi başına toplam 21,86 kg kanatlı eti düşmektedir. Bu değer 2000 yılında ise 9,62 kg olarak rapor edilmiştir (Anonim 2020b). Buradan hareketle son yıllarda kanatlı eti tüketiminin hızla artışa geçtiği gözlenirken buna bağlı olarak campylobacteriosis vakalarında artış ortaya çıkmıştır (Darka ve Yılmaz 2004, Anonim 2020b). *C. jejuni*, kanatlı hayvanın kesimi sırasında bağırsak içeriği ile kontaminasyon sonucu bulaşmaktadır. Mezbahalarda kesim işlemi sırasında özellikle tavuk derisi dış yüzeyi *C. jejuni* ile kontamine olmaktadır. Bu nedenle, ürün yüzeyinde bulunan *C. jejuni* miktarını azaltmak veya ortadan kaldırmak için etkili bir sürecin geliştirilmesi önemli bir nokta olarak göze çarpmaktadır. Bu enfeksiyonun önlenmesi amacıyla kanatlı eti ve ürünlerinin yeterince pişirilmesine ve bu sırada çapraz kontaminasyon riskine dikkat edilmesi

önerilmektedir. Ancak bu önlemlerin yeterince etkin olmadığı da görülmektedir. Bu nedenle, bu sorunun giderilmesi için kanatlı etlerine çeşitli fiziksel ve kimyasal (ısıtılmayan) işlemler uygulanmış, fakat bu uygulamaların bazılarının ise insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri ve bazılarının ise üründe çeşitli kalite kayıplarına yol açması ve maliyeti artırmaları nedenleriyle bu işlemlerin uygulanması proses açısından yetersiz kalmıştır.

Yüzey dekontaminasyonu konusunda ısıtıl işlem uygulamaları ise genel olarak tercih edilmemiştir. Ancak, endüstriyel kullanım alanı giderek artan kızılötesi ya da mikrodalga uygulama gibi ısıtıl işlemlerin bu konuda kullanılabileceğinin gösterilmesi hızlı proses kapsamında önemli bir gelişme olabilecektir.

Kızılötesi enerji kullanımı ile gıda ürünlerinde yüzey dekontaminasyonu/pastörizasyonu sağlayabilecek bir sıcaklık artışını kısa sürede oluşturmaktadır. Kızılötesi enerjinin dalga boyu ve buna bağlı olarak da penetrasyon derinliği sınırlı olduğundan bu proses yüzey dekontaminasyonu amacıyla kullanım için potansiyel bir uygulama olarak göze çarpmaktadır. Ancak, hem proses süresi hem de ürün yüzey sıcaklığındaki tekdüze olmayan dağılım bu uygulamanın dezavantajları arasındadır. Mikrodalga sistemleri ise gıda ürünlerinde hacimsel olarak ısınmayı ve buna bağlı olarak da ürün içerisinde neredeyse tekdüze sıcaklık dağılımını sağlamaları sebebiyle sürekli sistemlerde, ısıtıl işlemle proses edilen kaliteli ürün prosesi için tercih edilen sistemlerdir. Hacimsel ısıtılma özelliği ise, geleneksel yöntemlere göre, ürün içerisinde tekdüze sıcaklık dağılımı sağlaması mikrodalga uygulamanın tercih edilme özelliklerinden birisidir. Buna ilave olarak hızlı ısıtılma sağlaması özelliğine bağlı olarak kısa proses süresinin yeterli olması avantajlarıdır. Bu durumda mikrodalga enerjinin ürün yüzeyine odaklanması sağlanarak kısa sürede önemli bir sıcaklık artışı sağlanması ürün yüzey dekontaminasyonu konusunda önemli bir proses geliştirme çalışması olabilecektir.

Mikrodalgalar 300 MHz - 300 GHz frekans aralığında iyonize olmayan elektromanyetik alan oluşturmaktadırlar (Marra vd. 2009). Endüstriyel mikrodalga sistemlerde 915 MHz ve 2450 MHz frekans kullanılmaktadır. Mikrodalga ısıtılma, iyonik kondüksiyon ve dipolar

rotasyon olmak üzere iki mekanizma ile gerçekleşmektedir. İyonik kondüksiyon, uygulanan elektrik alan şiddetinin bir sonucu olarak iyonik bileşenlerin harekete geçmesi ve oluşan sürtünmenin etkisi ile hacimsel ısınmanın sağlanması olarak açıklanmaktadır. Dipolar rotasyon ise uygulanan elektriksel alan ile polar bileşenlerin sürekli rotasyon hareketi yapması olarak tanımlanmaktadır. Yüksek frekanslı bir elektriksel alanda dönme hareketi frekansa bağlı olarak frekans değerine bağlı olarak saniyede çok sayıda tekrarlanmakta ve sonuçta oluşan sürtünme sonucu hacimsel ısınma gerçekleşmektedir (Mello vd. 2014).

Mikrodalga uygulamanın yüzey ısıtma için kullanılması ise penetrasyon derinliğine bağlı olarak uygun görülmemektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen bir çalışmada, Teotia ve Miller (1975), piliç etini mikrodalga sistemde proses etmişler ve ürün yüzeyinde hedef mikroorganizma olarak seçtikleri *Salmonella*'yı tamamen yok etmişlerdir. Ancak bu uygulamada üründe kısmen pişme durumu da gözlenmiştir. Göksoy vd. (2000) ise kısa süreli mikrodalga uygulamasının tavuk etine inoküle edilen patojenlere ve inoküle edilmemiş tavuk etinin raf ömrüne etkisini incelemişlerdir. Taze derisiz tavuk göğsünü 10, 20 ve 30 s tam güçle (IEC 1138.8 W) çalışan bir mikrodalga fırında (2450 MHz) proses etmişlerdir. Bu uygulama sonucunda bakteri sayısı üzerinde anlamlı bir değişim olmadığını saptamışlardır. 20 ve 30 s'lik uygulamalarda ise kısmen yerel bölgelerde pişme durumu da gözlemişlerdir. Bu durum üründe oluşan tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı ile net olarak açıklanabilmektedir.

Mikrodalga uygulamada hem ürün yüzeyinde meydana gelen tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı hem de penetrasyon derinliğine bağlı olarak ortaya çıkan ve yüzeyden daha derin bölgelerin etkilenme durumu nedeniyle bu teknolojinin yüzey dekontaminasyonu amacıyla kullanılmasını kısıtlamaktadır. Kızılötesi ısıtma işlem uygulaması ise, penetrasyon derinliğinin çok kısa olması nedeni ile tam bir yüzey pastörizasyonu etkisi sağlayabilirken, işlem süresinin uzun olması nedeni ile tavuk karkas yüzey uygulaması anlamında tercih edilecek bir proses değildir. Ancak, ısıtma işlem uygulaması ile ürün yüzeyinde hızlı bir dekontaminasyon sağlanması ve sonrasında ürüne hızlı bir soğutma işleminin uygulanması ile soğuk zinciri başlatılması önemli bir proses ilerlemesi olacaktır.

Bu tez kapsamında tavuk karkasındaki kalite parametrelerinde (renk, pişme kaybı vb.) herhangi bir değişiklik olmadan hedef mikroorganizmanın elimine edilmesi amaçlanmıştır. Tavuk karkas yüzeylerinde mikrodalga uygulaması ile dekontaminasyon, matematiksel modelleme çalışmaları ile gösterilmiştir. Bu durumda önemli olan nokta mikrodalga sistem ile oluşturulan elektromanyetik enerjinin ürün yüzeyine – derisine odaklanmasının sağlanması ve bu enerjinin penetrasyon derinliğine bağlı olarak ürün iç kısmına geçmesinin engellenmesi olarak göze çarpmaktadır.

Bu amaçla ürünün sadece dış yüzeyine mikrodalga ile ısııl işlem uygulanabilmesi amacıyla, tavuk karkas yüzeyine NaCl çözeltisi uygulaması ile dielektrik özelliklerinin değiştirilmesi ve mikrodalga enerjinin yüzeyde yoğunlaşması sağlanmıştır. Buna göre NaCl çözelti uygulaması ile dış yüzey dielektrik özellikleri değişen tavuk karkas yüzeyinde arzu edilen dekontaminasyon sıcaklığına hızlı bir şekilde ulaşırken; ürün içerisinde – deri altında sıcaklık artışı engellenmiş ve yüzeyde var olan *C. jejuni* sayısı da azalmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Gıda Güvenliği, Gıda Kaynaklı Patojen ve Hastalıklar

İnsanların en temel fiziksel ihtiyaçlarından biri olan beslenme; büyüme, yaşamın sürdürülmesi ve sağlığın korunması amacıyla çeşitli gıdaların tüketilmesi olarak tanımlanmaktadır. İnsanların sağlıklarını koruyabilmeleri için yeterli ve dengeli beslenmelerinin yanında alınan gıdaların insan sağlığını tehdit etmemesi ve güvenli olması da gerekmektedir. Bu bağlamda, gıda güvenliği kavramı karşımıza çıkmaktadır (Özkaya ve Cömert 2008). Gıda güvenliği, sağlıklı ve güvenilir gıda tüketimi için gıdaların üretimi, tüketimi, taşınması, depolanması ve dağıtımını sürecinde gerekli kurallara uyulması ve önlemlerin alınmasıdır. Gıdanın kendisi ya da gıdada bulunan biyolojik, kimyasal veya fiziksel etmenler nedeniyle gıda güvenliği sorunu oluşmaktadır (Erkmen 2010). Fiziksel tehlikeler saç, taş, kıl, toz, kağıt, teneke, cam, sap, çekirdek vb. olabilir. Kimyasal tehlikeler pestisitler, ağır metal kontaminasyonu, alerjenler, katkı ve koruyucular olabilir. Biyolojik tehlikeler ise en önemli gruptur. Gıda kaynaklı enfeksiyon ve intoksikasyonların başlıca nedenleridir. Patojen mikroorganizmalar arasında *Campylobacter jejuni*, *Salmonella spp* ve *Escherichia coli* öne çıkmakta olup; gıda kaynaklı salgınlarda hastalık ve ölüm nedeni olabilmektedirler. Çizelge 2.1’de ABD’de 2017 yılındaki gıda kaynaklı hastalıkların sebeplerine ilişkin veriler görülmektedir. Bu hastalıklardan salgına yol açanların büyük bir kısmını virüsler ve bakteriler oluşturmaktadır. *Campylobacter*’in sebep olduğu 23 salgından 14 tanesi *C. jejuni*, 4 tanesi *Campylobacter*’in çoklu türleri, 3 tanesi *Campylobacter*’in bilinmeyen türleri ve 2 tanesi ise *C.coli* kaynaklıdır (CDC 2017).

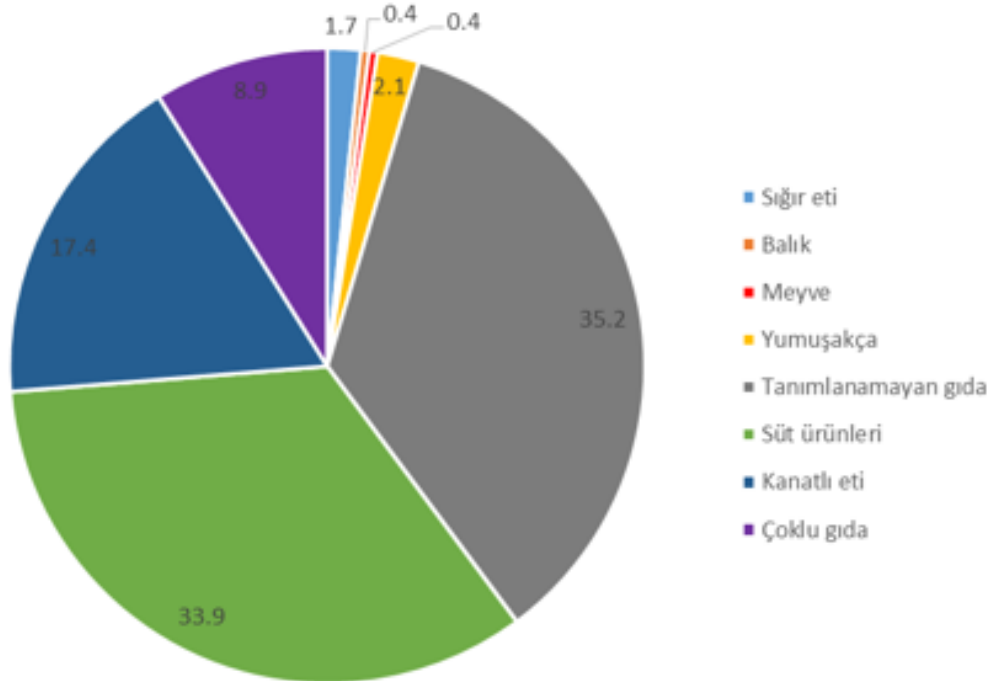
Çizelge 2.1 ABD’de 2017 yılında gıda kaynaklı salgınlar, salgınla ilişkili hastalıklar ve hastaneye yatışlar (CDC 2017)

		Salgın Sayısı		Hastalık Sayısı		Hastaneye Yatış Sayısı	
Etiyoloji		Toplam	%	Toplam	%	Toplam	%
Bakteriyel	<i>Salmonella</i>	122	19	3061	25	478	64
	<i>Clostridium perfringens</i>	41	6	843	7	1	0
	<i>Campylobacter</i>	23	4	147	1	14	2
	<i>Escherichia coli</i> , Shiga toksini üreten (STEC)	21	3	521	4	113	15
	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	17	3	70	1	4	1
	Diğer	47	7	738	4	6	8
	Ara Toplam	271	42	5380	45	670	90
Kimyasal ve toksin		40	6	156	1	6	1
Viral		325	50	6393	53	67	9
Diğer		205	2	2552	1	84	0
Toplam		841	100	14481	100	827	100

2.2 *Campylobacter jejuni*

Campylobacter türleri yaygın görülmelerine rağmen 1957'ye kadar insanlarda görülen diyarenin nedenlerinden biri olduğu anlaşılamamıştır. 1980'li yılların ortalarında ise *Campylobacter* türlerinin dünya çapında ishalin en yaygın bakteriyel nedenlerinden biri olduğu belirlenmiştir. İnsanlarda campylobacteriosis enfeksiyonları genellikle az pişmiş kümes hayvanı etlerinin ve fekal madde ile kontamine olmuş gıda ürünlerinin teması ve tüketimi kaynaklıdır (Allos 2001).

2010 – 2017 yılları arasında CDC (Centers for Disease Control and Prevention - Hastalık Kontrol ve Korunma Merkezleri)'nin Gıda Kaynaklı Hastalık Salgın Gözetim Sistemine 2,381 hastalık bildirilmiş olup ve bunlardan 236 tanesinin *Campylobacter* kaynaklı salgın olduğu belirtilmiştir. Bu salgınların neden olduğu gıda ürünlerinin dağılımları şekil 2.1 'de görülmekte olup süt ürünleri ve kanatlı etleri bu kapsamda önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 2.1 2010 – 2017 yılları arasında CDC'ye bildirilen *Campylobacter* kaynaklı salgınlara neden olan gıdaların dağılımı (%) (CDC 2019b)

2018’de dünyada toplam 335 milyon ton et üretimi gerçekleşmiştir. Bu üretimin 121,6 milyon tonu kanatlı eti olup bu değer % 36,3’e karşılık gelmektedir (Omrak 2020). Kanatlı eti üretimi ve tüketimi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de artmaktadır. Bu artışın başlıca sebepleri arasında kırmızı etin pahalılığı, kanatlı etinin besin değerinde yüksek olmasıdır. 2018 yılında Türkiye’de kişi başına düşen kanatlı eti tüketimi 21,86 kg olup bunun 21,13 kg’ını piliç eti oluşturmaktadır (Anonim 2020b). Kanatlı eti tüketiminin fazla olmasına bağlı olarak *C.jejuni* de hayatımızda önemli bir yer kazanmıştır. Endüstride campylobacteriosis salgınlarını engellemek amacıyla halen herhangi bir proses uygulaması yapılmamakta olup tüketicilerin çapraz kontaminasyona ve uygun pişirme sıcaklığına dikkat etmeleri beklenmektedir (Anonim 2012, CDC 2019a). *C.jejuni*’yi engellemek adına yapılan çalışmalar henüz sadece akademik yayın olarak literatürde bulunmaktadır.

Campylobacter’ler, gram negatif, sporsuz, spiral şekilli bakterilerdir. Mikroaerofilik olduklarından üremeleri için minimum %5 O₂, %10 CO₂ ve %85 N₂ içeren ortama ihtiyaç duyarlar (Moore vd. 2005, Stern ve Kazmi 1989). *C. jejuni* 30 ila 47 °C sıcaklıklar arasında gelişebilir. Optimum üreme sıcaklığı 41,5 - 42 °C’dir (Darka 2004, Jackson vd. 2009, Çakmak ve Erol 2010, Silva vd. 2011, Keener vd. 2004, Umaraw vd. 2017). 42 °C’de gelişme kabiliyetlerinden dolayı termofilik olarak adlandırılırlar. Üreme sıcaklığı açısından tavuk, vücut sıcaklığına bağlı olarak bu mikroorganizmanın üremesi için uygun bir ortamdır (Çakmak ve Erol 2010, Altun vd. 2014). Gelişmesi için gerekli optimum su aktivitesi (a_w) 0,997 olup 0,987’den düşük su aktivitesine sahip ortamlarda gelişmemektedir (yaklaşık olarak % 2 (w/v) NaCl) (Çakmak ve Erol 2010, Silva vd. 2011). Çizelge 2.2’de tavuktan izole edilen *C. jejuni* için belirlenmiş D- ve z-değerleri görülmektedir. Nguyen vd. (2006)’nin yapmış olduğu çalışmada *C.jejuni*’nin farklı suşları ile çalışılmış olup çizelge 2.2’de görülen değerler 2 farklı suş için belirlenen kinetik değerlerin ortalaması olarak verikmiştir.

Çizelge 2.2. Tavuk etinde izole edilen *C. jejuni* için belirlenmiş olan D- ve z-değerleri

Sıcaklık (°C)	D Değeri (dk)	z Değeri (°C)	Referans
49	20,5	5,91 – 6,35	Blankenship ve Craven 1982
51	8,77		
53	4,85		
55	2,12		
57	0,79		
54	46,1	5,2	Sakkaf ve Jones 2012
56,8	17,1	4,5	
50	37,5	5,9	Nguyen vd. 2006
55	5		
60	0,75		

2.3 Çiftlik Düzeyinde *Campylobacter jejuni*'yi Önleme ve Azaltma Stratejileri

Son yıllarda, tavuklarda *Campylobacter* kontaminasyonunu önlemek ve seviyelerini azaltmak için önemli bir çaba sarf edilmektedir. Buna rağmen, birçok ülkede tavuk karkaslarında hala yaygın mikroorganizma varlığı ve buna bağlı olarak insanlardaki vaka sayıları da yüksek olmaya devam etmektedir (Thames ve Sukumaran 2020).

Bu kapsamda azaltma stratejisi açısından, çiftlik düzeyi için yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Biyogüvenlik önlemleri, bakteriyosinler, bakteriyofaj, aşılama, yem ve suya kimyasal katkı ekleme çiftlik düzeyinde denenmiş başlıca yöntemlerdir. Alter (2017) ve Federighi (2017), tavuk yetiştiriciliği yapılan bölgeye girmeden önce ellerin yıkanması, botların değiştirilmesi gibi hijyen kurallarının uygulanmasının çiftliklerde biyogüvenlik standartlarını iyileştireceğini vurgulamıştır. Georgiev vd. (2016) 2 yıl boyunca İngiltere'de 2.314 piliç grubunu incelemiş ve çiftliklerde biyogüvenlik

önlemlerinin uygulanması ile *Campylobacter* kolonizasyonunun % 53 - % 86 arasında azaldığını tespit etmişlerdir. Stern vd. (2005) ise tavuk karkasındaki *Campylobacter* yükünü azaltmak amacıyla bakteriyosin uygulamış ve 4,6 – 6,3 log kob/g azalma olduğunu kaydetmişlerdir. Fakat bakterilerin, bakteriyosinlere karşı direnç de göstermesi mümkün olduğundan direnç gelişimini gözlemleyebilmek amacıyla uzun süreli deneylerin yapılması bu kapsamda önerilmektedir. Kümes hayvanlarındaki *Campylobacter* varlığını azaltmak amacıyla bakteriyofajların kullanılması da literatürde geniş çaplı olarak yer edinmiştir. Bunlara örnek olarak Carrillo vd. (2005), bakteriyofaj uygulaması ile tavuktan izole edilen *C. jejuni* miktarında 0,5 ila 5 log kob/g azalma olduğunu belirtmişlerdir. Bakteriyofajların canlı kümes hayvanlarında antimikrobiyal madde olarak hasat öncesi kullanımı henüz ABD Gıda ve İlaç İdaresi (US-FDA) tarafından onaylanmamıştır. Bununla birlikte, daha etkili olması amacıyla bakteriyofajı optimize etmek için uluslararası alanda araştırmalar devam etmektedir (Grant vd. 2016). Aşılama insanlarda hastalığa yol açan bakteri ve virüsleri engellemede en etkili yollardan biridir. *Campylobacter*'e karşı etkili bir aşının bulunması ile bu mikroorganizma kaynaklı hastalıkların önüne geçilebileceği de düşünülmektedir. Fakat henüz böyle bir aşı geliştirilememiştir (Kobierecka vd. 2016). Bunun yanı sıra Chintoan-Uta vd. (2016), yüksek üretim maliyeti ve dozların manuel olarak uygulanması ile ilgili olarak aşılarda kullanılmasıyla ilişkili zorlukları vurgulamıştır. Çiftlik düzeyinde literatürde çalışılan bir diğer konu ise yem ve suya kimyasal eklenmesidir. Eklenen kimyasal maddeler doğal ve sentetik olmak üzere 2 çeşittir. Metcalf ve vd. (2011), civcivlerin içme suyuna % 0.175 kaprilik asit uygulamış ve yaklaşık olarak 3 logaritmik evrelik azalma olduğunu saptamışlardır. Skoufos vd. (2019) ise 42 gün boyunca tavuk yemine demir tirozin katmışlar ve bu süre sonunda kuşların çekumlarından örnek alınıp *C.jejuni* sayımı yapılmış ve 2 logaritmik birim azalma olduğu belirlenmiştir.

Kısaca *C.jejuni*'yi önlemek amacıyla çiftlik düzeyinde birçok uygulama denenmiştir. Fakat bu uygulamaların maliyetinin yüksek olması, gelecekte ne tür sonuçlar doğuracağını bilinememesi ve büyük ölçekte uygulanabilirliğinin zor olması gibi nedenlerden dolayı farklı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

2.4 Kanatlı Eti Proses Aşamasında *Campylobacter jejuni*'yi Önleme ve Azaltma Stratejileri

Kesim sırasında bağırsak içeriği ile kanatlı hayvanın kontaminasyonu sonucu *C. jejuni*, bulaşışı meydana gelmektedir. Bu nedenle, iç boşaltma işlemi sırasında kullanılan ekipmanların sürekli olarak sterilize edilmesi ile karkaslardaki *Campylobacter* kontaminasyonunun azaltılabileceği düşünülmektedir. Literatürde kümes hayvanı etinde *Campylobacter* kontaminasyonunun azaltılması için proses sırasında uygulanan farklı uygulamaların yararlı etkisi de gösterilmiştir. Bu kapsamda literatürde açıklanan farklı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Whyte vd. (2003) tavuk karkasında mikrobiyal yükü azaltmak için sıcak suya daldırma işlemi uygulamışlardır. Doğal olarak *C. jejuni* ile kontamine olmuş ve yapay olarak *C. jejuni* ekimi yapılmış tavuk butları 75, 80 ve 85°C'lerdeki sıcak suya 10 ve 20 saniye süreyle daldırılmıştır. Başlangıç yükü doğal olarak kontamine olanların 2,68 log kob/g, yapay olarak kontamine edilenlerin ise 3,32 log kob/g olarak belirlenmiştir. 20 saniye 85°C'deki suya daldırma işlemi sonucunda ise doğal ve yapay olarak kontamine edilenlerde sırasıyla 1,3 ve 1,9 log kob/g azalma görülmüştür. Buradan, *Campylobacter* ile doğal olarak kontamine olmuş numunelerin aynı koşullarda proses edilmesi sonucunda işlemde daha az etkilendiği ortaya çıkmaktadır. Araştırmacılar bu durumun sebebi olarak kontaminasyon süresine bağlı olarak ortama uyum etkisini bildirmişlerdir. Yapay olarak aşılınmış bakteriler, numune yüzeyine bağlanmak için belirli bir süreye ihtiyaç duyabilmekte ve proses sırasında karkaslara uygulanan herhangi bir müdahaleyle elde edilen azalmaların beklenilenden fazla hesaplanmasına yol açabilmektedir.

Aynı çalışmada tavuk karkasları 90 °C'deki buhar ile 12 ve 24 saniye proses edilmiş ve 12 saniye proses edilen örneklerde 0,5 log kob/g azalma, 24 saniye proses edilen örneklerde ise 1,3 log kob/g azalma görülmüştür. Fakat her iki proses sonunda da tavuk derisinde sararma olduğu gözlenmiştir.

Huezo vd. (2007), tavuk karkaslarında buzlu suya daldırma (0,6 °C'de 50 dakika) ve kuru hava ile soğutmanın (3,5 m/s, -1.1 °C, 150 dakika) *C. jejuni* üzerine etkisini incelemişlerdir. Buzlu suya daldırma ve kuru hava ile soğutma sonucunda başlangıç yükü 3,4 log kob/g olan *C. jejuni* yükünde sırasıyla 1 ve 1,4 log kob/g azalma görülmüştür. Bu çalışmada Huezo vd. (2007) herhangi bir kimyasal kullanmadan mikrobiyel yükün belirli bir düzeyde azaltılabileceğini göstermiştir. Fakat proses süresinin uzunluğu bu kapsamda bir uygulamanın endüstriyel açıdan kullanılabilirliğini tartışmaya açık hale getirmiştir.

Georgsson vd. (2006), tavuk karkaslarına daldırarak dondurma ve spreyci dondurma yöntemleri uygulamışlardır. Başlangıç yükü 4,66'dan 6,07'ye değişen tavuk örneklerinde daldırma ve spreyci dondurma arasında bir fark olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Fakat dondurma işleminde oluşan buz kristallerinin etin kalitesini düşürdüğü görülmüştür.

Park vd. (2002), *C. jejuni* inaktivasyonu sağlamak amacıyla elektrolize suyun antimikrobiyel etkisinden yararlanmışlardır. Elektrolize su, seyreltik tuz (NaCl) çözeltisinin elektrolizi ile üretilmektedir. Elektrolize suyun *C. jejuni*'yi inaktivasyon etkinliğini ve yıkama sırasında tavuk üzerinde *C. jejuni*'yi azaltmadaki potansiyel uygulamasını değerlendirmişlerdir. Başlangıçta 7,5 log kob/mL olan *C. jejuni* yükü, örneklerin 10 s elektrolize su ile muamele edilmesi sonucu sayılamayacak seviyeye düşmüştür.

Özdemir vd. (2006), antimikrobiyel madde kullanarak *C. jejuni*'yi önlemeyi planlamışlar ve bu amaçla % 0,1'lik (% w/v) asitleştirilmiş sodyum klorit ve % 10'luk (% w/v) trisodyum fosfat kullanmışlardır. *C. jejuni* inoküle edilmiş tavuk derileri, 15 s süreyle hazırlanan çözeltilere batırılmıştır. Çözeltilerin etkinliğini gözlemleyebilmek amacıyla örnekler;

- Çeşme suyu (kontrol),
- % 0,1'lik (% w/v) asitleştirilmiş sodyum klorit,
- 10'luk (% w/v) trisodyum fosfat,
- % 0,1'lik (% w/v) asitleştirilmiş sodyum klorit ve ardından 10'luk (% w/v) trisodyum fosfat ve

- 10'luk (% w/v) trisodyum fosfat ve ardından % 0,1'lik (% w/v) asitleştirilmiş sodyum klorit'e daldırmışlardır.

Uygulama sonunda 10 dk oda sıcaklığında bekletildikten sonra 0, 1, 3 ve 5 gün süreyle 4 °C'de depolanmıştır. Kontrol örneğinde başlangıçta 5,8 log kob/g olan *C. jejuni* yükü depolama ile *C. jejuni* yükü azalmış ve 5 günün sonunda 5 log kob/g'a düşmüştür. Trisodyum fosfat ve asitleştirilmiş sodyum klorit uygulanmış örneklerde 3,4 ve 3,9 log kob/g *C. jejuni* varlığı belirlenmiştir. Yukarıda açıklanan 4 ve 5 uygulamaları sonucunda üründe 3,3 ve 4,7 log kob/g *C. jejuni* olduğu görülmüştür. Kontrol örneğinde olduğu gibi diğer uygulamalar ile de depolamayla mikroorganizma yükü azalmaya devam etmiş ve 5. günün sonunda tüm uygulamalar için de üründeki *C. jejuni* yükünün 2 log kob/g'dan az olduğu saptanmıştır. Buradan hareketle depolama ile antimikrobiyel maddelerin etkisinin arttığı sonucuna varılmıştır.

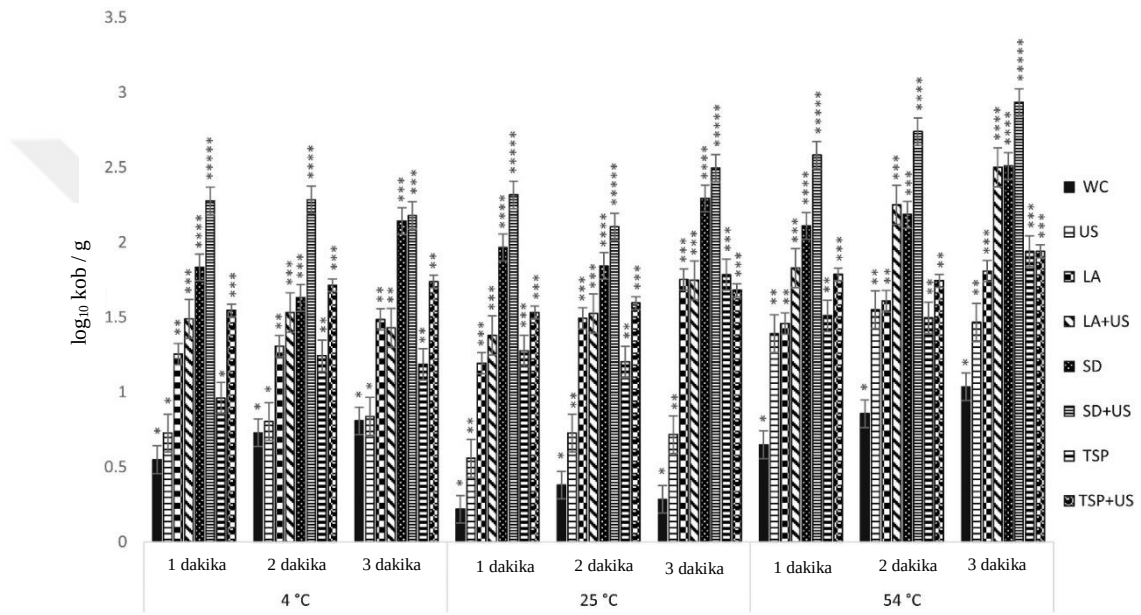
Chaine vd. (2013), *C. jejuni* 'yi önlemek amacıyla tavuklara buhar, laktik asit ve iki işlemi birlikte uygulamışlardır. Buhar uygulamasında, tavuk derisinin 2 mm altına yerleştirilen ısıtıcı çift ile sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiş ve ürün sıcaklığı 100 °C'ye ulaştıktan sonra 8 s proses uygulanmıştır. Bu uygulama ile örneğin *Campylobacter* yükü 4,5 log kob/cm² azaltılmıştır. %5'lik laktik asit çözeltisi ile 1 dk muamele edilen örneklerde ise mikroorganizma yükünde 1,8 log kob/cm² azalma olduğu görülmüştür. Laktik asit ve buhar işleminin aynı anda uygulanmasıyla ise 5 log kob/cm² azalma olmuştur. Ayrıca örnekler 4 °C'de 7 gün boyunca depolanmış ve depolama sonunda tekrar mikrobiyal analiz yapılmıştır. 7 gün sonunda buhar uygulanan numunelerdeki azalmanın 3,5 log kob/cm² olduğu hesaplanmıştır. Buradan hareketle yüzeyde kalan mikroorganizmaların tekrar çoğalmaya başladığı sonucu çıkarılabilir. Fakat laktik asit uygulanan numunelerde depolama sonunda 3,8 log kob/cm² azalma olduğu belirtilmiştir. Bu, laktik asidin yüzeyde kalıyor olması ile birlikte antimikrobiyel etkisinin devam ettiğinin bir göstergesi olarak açıklanmıştır.

2.5 Yenilikçi Teknoloji Uygulama Stratejileri

Son yıllarda gıda ürünlerinin kalite özelliklerini koruyarak güvenli gıda üretmek amacıyla yenilikçi teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca bu teknolojiler kullanılarak daha hızlı üretim, daha iyi kalitede ve raf ömrü daha uzun ürün elde etmek hedeflenmektedir. Geleneksel ısıtma yöntemleri kullanılarak ısıtma ile gıdanın güvenliği sağlanmaya çalışılmıştır. Bu geleneksel ısıtma yöntemleri, esasen ısıtılacak ürünün dışında, yakıtların yakılmasıyla veya bir ısıtıcıyla ısıtının üretilmesine ve bunun, konveksiyon ve konveksiyon mekanizmaları yoluyla ürüne aktarılmasına dayanmaktadır. Yeni termal ve termal olmayan teknolojilerin ortaya çıkması, ısıtma verimliliği ve dolayısıyla enerji tasarrufu sağlayarak yüksek kaliteli ürünler üretmeyi mümkün kılmaktadır. Dielektrik ısıtma olarak adlandırılan radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) ısıtma geleneksel ısıtma yöntemlerine umut verici alternatiflerdir. Bunlara ek olarak kızılötesi enerji kısa dalga boyu ve gıda maddelerinin de düşük ısıtma iletim katsayısına ($< 0,6 \text{ W/m-K}$) bağlı olarak, gıda ürünlerinde yüzey dekontaminasyonu/pastörizasyonu sağlayabilecek bir sıcaklık artışını kısa sürede oluşturmaktır. Ancak, ürün yüzey özellikleri ve kızılötesi kaynakla ürün arasında oluşun açısı faktörü ve uzaklık gibi faktörlere bağlı olarak hem proses süresi hem de ürün yüzey sıcaklığındaki tekdüze olmayan dağılım bu uygulamanın dezavantajları arasındadır. Kızılötesi enerjinin, kısa dalga boyuna bağlı olarak, öncelikle ürün yüzeyinde sıcaklık artışı sağlaması ve ürün yüzeyinin uygulamadan sonra kolayca soğutulması gıda ürünlerinde kalite kaybını azaltan önemli bir avantajdır. Kısaca, kızılötesi ısıtmada işlem süresinin uzun olması nedeni ile tavuk karkas yüzeyindeki mikroorganizmaların inaktivasyonu için uygun bir proses olarak değerlendirilmemektedir.

Soğuk plazma, yüksek basınç, vurgulu elektrik alan, vurgulu ışık ve ultrasonik ses dalgaları gibi termal olmayan yenilikçi teknolojiler de son yıllarda mikroorganizmaların inaktivasyonu için kullanılmaktadır. Bu teknolojiler mikroorganizmaları ortam sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda inaktive ederek gıda bileşenlerinde ısıtma işlem kaynaklı kalite kayıplarını önlemektedir.

Bahsedilen yenilikçi teknolojiler tavukta *Campylobacter* yükünü azaltmak amacıyla da kullanılmıştır. Kassem vd. (2018), yüksek yoğunluklu ultrasonikasyonu (US) tek başına ve çeşitli kimyasallarla (laktik asit (LA, %3), sodyum dekanat (SD, %3) ve trisodyum fosfat (TSP, %10)) kombine bir şekilde kullanarak tavuktaki *Campylobacter* seviyesini azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneyler 4, 25 ve 54 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta ve 1, 2 ve 3 dk olmak üzere 3 farklı proses süresi için yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda *C. jejuni*'de görülen azalmalar Şekil 2.2'de görülmektedir.



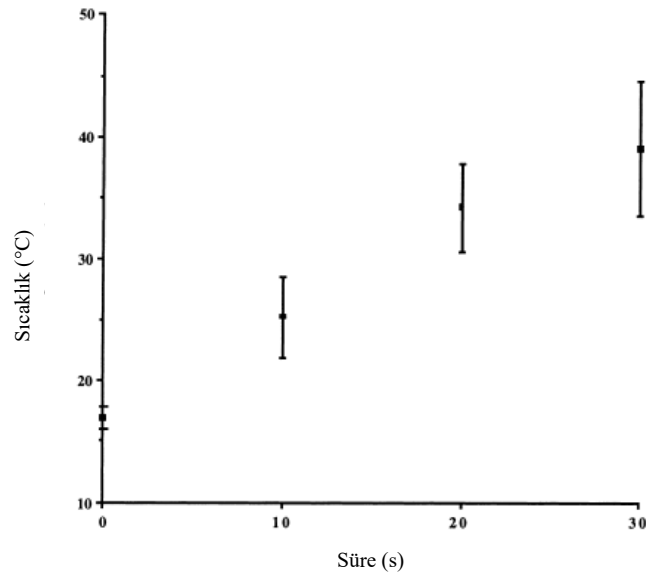
Şekil 2.2 Farklı sürelerde ve sıcaklıklarda prostesten sonra *C. jejuni* sayımlarındaki ($\log_{10}$ kob / g) ($n = 9$, $\pm$ standart sapma) ortalama azalmalar (Kassem vd. 2018)

Bakteriyel azalmanın en yüksek seviyeleri, tüm sıcaklık - süre kombinasyonlarında SD + US işlemlerinin uygulanması ile gözlenmiştir. Ultrasonikasyon ve belirli kimyasal işlemlerin kombinasyonları, hafif ısı ile uygulandığında, *C. jejuni*'nin önemli ölçüde azalmasıyla sonuçlanan umut verici dekontaminasyon işlemleridir.

Dirks vd. (2012), derili ve derisiz tavuk örneklerine *C. jejuni* inoküle etmişler ve soğuk plazma uygulaması sonucunda mikroorganizma yükündeki azalmayı araştırmışlardır. Dielektrik bariyer deşarjı (DBD) metodu kullanılarak üretilen plazma ile örnekler 3 dk muamele edilmiştir. Uygulama sonucunda *C. jejuni* miktarlarında derili tavukta 2,45 log

kob/g ve derisiz tavukta ise 3,11 log kob/g azalma görmüşlerdir. Araştırmacılar, derili ve derisiz numuneler arasında gözlemlenen bu farklı azalmaların, soğuk plazmanın pürüzlü yüzeyler üzerindeki düşük etkinliği ile ilişkili olabileceğini öne sürmüşlerdir.

Göksoy vd. (2000) ise kısa süreli mikrodalga uygulamasının tavuk etine inoküle edilen patojenlere ve inoküle edilmemiş tavuk etinin raf ömrüne etkisini incelemişlerdir. Taze derisiz tavuk göğsüne *Escherichia coli* K12 ve *C. jejuni* inoküle etmiş ve 10, 20 ve 30 s tam güçle (IEC 1138.8 W) ve dur kalk ile çalışan bir mikrodalga fırında (2450 MHz) proses gerçekleştirmişlerdir. Prosesin ardından yüzeye yakın bir bölgeye yerleştirilen T tipi ısı çiftleri sayesinde sıcaklık ölçümü alınmıştır.



Şekil 2.3 2450 MHz mikrodalga fırında ısıtılan tavuk göğsünün proses sonu yüzey sıcaklıkları (hata çubukları standart sapmayı temsil eder) (Göksoy vd. 2000)

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi tavukların proses öncesi yüzey sıcaklığı yaklaşık 17 °C iken 10 s proses sonunda 25,2 °C, 20 s sonunda 34,1 °C ve 30 s sonunda ise 39 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca mikrodalga uygulama sonucunda bakteri sayısı üzerinde anlamlı bir değişim olmadığı saptanmıştır. 20 ve 30 s'lik uygulamalarda ise lokal pişme durumu da

gözlenmiştir. Bu durum üründe oluşan tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı ile net olarak açıklanabilmektedir.

Benzer şekilde, Teotia ve Miller (1975), piliç etini 120 ve 600 s 2450 MHz’te çalışan bir mikrodalga sistemde proses etmişler ve ürün yüzeyinde hedef mikroorganizma olarak seçtikleri *Salmonella*’yı tamamen yok etmişlerdir. Ancak bu uygulama sonucunda üründe yine lokal pişme durumu gözlenmiştir.

2.6 Mikrodalga Uygulama

Mikrodalga sistemler gıda endüstrisinde ısıtma işlemi amacıyla kullanılmaktadır. Mikrodalga uygulama, konvansiyonel ısıtma işlemi yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir. Bunlardan en önemlileri, hacimsel ısıtma sağlama, ısıtma sağlamak için ara ortama ihtiyaç duymaması, proses sürelerinin kısa olması ve atık oluşturmamasıdır. Ancak ısıtılan üründe mikrodalga enerji kullanımına bağlı olarak tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı ve dolayısıyla materyal içerisinde ekstrem sıcak ve soğuk nokta oluşumu gözlenmektedir. Bunun sebebi, ısıtma sırasında, ürün içerisinde oluşan elektrik alanının dağılımının farklı olmasıdır (Basak ve Meenakshi 2006; Konak vd., 2009). Bu sorunun çözülebilmesi amacıyla ev tipi sistemlerde ürüne dönme hareketi, endüstriyel sistemlerde ise ürünün sistem içerisinde hareketi sağlanmaktadır.

Mikrodalgalar 300 MHz - 300 GHz frekans aralığında iyonize olmayan elektromanyetik alan oluştururlar (Marra vd. 2009). ITU (International Telecommunication Union - Uluslararası Telekomünikasyon Birliği) tarafından belirlenen ve ISM band olarak adlandırılan endüstriyel, bilimsel ve tıbbi amaçlı kullanıma ayrılmış mikrodalga bant aralığında 896 (UK), 915 (EUA), 2450, 5800 ve 24125 MHz frekansları bulunmaktadır. Bunlardan ise gıda endüstrisinde yaygın olarak ev tipi mikrodalgalarda 2450 MHz, endüstriyel sistemlerde ise 915 MHz kullanılmaktadır. Mikrodalga ısıtma, iyonik kondüksiyon ve dipolar rotasyon olmak üzere iki mekanizma ile gerçekleşmektedir. İyonik kondüksiyon, uygulanan elektrik alan şiddetinin bir sonucu olarak iyonik bileşenlerin harekete geçmesi ve oluşan sürtünmenin etkisi ile hacimsel ısıtmanın

sağlanması olarak açıklanır. Dipolar rotasyon ise uygulanan elektriksel alan ile polar bileşenlerin sürekli rotasyon hareketi yapması olarak tanımlanır. Yüksek frekanslı bir elektriksel alanda dönme hareketi frekansa bağlı olarak saniyede milyarlarca kez tekrarlanmakta (örneğin 2450 MHz frekansta çalışan bir sistemde bu salınım saniyede $2 \times 2.45 \times 10^9$ kere gerçekleşmektedir) ve sonuçta oluşan sürtünme sonucu hacimsel ısınma gerçekleşmektedir (Mello vd. 2014).

Elektromanyetik dalgalar birbirine dik konumda olan elektrik alan ve manyetik alandan oluşmaktadır. Gıdaların mikrodalga ile ısıtılmasına etki eden birçok faktör vardır. Bunlar; mikrodalga gücü ve ısıtma hızı, gıdanın kütlesi, su içeriği, elektriksel iletkenlik, termal özellikler, sıcaklık, frekans, yoğunluk, geometri ve dielektrik özelliklerdir (Konak vd. 2009). Mikrodalgaya maruz kalan materyaller elektromanyetik enerjiyi emebilir, iletebilir ya da yansıtabilir (Mekonnen 2018). Isıtılacak gıdaların dielektrik özelliklerinin bilgisi, etkili bir MW ısıtma için anahtar faktördür. Materyallerin dielektrik özellikleri permitivite ile ifade edilir. Permitivitenin gerçel kısmına dielektrik sabiti (ϵ'), sanal kısmına ise dielektrik kayıp faktörü (ϵ'') denilmektedir (Eşitlik 2.1) (Monroy vd. 2018).

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

Burada ϵ' , elektromanyetik enerjinin ürün tarafından ne kadarının absorbe edilebildiğinin, ϵ'' ise absorbe edilen elektromanyetik enerjinin ne kadarının ısıya dönüştürüldüğünü ifade etmektedir.

Penetrasyon derinliği d_p , ise mikrodalgaların ürün içinde penetre olduğu uzaklığı ifade eder. Dielektrik kayıp faktörü çok düşükse, penetrasyon derinliği çok büyük olacaktır. Penetrasyon derinliği (d_p) şu denklem ile ifade edilmektedir (Eşitlik 2.2):

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

Bu eşitlikte c, ışık hızını (m/s); f, frekansı (Hz) ifade etmektedir.

Elektromanyetik enerji dielektrik materyal içerisine sızdıktan sonra ısı enerjisine dönüşmektedir (Eşitlik 2.3).

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (2.3)$$

Mikrodalga sistemi aplikatör (magnetron), dalga kılavuzu ve kavite olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Magnetron tarafından üretilen elektromanyetik dalgalar dalga kılavuzu ile kaviteye doğru yol alır ve kavitenin şekli, boyutu ve işlenen materyale bağlı olarak ürüne nüfuz eder. Elektrik enerjisini mikrodalga enerjisine dönüştürmek için kullanılan magnetronlar, mikrodalga frekans aralığında devamlı ya da kesikli elektromanyetik alanlar oluşturabilmektedir (Cooper 2009).

Penetrasyon derinliğine bağlı olarak mikrodalga sistemler yüzey ısıtma için tercih edilmemektedir. Buna örnek olarak da Göksoy vd. (2000) ve Teotia ve Miller (1975)'in tavuktaki uygulaması görülmektedir. Bahsedilen iki çalışmada da son üründe istenmeyen durumlar olduğu belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise dielektrik özelliklerindeki değişimin penetrasyon derinliğine etkisinden faydalanarak tavuk karkaslarında mikrodalga uygulaması ile yüzey dekontaminasyon uygulamasının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

3. MATERYAL YÖNTEM

Yenilikçi teknolojiler kullanılarak tavuk karkaslarında *Campylobacter jejuni* yükünü azaltma kapsamında planlanan bu tez çalışması, deneysel çalışmalar ve matematiksel modelleme çalışmaları olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde, tavuk karkas geometrisini temsil etmek amacıyla, eliptik geometriye sahip % 2'lik (w/w) agar proses edilmiş ve mikrodalga uygulama sırasında geometrinin farklı noktalarından elde edilen anlık sıcaklık verileri bir sonraki aşama olan matematiksel model çalışmasında model doğrulama amacıyla kullanılmıştır.
- Gerçek tavuk but örneklerine NaCl çözeltisi uygulanmış ve bu örneklerde tuz analizi yapılarak uygulamanın deri bölümü tuz konsantrasyonunu ne kadar etkilediği belirlenmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen deneylerde, tavuk karkası deri bölümüne yapılan tuz çözeltisi uygulamanın
 - o endüstriyel bir proseste kolayca gerçekleştirilebileceği ve
 - o bu uygulama ile artan tuz konsantrasyonun bir sonraki mikrodalga uygulama sırasında mikrodalga enerjiyi yüzeyde tutabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.
- Daha sonra, matematiksel model çalışmalarında kullanılmak üzere %2'lik agar ve NaCl çözeltisi uygulanmış ve uygulanmamış tavuk deri örneklerinin dielektrik özellikleri ölçülmüştür.

Matematiksel model geliştirme çalışmaları kapsamında ise;

- %2'lik agarın laboratuvar ölçekli bir mikrodalga sistemde proses edilmesi sırasında elde edilen sıcaklık değişim verilerinin model doğrulaması amacıyla kullanılması için, belirtilen deneysel koşullarda matematiksel model geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

- Deneysel verilerle doğrulanan matematiksel modeller kullanılarak NaCl konsantrasyonunun ürün yüzey sıcaklık değişimine etkisini gözlemleyebilmek amacıyla % 2'lik agarın dış kısmına, tavuk deri bölgesi kalınlığında, farklı konsantrasyonlardaki NaCl çözeltisi katmanı tanımlanmış ve mikrodalga uygulama sırasında ürün yüzey bölgesi sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Bu verilerin, tavuk karkasında deri bölgesine tuz çözeltisi uygulama kapsamında elde edilen veriler kullanılarak, endüstriyel proses uygulama amacıyla model geliştirme çalışmalarına bir temel oluşturması amaçlanmıştır.
- Son olarak; endüstriyel bir mikrodalga sistem için matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu mikrodalga sistemde ürün olarak, tavuk karkası kullanılmış ve ürün geometrisi gerçeğe uygun olarak oluşturulmuştur. But kısımlarının geometriye dahil edildiği ve edilmediği durumlar için farklı matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. Endüstriyel mikrodalga sistem geometrisi içerisine tavuk geometrisi yatay olarak merkeze veya dikey olarak merkez dışı bir konuma yerleştirilmiş ve tavuk geometrisi yüzey bölümüne belirlenen konsantrasyondaki NaCl çözeltisi özellikleri tanımlanmıştır. Böylece mikrodalga uygulama sırasında ürünün iç kısımlarında ısınma meydana gelmeden sadece yüzeyinin ısıtılması sağlanmış (yüzey dielektrik özelliklerinin değişmesi ile penetrasyon derinliğinin azaltılması ve elektromanyetik enerjinin ürün yüzeyinde absorbe edilmesi sağlanmıştır) ve proses yüzey dekontaminasyon prosesi olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmalar kapsamında, üründe bölgesel ısınmalara bağlı olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklığa ulaşan kesimlerin varlığını önlemek amacıyla sisteme mikrodalga uygulama sırasında eş zamanlı olarak etki sağlayabilecek vurgulu hava jeti uygulaması ilave edilmiştir. Bu uygulamanın dışında, sistem içerisine su boruları eklenerek elektromanyetik alanın bir kısmının bu bölgelere yönlendirilerek ürün yüzeyinde sıcaklığı fazla yükselen bölgelerin oluşumunun önlenmesi amaçlanmıştır. Bu matematiksel modelleme çalışmalarının ardından, prosesi endüstriyel uygulamaya daha uygun hale getirmek amacıyla aynı anda daha fazla ürünün proses edilebildiği endüstriyel skalada bir sistem tasarımı yapılmış ve bu sistem için de matematiksel modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

- Simülasyon çalışmalarından elde edilen sıcaklık verileri ve *C. jejuni*'nin inaktivasyon kinetik değerleri (D- ve z-değerleri) dikkate alınarak ürün yüzey dekontaminasyon - letalite değişim değeri hesaplanmış ve buna bağlı olarak mikrobiyal konsantrasyonda meydana gelen azalmalar belirlenerek farklı mikrodalga uygulamaları için optimum proses zamanı belirlenmiştir.

3.1 Deneysel Çalışmalar

Yukarıda da özetlendiği şekilde bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar 3 aşamadan meydana gelmektedir. İlk olarak % 2'lik agar kullanılarak laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde deneyler yapılmış ve kullanılan ürünün belirlenen noktalarından sıcaklık verisi alınmıştır. İkinci olarak tavuk but örneğine % 2 (w/w) NaCl çözeltisi 2 farklı şekilde uygulanmış ve uygulama sonunda tavuk derisindeki NaCl miktarının belirlenmesi amacıyla tuz analizi yapılmıştır. Son olarak ise NaCl çözeltisi uygulanmamış ve uygulanmış tavuk but örneklerinin ve % 2'lik agarın dielektrik özellikleri sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

3.1.1 %2'lik agar kullanılarak yapılan deneyler

2450 MHz frekansta çalışan LG MS2022D model laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde (şekil 3.1) % 2'lik (w/w) agar ile deneyler gerçekleştirilmiştir. 18 cm yükseklik, 25,5 cm derinlik ve 29,3 cm genişlikteki mikrodalga kavitenin duvarları alüminyum olup; alüminyum elektromanyetik dalgaların tamamını yansıtabilir özelliktedir. Eşmerkezli yapıya sahip olan magnetron TEM (Transvers Elektrik ve Manyetik) modunda çalışmaktadır. Bu sistemde 70 W – çözdüme seviyesi, 360 ve 500 W olmak üzere 4 farklı güç seviyesi ve magnetronun aşırı ısınmasını engellemek amacıyla kesikli bir çalışma uygulaması bulunmaktadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, % 2'lik (w/w) agar ile yapılan çalışmalar çözdüme ayarında gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek güç uygulamalarında, kullanılan geometrinin kavite içersinde kapladığı hacime de bağlı olarak ortaya çıkan lokal sıcaklık artışları nedeniyle bazı bölgelerde erime meydana

geldiğinden ve buna bağlı olarak da ürünün katı formunda bozulma meydana geldiğinden sadece çözündürme ayarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Modellerin doğrulanması amacıyla hazırlanmış olan % 2'lik (w/w) agar (Lab M, Agar No 1 Bact. High Clarity) geometrisi şekil 3.1'de gösterilen mikrodalga sistemde proses edilmiştir. Maliyetinin düşük olması ve kolayca katı ve homojen formda bir yapı elde edilebilmesi nedeniyle agar ile katılaştırılarak elde edilen bir geometrinin kullanımı model doğrulama çalışmaları kapsamında tercih edilmiştir. Bu amaçla % 2 agar saf su içerisinde, berrak bir çözelti elde edilinceye kadar manyetik ısıtıcılı karıştırıcıda ısıtılmıştır. Çözelti berrak hale geldiğinde, şekil 3.2.a'da gösterilen plastik kaba dökülmüş ve 1 gece bu kabın içerisinde buzdolabı sıcaklığında ($\sim 4^{\circ}\text{C}$) bekletilerek kabın şeklini alması ve katı hale geçmesi sağlanmıştır. Kap seçiminde, tavuk geometrisine benzerliği nedeniyle eliptik geometriye yakın olmasına özen gösterilmiştir. Kullanılan polipropilen kap ve agar çözeltisinin şekil almış hali şekil 3.2'de görülmektedir. Oluşan geometrinin dikey pozisyonu için a ve b eksen 5,7 cm c eksen 9 cm'dir.



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



(a)



(b)

Şekil 3.2 Deneysel çalışmalar için hazırlanan %2 agar çözeltisinin şekil alması için kullanılan polipropilen kap (a), hazırlanan agar çözeltisinin katı formu (b)

Mikrodalga sistemin dur-kalk döngüsünü belirlemek ve noktasal doğrulama yapmak amacıyla şekil 3.3'te görülen Fiso-UMI (FISO, Quebec, QC, Canada) sıcaklık veri toplama sistemi ve fiber optik probalar kullanılarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.3 (a) Fiso-UMI sıcaklık veri toplama sistemi ve (b) Fiber optik prob



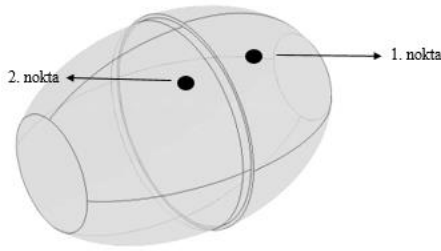
(a)



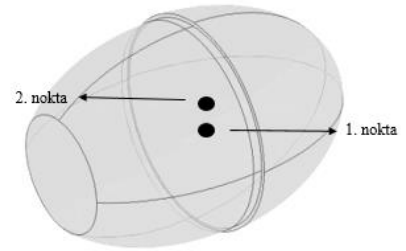
(b)

Şekil 3.4 Deneyler sırasında mikrodalga sistem içersine yerleştirilen %2'lik agar

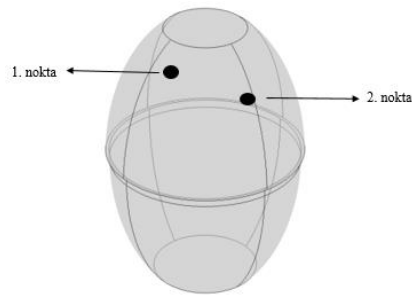
a. yatay pozisyon, b. dikey pozisyon



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.5 Agar çözeltisi ile yapılan deneylerde sıcaklık verilerinin alındığı noktalar

a. deney 1, b. deney 2, c. deney

Agar çözeltilerinin 90 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sıvı forma geçtiği bilinmektedir (Anonim 2020a). Deney sırasında özellikle yüzeyde kolay olarak yüksek sıcaklıklara ulaşıldığından elde edilen katı, sıvı forma geçip mikrodalga sisteme de zarar vermesini engellemek amacıyla, proses sırasında mikrodalgaya tamamen geçirgen olan polipropilen bir kap içerisine yerleştirilmiştir (şekil 3.4). Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi doğrulama çalışmaları sırasında agar çözeltisi ev tipi mikrodalga sistem içerisine yatay ve dikey pozisyonda yerleştirilmiş, her deney çalışması için 2 farklı noktadan sıcaklık verisi alınmıştır. Yatay pozisyondaki agar çözeltisi için 2 (deney 1 – deney 2), dikey pozisyondaki için ise 1 adet (deney 3) olmak üzere 3 ayrı deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sıcaklık değişim verileri matematiksel model doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır.

3.1.2 NaCl çözeltisi uygulanan tavuklarda tuz analizi

Bu çalışmalar kapsamında, deneysel veriler kullanılarak doğrulanan matematiksel modellerde tavuk karkas yüzeyinin belli bir NaCl konsantrasyonunda olduğu varsayımı yapılmış ve bu bağlamda mikrodalga uygulaması ile bir yüzey dekontaminasyon uygulaması gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Ancak, ürün yüzeyinin belli bir konsantrasyonda NaCl içerebilmesi için endüstriyel bir proseste nasıl bir uygulama yapılabileceğini gösterebilmek amacıyla ürüne daldırma ve püskürtme yöntemiyle % 2 NaCl çözeltisi uygulaması yapılmış ve ürün yüzeyine ne kadar NaCl'ün difüze olacağını belirlemek amacıyla da üründe tuz analizi yapılmış ve bu koşullarda ürün yüzeyi (deri bölgesi) dielektrik özellikleri sıcaklık değişiminin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

Bu bölümde, öncelikle % 2 (w/w)'lık NaCl çözeltisi hazırlanmış ve yerel bir marketten alınan 3 adet piliç but örneğinin 1 tanesine herhangi bir işlem uygulanmamış, 1 tanesine boş sprej şişesine doldurulan NaCl çözeltisinden püskürtülmüş ve sonuncusu ise üzerini kapatacak kadar NaCl çözeltisi içeren bir küvete yerleştirilmiştir. Uygulama sonrasında her 3 örnek de gastronom küvet ile birlikte buzdolabına kaldırılmış ve 2 saat bekletilmiştir (şekil 3.6). Ardından kontrol grubu ve NaCl çözeltisi uygulanmış 2 piliç butunun her birinden 3 ayrı bölgeden yaklaşık 3 g örnek alınmış, sabit ağırlığa getirilmiş, darası

alınmış kroze içerisine tartılmış ve gri-beyaz kül rengi elde edilinceye kadar kül fırınında yakılmıştır. Kül, sıcak destile su ile yıkanarak külsüz filtre kağıdından erlenmayer içerisine filtre edilmiştir. Üzerine 3-4 damla %5'lik K_2CrO_4 eklenip ve 0,1 N $AgNO_3$ çözeltisi ile kiremit kırmızısı renge titre edilmiştir. Titrasyon sonrasında eşitlik 3.1 ile örneklerdeki % NaCl miktarı hesaplanmıştır.

$$\% NaCl = \frac{V \times 0,00585}{m} \times 100 \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte V; titrasyonda harcanan 0,1 N $AgNO_3$ çözeltisini (mL), m ise analizin başında tartılan örnek miktarını (g) ifade etmekte olup çalışmanın bu bölümünde endüstriyel bir uygulamada da gerçekleştirilebilecek bir deneysel çalışma yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 3.6 Tuz analizi için gastronom küpote yerleştirilmiş tavuk but örneği

3.1.3 Dielektrik özellik ölçümleri

Mikrodalga uygulama sırasında oluşan elektromanyetik alanın ısıya dönüşümü, muamele edilen malzemenin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü ile tanımlanan dielektrik özellikler sadece ürün ve mikrodalga arasındaki

etkileşimi incelemeye yardımcı olmakla kalmayıp aynı zamanda ürünün ısınma karakterleri hakkında da bilgi vermektedir. Bu amaçla bu tez kapsamında % 2'lik agar çözeltisinin ve NaCl çözeltisi uygulanmış tavuk derilerinin 915 ve 2450 MHz frekansta sıcaklığa bağlı olarak dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Bu amaçla şekil 3.7'de görülen Network Analyzer E5061B (Agilent Technologies E5061B ENA Series Network Analyzer, Santa Clara, CA, USA) cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Dielektrik özellikleri ölçmek amacıyla kullanılan ağ analiz sistemi

3.1.3.1 % 2'lik agarın dielektik özelliklerinin ölçülmesi

% 2'lik agar çözeltisi kullanılarak hazırlanan katı geometrinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimini tespit edebilmek amacıyla 10, 25, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda dielektrik özellik ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda 915 ve 2450 MHz olmak üzere 2 farklı frekans değerinde dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü değerleri kaydedilmiştir.

3.1.3.2 NaCl çözeltisi uygulanmış tavuk but örneklerinin dielektrik özelliklerinin ölçülmesi

Açıklandığı üzere gerçek tavuk but örneklerinde yapılan çalışmanın devamı olarak % 2 NaCl çözeltisi ile muamele edilmeyen, püskürtülerek ve daldırılarak muamele edilen örneklerin deri kısımları çıkarılarak sıcaklığa bağlı olarak 915 ve 2450 MHz frekanstaki dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Bu kapsamda 24, 40 ve 60 °C’de ölçüm yapılmıştır. Deri örnekleri 24 °C için oda sıcaklığında bekletilmiştir. 40 ve 60 °C için ise 65 °C’ye ayarlanmış, buzdolabı poşetleri içerisine konmuş örnekler su banyosunda bekletilmiş ve istenilen sıcaklığa ulaştığında ölçüm yapılmıştır.

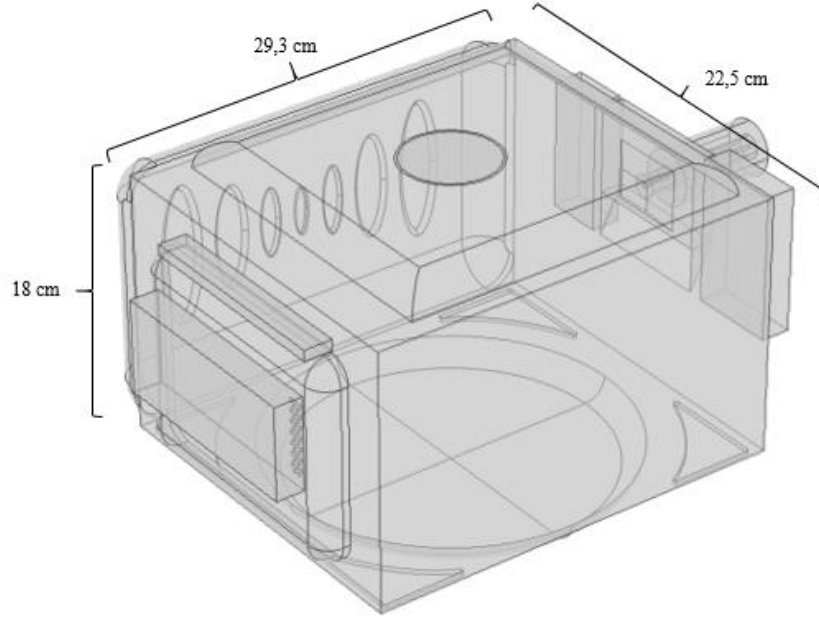
3.2 Matematiksel Modelleme Çalışmaları

Bu tez kapsamında öncelikle mikrodalga uygulamanın ürün sıcaklık dağıtımına ve NaCl konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ürün yüzey sıcaklık dağıtımına etkisini göstermek amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiş ve deneysel veriler kullanarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu model çalışması kapsamında amaç, özellikle mikrodalga uygulama ile ürün yüzey sıcaklığında istenilen artışın sağlanması olarak belirlenmiştir. % 2’lik katı agar geometrisi kullanılarak model doğrulama çalışmaları tamamlandıktan sonra, yüzeyde (tavuk derisi kalınlığında bir katmanda) NaCl konsantrasyonuna bağlı olarak yüzey sıcaklık profilinde meydana gelen değişimler belirlenmiş ve son olarak ise tezin nihai amacı olan tavuk karkasında yüzey dekontaminasyonu için matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilerek ürün yüzey sıcaklık değişimine bağlı olarak mikrobiyal inaktivasyon değerleri hesaplanmıştır.

3.2.1 Agar geometrisi kullanılarak hazırlanan matematiksel modeller

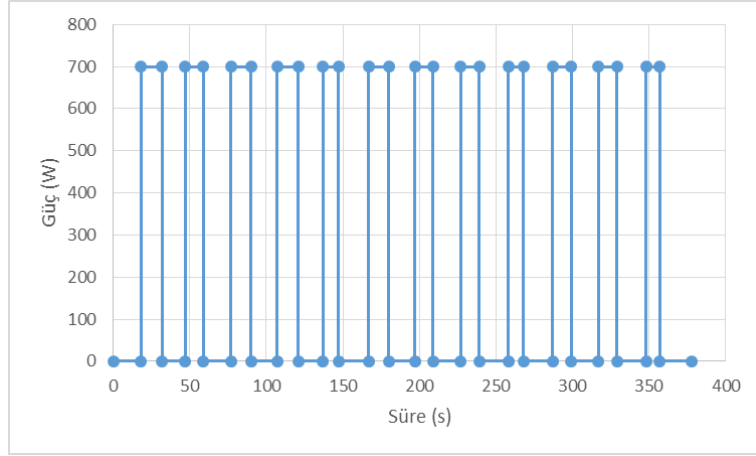
3.2.1.1 Matematiksel model doğrulama çalışmaları

Deneysel doğrulama çalışmalarını gerçekleştirmek amacıyla laboratuvar ölçekli sistem kullanılarak elde edilen deneysel veriler temelinde sistem geometrisi oluşturulmuş ve bu bağlamda matematiksel model çalışması çoklu fizik programı olan COMSOL V5.2 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere, doğrulama çalışmaları amacıyla LG MS2022D model mikrodalga fırın kullanılmıştır. Sistem geometrisinin oluşturulması amacıyla kavite, magnetron ve dalga kılavuzunun boyutları ölçülmüş ve bu sistemde model geometrisi hazırlanmıştır (şekil 3.8). Mikrodalga sistem geometrisinin oluşturulmasının ardından agar çözeltisi için de geometri oluşturulmuş ve materyal özellikleri tanımlanmıştır. Modelleme sırasında kullanılmak üzere agar çözeltisinin dielektrik ve termofiziksel özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dielektrik özellikleri Bölüm 3.1.3'te açıklandığı şekilde ölçülmüştür. Termofiziksel özellikler için ise; Erdoğan vd. (2010)'nin belirttiği üzere % 2 agar içeren çözeltilerin termofiziksel özelliklerinin su ile aynı olduğu kabulü yapılmıştır.

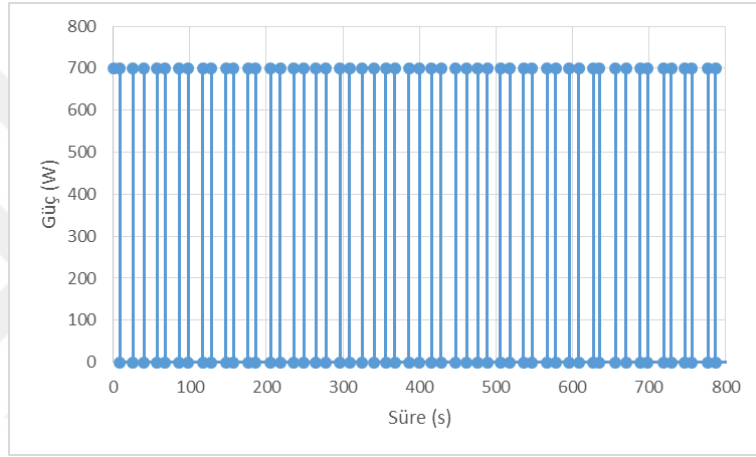


Şekil 3.8 Laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemin matematiksel modelleme için hazırlanan geometrik yapısı

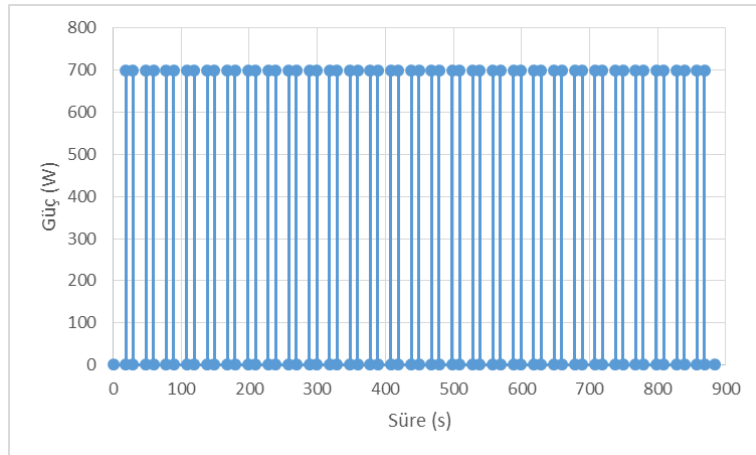
Mikrodalga uygulama sırasında ürün içerisinde sıcaklık dağılımının belirlenmesi amacıyla, deneysel verilere bağlı olarak, başlangıç ve sınır koşulları belirlenmiş ve ağ yapısı oluşturulmuştur. Hazırlanan model ile kavite ve üründe oluşan elektromanyetik alan ve ürün sıcaklığının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında sıcaklık ölçümü yapabilmek amacıyla laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem üzerinde yarıçapı 3,385 cm olan delik kullanılmıştır. Tepedeki bu delikten, uygulama sırasında elektromanyetik dalga çıkışı olduğu belirlendiğinden hazırlanan matematiksel modelde bu alan ‘saçılma sınır koşulu’ ile tanımlanmıştır. Tanımlanan sınır koşulu, deliğin olduğu bölgenin dalga çıkışı için transparan özellikte olmasını sağlamıştır.



(a)



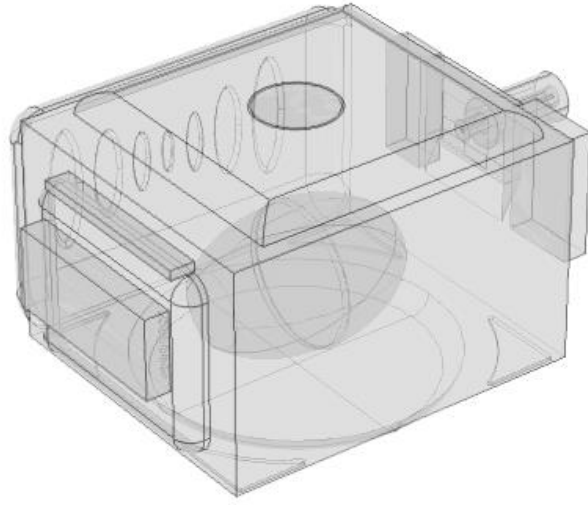
(b)



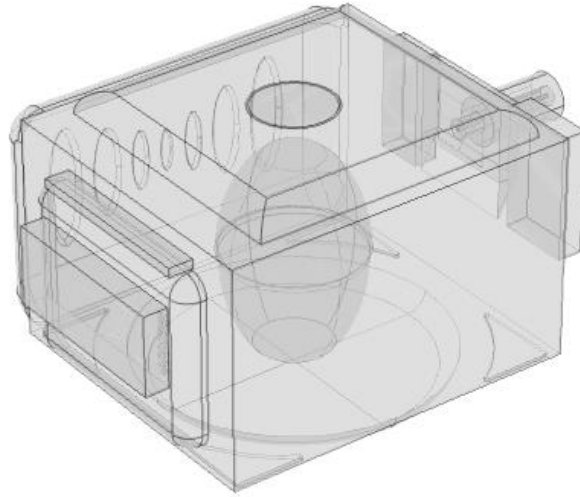
(c)

Şekil 3.9 Mikrodalga sisteme ait dur-kalk döngüsü

a. deney 1, b. deney 2, c. deney 3



(a)



(b)

Şekil 3.10 Matematiksel modelleri doğrulama çalışmaları kapsamında mikrodalga sistem içerisine yerleştirilen % 2'lik agar

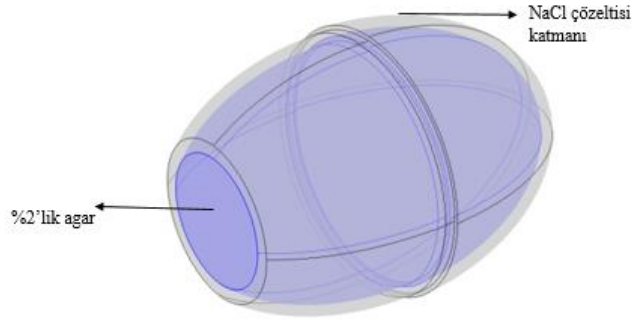
a. yatay pozisyon, b. dikey pozisyon

Bunun yanı sıra matematiksel model çalışmalarında kullanılmak üzere mikrodalga sistemde uygulama sırasında ortaya çıkan dur-kalk döngüsü de belirlenmiş ve buna bağlı olarak sistem güç değeri sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Agar geometrisi kullanılarak yapılan 3 deney çalışmasında, mikrodalga sistemin çalışması sırasında gözlenen dur-kalk döngüleri şekil 3.9'da gösterilmiştir. Tüm deneyler sırasında çalışma aralıklarının benzer

olduğu bu şekilde görülmektedir. Deney 1’de proses süresi 380 s, deney 2’de 805 s ve deney 3’te ise 885 s olarak, ürün geometrik oryantasyonuna bağlı olarak meydana gelen (ürün içerisinde sıcaklık ölçümünün yapıldığı bölgelere göre değişen) sıcaklık değişimine bağlı olarak, uygulanmıştır. Matematiksel model doğrulama çalışmalarında % 2’lik katı agar geometrisi mikrodalga sistem içerisinde deney 1 ve deney 2 için yatay pozisyonda, deney 3 için ise dikey pozisyonda (şekil 3.10) yer almakta olup deneysel sıcaklık verilerinin ürün içerisinde alındığı noktaların konumları şekil 3.5’te gösterilmiştir.

3.2.1.2 NaCl yüzey konsantrasyonunun ürün sıcaklık değişimine etkisinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan matematiksel modeller

Ürün yüzeyine uygulanacak olan NaCl yüzey konsantrasyonunun ürün yüzey ve hacimsel sıcaklık değişimine etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, deneysel veriler kullanılarak doğrulanan matematiksel model temelinde model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, % 2 katı agar geometrisinin sistem içerisine yatay olarak yerleştirilmiş olduğu geometrik düzen temelinde bir model hazırlanmış ve bu modelde ürün yüzeyinde 0,5 cm kalınlığında (tavuk karkaslarında bulunan deri bölgesini temsilen) bir bölge olduğu ve bu bölgenin belli bir NaCl konsantrasyonunda olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu bağlamda, tavuk karkaslarına NaCl çözeltisi uygulama sırasında çözeltinin ürün deri bölgesine difüze olacağı ve bu bölgenin dielektrik özelliklerinin değişeceği varsayımı yapılmıştır (şekil 3.11). Planlanan bu hayali katman temelinde 4 ayrı simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. 1 modelde bu katmanın ürünün geri kalan (% 2’lik agar) bölgeleri ile aynı; diğer 3 modelde ise % 1, % 2 ve % 4 NaCl (w/w) çözeltilerinin dielektrik özelliklerine sahip olduğu yaklaşımı uygulanmıştır. Bu bağlamda diğer termodinamik özelliklerin ise değişmediği varsayılmıştır. Daha önce de açıklandığı üzere, bu bölümde gerçekleştirilen matematiksel model çalışmalarında amaç, mikrodalga uygulama ile sadece ürün yüzey bölgesinde sıcaklık artışı sağlanarak bir yüzey dekontaminasyon uygulamasının yapılabilmesini göstermektir. Bu simülasyon çalışmalarında mikrodalga uygulama için deney 2’ye ait dur-kalk döngüsü ile bu deney çalışmasında elde edilen başlangıç ve sınır koşulları kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Agar ve NaCl çözeltisine ait geometrik yapı

% 2 ve % 4 NaCl çözeltisinin dielektrik özellikleri için Gıda Mühendisliği bölümü - Computational Food Processing (CF π) grubu tarafından sıcaklık ve frekansın fonksiyonu olarak ölçülen değerler kullanılmıştır. % 1 NaCl için ise % 2 ve % 4 için bilinen değerlere ekstrapolasyon yapılmıştır. Tez kapsamında 915 MHz frekansta % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özelliklerine de ihtiyaç duyulacağından bu frekanstaki dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü çizelge 3.1 'de verilmiştir. 2450 MHz frekans için ise % 1, % 2 ve % 4 NaCl içeren çözeltilerin dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörünün sıcaklık ile değişimi çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 915 MHz frekansta % 2 (w/w) NaCl çözeltilerinin dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık (°C)	ϵ'	ϵ''
8	83,88	58,53
20	76,92	67,70
38	67,34	90,99
57	64,66	121,17
77	57,93	145,59

Çizelge 3.2 2450 MHz frekansta % 1, % 2 ve % 4 (w/w) NaCl çözeltilerinin dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık (°C)	ϵ'			ϵ''		
	%1	%2	%4	%1	%2	%4
8	81,65	79,20	74,30	26,66	34,98	51,60
20	76,95	73,98	68,03	24,82	34,13	52,74
38	74,14	69,66	60,69	27,71	39,71	63,72
57	68,74	64,40	55,73	33,65	49,37	80,79
77	62,91	58,85	50,74	35,63	57,19	100,31

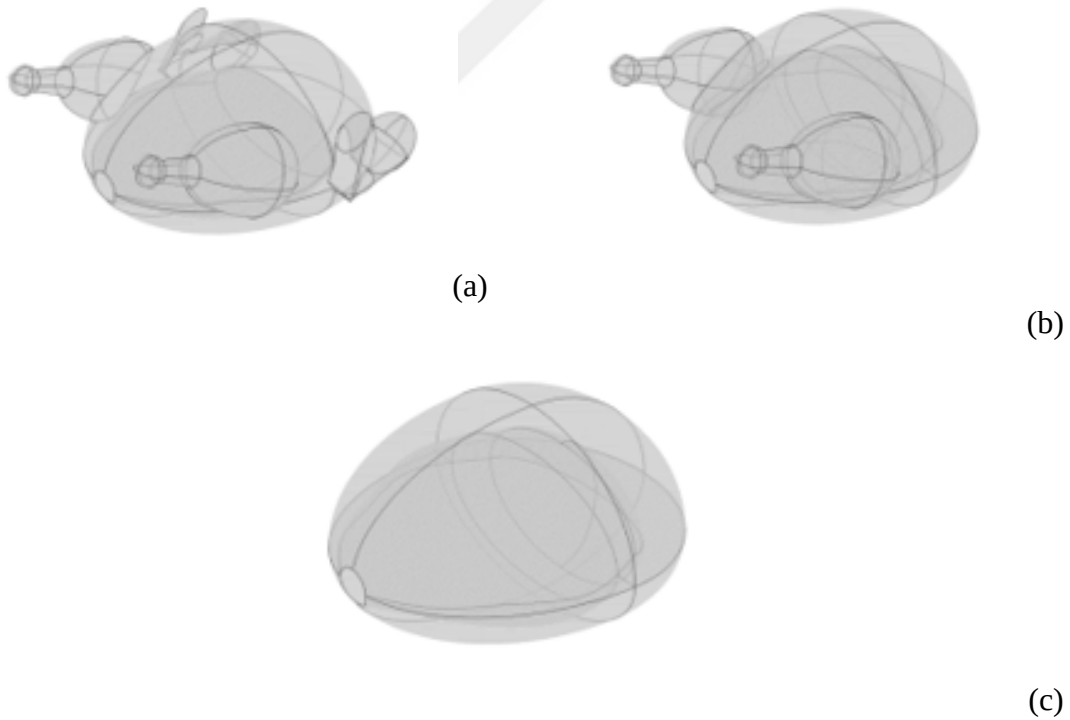
Belirtilen çözeltiler için ısı iletim katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi değerleri ise COMSOL çoklu fizik programının materyal kütüphanesindeki suyun özellikleri olarak kullanılmıştır.

3.2.2 Tavuk geometrisi kullanılarak hazırlanan matematiksel modeller

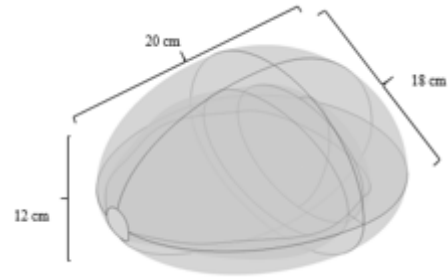
Matematiksel model doğrulama çalışmaları tamamlanıp, deneysel verilerle doğrulanmış modelin mikrodalga uygulamanın sadece ürün yüzey sıcaklık artışı amacıyla kullanımı gösterildikten sonra direkt olarak tavuk geometrisinin kullanıldığı model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 3 boyutlu tavuk geometrisi oluşturmak amacıyla yerel bir marketten alınan tavuk karkası kullanılmış ve şekil 3.12.a'da görülen geometri COMSOL çoklu fizik programı kullanılarak hazırlanmıştır. Kullanılan karkas içeriğinde, tavuk iç organları çıkartıldığından oluşturulan geometride de iç kısım boş olarak hazırlanmış; kanat ve but parçaları da gerçek geometriyi yansıtacak şekilde oluşturulmuştur. Ancak, yapılan ön çalışmalarda kanat kısmının küçük parçalardan oluşmasına bağlı olarak modelde ekstra ağ yapısı ve buna bağlı olarak daha fazla RAM ihtiyacı doğurduğu fark edilmiş ve tez çalışması kapsamında kanat kısımları olmayan geometriler kullanılmıştır (şekil 3.12.b). Şekil 3.12.b'deki geometri kullanılarak hazırlanan modellerde ise but kısımlarında meydana gelen aşırı sıcaklık artışlarına bağlı olarak sadece karkas yüzey

sıcaklık değişimini daha net olarak belirleyebilmek amacıyla geometriden but kısımları da çıkarılarak şekil 3.12.c'deki tavuk geometrisi kullanılmıştır. Şekil 3.3'te net olarak gösterildiği gibi karkasın ana gövdesi eliptik bir geometriye sahip olup, ortalama olarak a eksenini 20 cm, b eksenini 18 cm ve c eksenini 12 cm'dir.

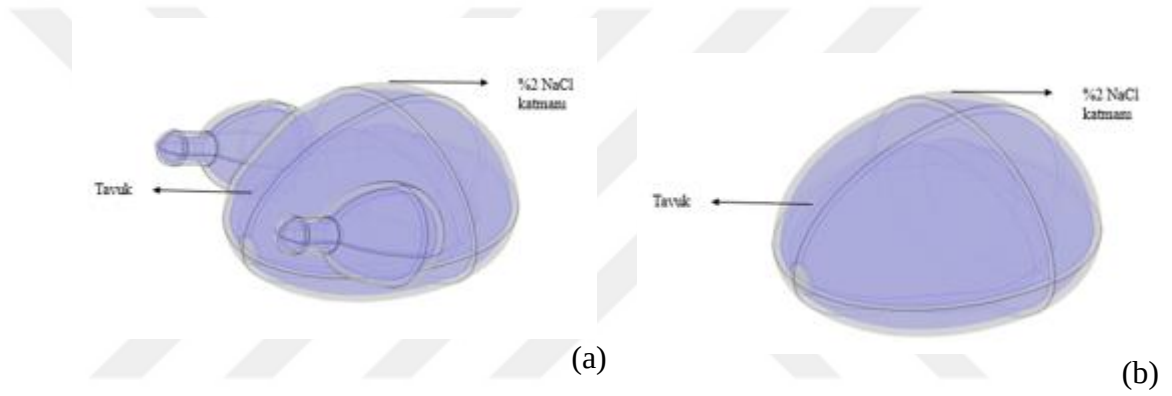
Karkas dış yüzeyinde bulunan derinin % 2 NaCl içerdiği (gerçek bir proseste yüzeye spreng uygulaması düşünülebilir) varsayımıyla şekil 3.14.a ve b'de görüldüğü gibi tavuk geometrisinin dışına 0,5 cm kalınlığında bir bölge oluşturulmuş ve ürün yüzeyine uygulanan NaCl etkisinin ürün sıcaklığına etkisini göstermek amacıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları bu geometri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 915 MHz frekansta tavuk göğsünün dielektrik özellikleri için Nelson vd. (2007)'nin, 2450 MHz frekans için ise Sipahioglu vd. (2003)'nin çalışmasından yararlanılmıştır. Bu değerler sırasıyla çizelge 3.3 ve çizelge 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.12 Tez kapsamında hazırlanan (a) bütün tavuk, (b) kanat kısmı çıkarılmış tavuk, (c) kanat ve but kısmı çıkarılmış tavuk karkas geometrisi



Şekil 3.13 Tavuk karkas ana gövdesi geometrik yapısı



Şekil 3.14 Tez kapsamında hazırlanan dış yüzeyinde belirli bir NaCl konsantrasyonuna sahip (a) kanat kısmı çıkarılmış (b) kanat ve but kısmı çıkarılmış tavuk karkas geometrisi

Çizelge 3.3 2450 MHz frekansta tavuk göğsüne ait sıcaklıkla değişen dielektrik özellikler (Sipahioglu vd. 2003)

Sıcaklık (°C)	ϵ'	ϵ''
15	56,0	18,5
20	56,0	18,3
25	55,8	18,2
30	55,7	18,3
35	55,4	18,4

Çizelge 3.3 2450 MHz frekansta tavuk göğsüne ait sıcaklıkla değişen dielektrik özellikler (Sipahioglu vd. 2003) (devam)

40	55,1	18,5
45	54,8	18,8
50	54,5	19,2
55	53,5	19,6
60	53,2	20,2

Çizelge 3.4 915 MHz frekansta tavuk göğsüne ait sıcaklıkla değişen dielektrik özellikler (Nelson vd. 2007)

Sıcaklık (°C)	ϵ'	ϵ''
5	61	23
25	60	22
45	59	29
65	57	31

Tavuk karkasının elektriksel iletkenlik değeri 0,7 S/m (Sarang vd. 2008), ısıl iletim katsayı 0,47 W/m.K (Ngadi ve Ikediala 1998), yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi değerleri ise sırasıyla 1070 kg/m³ ve 3542 J/kg.K (Hobani ve Elansari 2008) olarak kullanılmıştır. Belli bir NaCl konsantrasyonuna sahip olduğu kabul edilen ürün dış yüzeyi için de elektriksel iletkenlik değeri olarak tavuk karkası için kullanılan 0,7 S/m değeri kullanılmıştır. Ürün su konsantrasyonuna bağlı olarak elektriksel iletkenlik değerinin mikrodalga ısıtma sırasında etkin olmadığı varsayımına bağlı olarak aynı değer kullanılmıştır. Dış yüzey için termofiziksel değerlerin belirlenebilmesi amacıyla Choi ve Okos (1986)'un sıcaklığa ve ürünün kimyasal bileşimine bağlı olarak oluşturduğu denklikler kullanılmıştır. Kimyasal bileşim için Henry vd. (2019)'nin belirttiği tavuk derisinin bileşimine ait veriler kullanılmış ve 20 °C için ısıl iletim katsayı, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi değerleri sırasıyla 0,40 W/m.K, 1017 kg/m³ ve 3110 J/kg.K olarak

hesaplanmıştır. Bu katmanın dielektrik özellikleri için ise çizelge 3.1’de verilen % 2 NaCl çözeltisine ait değerler kullanılmıştır. Bunun yanı sıra yukarıda bahsedildiği gibi gerçek tavuk but örneklerine NaCl uygulaması yapılarak derinin dielektrik özellikleri belirlenmiştir ve uygulamanın etkinliğini inceleyebilmek amacıyla matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu model çalışmalarında, ölçülen dielektrik özellikler tavuk dışında oluşturulan 0,5 cm’lik katmana tanımlanmıştır. Ayrıca oluşturulan bu modelde termofiziksel özellikler, bu katmana % 2 NaCl özellikleri tanımlandığında kullanılan ve yukarıda belirtilen değerler olarak uygulanmıştır ($k = 0,40 \text{ W/m.K}$, $\rho = 1017 \text{ kg/m}^3$ ve $c_p = 3110 \text{ J/kg.K}$).

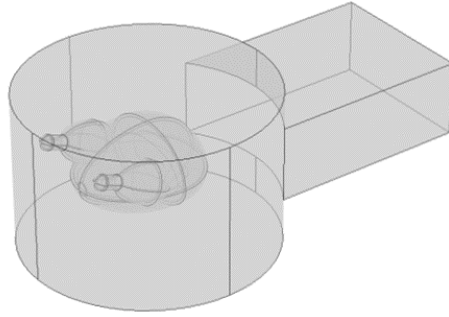
Tavuk geometrisi kullanılarak öncelikle 915 MHz’te çalışan pilot ölçekte bir mikrodalga sistemde matematiksel modeller hazırlanmıştır. Bu model çalışmaları kapsamında ürün dış yüzeyinde bazı bölgelerin pişme derecelerinin üzerinde ısındığı görülmüş ve bu durumu önlemek amacıyla sistem içerine elektromanyetik alan dağılımını sağlayabilmek için su boruları eklenmiş ya da ürün yüzeyinde istenmeyen sıcaklık yükselişlerini önleyebilmek amacıyla vurgulu hava jeti uygulaması tanımlanmıştır. Daha sonra, aynı boyutlardaki kavite için elektromanyetik dalga rezonansını değiştirerek farklı bir alan dağılımı yaratabilmek amacıyla proses uygulaması 2450 MHz frekansta gerçekleştirilmiştir. Bu model çalışmalarının yanısıra, mikrodalga prosesi endüstriyel uygulamaya daha uygun hale getirmek amacıyla aynı anda fazla sayısında tavuk karkasının proses edilebileceği 2450 MHz frekansta çalışan bir tünel mikrodalga sistem kapsamında da model çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1 Silindirik kavitede oluşturulan matematiksel modeller

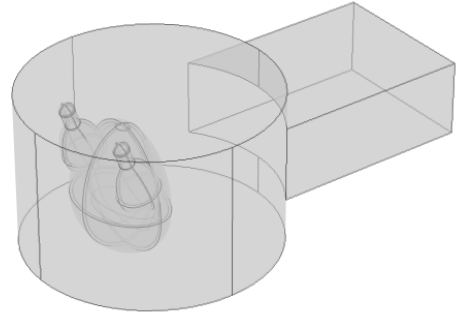
Tez çalışmasının bu bölümünde, genelde endüstriyel sistemlerde kullanılan silindirik kavite mikrodalga sistem temel alınarak matematiksel modeller hazırlanmıştır. Kavitenin yarıçapı 20,3 cm ve uzunluğu 25,4 cm’dir. Dalga kılavuzu ise dikdörtgenler prizması şeklinde olup, genişliği 67,3 cm, derinliği 24,8 cm ve uzunluğu 12,4 cm olarak kullanılmıştır. Dalga kılavuzu ve kavitenin geometrik yapısı şekil 3.15’te gösterilmiştir. Şekil 3.15.a’da tavuk geometrisinin silindirik kavite içerisine kavitenin merkezinde

olacak şekilde yatay olarak yerleştirildiği, şekil 3.15.b’de ise dik pozisyonda yerleştirildiği oryantasyonlar görülmektedir. Yatay pozisyondaki tavuk geometrisi 90° döndürülüp 5 cm kaydırılarak şekil. 3.15. b’deki geometri elde edilmiştir. Şekil 3.15.a ve b’de görülen tavuk geometrileri but yapısını içermektedir. Ancak yukarıda açıklandığı üzere oluşturulan tüm modellerde but geometrisi bulunmamaktadır. Bu çalışmalarda proses süresi 450 s olarak belirlenmiştir.

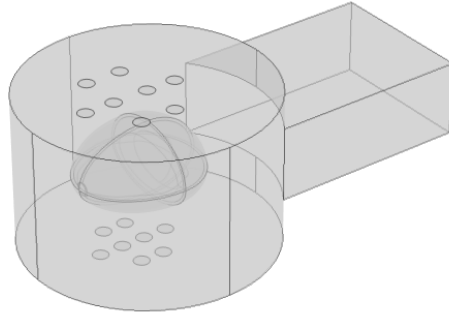




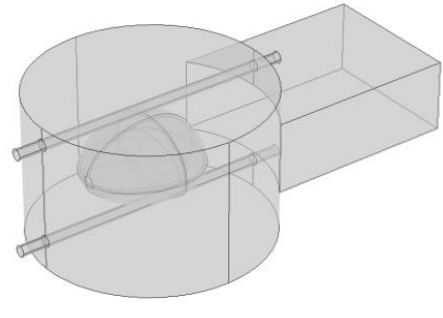
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.15 Silindirik kavite mikrodalga sistem geometrisi

a. ürünün kavite içerisine yatay pozisyonda yerleştirildiği matematiksel model, b. Ürünün kavite içerisine dikey pozisyonda yerleştirildiği matematiksel model, c. vurgulu jet ilave edilen matematiksel model, d. Su akış sistemi ilave edilen matematiksel model

915 MHz frekansta çalışan endüstriyel mikrodalga sistem:

Silindirik kavite için 915 MHz’te oluşturulan matematiksel modellerin özetlendiği şema şekil 3.16’da gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi tavuk karkasının but geometrisi içerip içermemesinin ve tavuk geometrisinin sistem içerisinde dikey ya da yatay konumda olmasının sıcaklık profiline etkisi matematiksel model çalışmaları kapsamında incelenmiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi tavuk but kısmında aşırı ısınma meydana gelmesi nedeniyle but kısımları çıkarılmıştır.

Ayrıca tezin asıl amacı olan NaCl çözeltisinin etkisini değerlendirebilmek amacıyla NaCl çözeltisi katmanı için tavuk geometrisi dışına oluşturulan 0,5 cm'lik katmana % 2 NaCl çözeltisinin özellikleri yerine, yine tavuk karkasına ait dielektrik ve termofiziksel özellikler kullanılarak matematiksel model hazırlanmıştır.

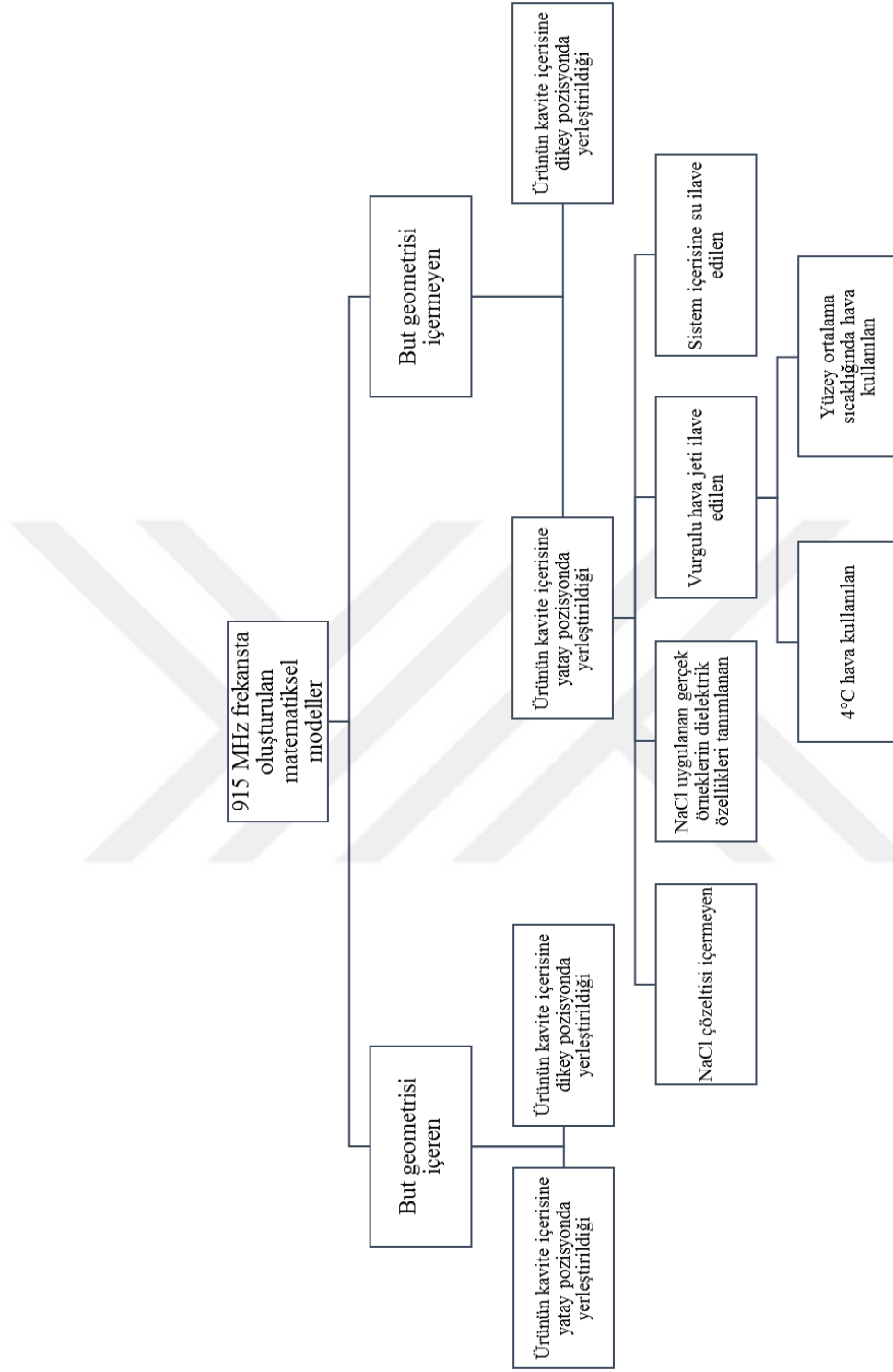
Bunun dışında, NaCl çözeltisi uygulanması ile tavuk karkasının dış yüzeyinde meydana gelen değişimi belirlemek amacıyla bölüm 3.1.3.2'de açıklandığı üzere, gerçek tavuk but örnekleri kullanılarak dielektrik ölçüm yapılmış ve bulunan değerler 0,5 cm'lik katmanın dielektrik özellikleri olarak tanımlanmıştır. Daldırma yöntemi kullanılarak NaCl uygulaması yapılan tavuk but örnekleri için ölçülen dielektrik özelliklerin kullanıldığı modelde, dış katman için tavuk derisinin termofiziksel özellikleri kullanılmıştır. Oluşturulan modelde sıcaklık dağılımı incelenmiştir.

Sadece tavuk geometrisi içeren modellerde belirli bölgelerin daha fazla ısındığı tespit edildiğinden, bu durumu engellemek amacıyla mikrodalga sistem içerisine vurgulu hava jetinin eklendiği simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bu matematiksel modellerde but geometrisi çıkarılmıştır. Vurgulu hava jeti uygulaması amacıyla kavitenin üst kısmına 0,5 in yarıçaplı 8 tane delik açılarak sistem içerisine 4 m/s hızla hava girişi sağlanmıştır. Benzer şekilde hava çıkışını sağlamak amacıyla kavitenin alt kısmına 8 adet 0,5 in çaplı delik açılmıştır. Sistem şekil 3.15.c'de görülmektedir. Üflenen havanın sıcaklığı da ürün sıcaklığı için oldukça etkili olduğundan, 4 °C'de havanın vurgulu jet ile sisteme giriş yaptığı temelde bir matematiksel model oluşturulmuştur. Ardından ürünün yüzey ortalama sıcaklığı anlık olarak hesaplanmış ve vurgulu jette kullanılan hava sıcaklığı olarak burada hesaplanan sıcaklık kullanılmıştır. Bu uygulama gerçek hayatta ürün yüzey sıcaklığının bir infrared kamera ile ölçülüp bu değer hava sıcaklığına geri bildirim olarak girilmesi olarak planlanmıştır.

Bunun yanı sıra, sisteme su akışı ilave edilerek elektromanyetik alanın bir kısmının su olarak tanımlanan geometride absorbe edilmesiyle tavuk karkasında sıcaklık düşüşü sağlanması hedeflenmiştir. Kavitenin alt ve üst kısmına yarıçapı 1 cm ve uzunluğu 50 cm

olan 2 adet boru yerleştirilmiştir (şekil 3.15.d). Borulardan 0,1 m/s hızla başlangıç sıcaklığı 4 °C olan su geçişi sağlanmıştır.





şekil 3.16 915 MHz frekansta oluşturulan modellerin özetı

2450 MHz frekansta çalışan endüstriyel mikrodalga sistem:

Silindirik kavitede 915 MHz frekans için tanımlanan sistem ayrıca, 2450 MHz frekans uygulaması kullanılarak da test edilmiştir. 2450 MHz frekans uygulamasında tavuk ve % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özellikleri için sırasıyla çizelge 3.3 ve çizelge 3.2’de verilen değerler kullanılmıştır. Bu uygulamada but içermeyen tavuk geometrisi ve vurgulu hava jeti kullanılmış olup üflenene hava sıcaklığı anlık deri katmanının dış yüzey sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. Hava girişi ve çıkışı 915 MHz frekans için de açıklandığı şekilde yarıçapı 0,5 in olan 8 delikten sağlanmış, hava giriş hızı da yine 4 m/s olarak uygulanmıştır.

3.2.2.2 Dikdörtgenel kavitede oluşturulan matematiksel modeller

Yukarıda açıklanan matematiksel model çalışmaları sonuçlarına bağlı olarak, aynı anda daha fazla ürünün proses edilebilmesi amacıyla daha büyük endüstriyel uygulama amacı ile kullanılabilecek bir kavite için de matematiksel model çalışmaları planlanmıştır. Bu amaçla Gıda Mühendisliği bölümü - Computational Food Processing (CF π) laboratuvarına ait endüstriyel mikrodalga sistemde olduğu gibi 2450 MHz frekansta çalışan bir mikrodalga sistem tasarlanmıştır. Kavite dikdörtgenler prizması şeklinde; genişliği 90 cm, derinliği 100,6 cm, uzunluğu 36 cm olacak şekilde planlanmıştır. Kullanılan magnetron da kavite gibi dikdörtgenler prizması şeklinde olup genişliği 4,32 cm, derinliği 8,64 cm ve uzunluğu 6,12 cm’dir. Sistem içerisinde tanımlanan her bir portun gücü 500 W olarak belirlenmiştir. Hazırlanan matematiksel model çalışmasında RAM ihtiyacını azaltmak amacıyla kavite 45 x 100,6 x 36 cm³ olacak şekilde simetrik olarak ikiye bölünmüş ve ikiye bölünen yüzeye ‘mükemmel manyetik iletken’ sınır koşulu verilerek simetrik bir model oluşması sağlanmıştır.

Daha sonra simülasyon çalışmalarından elde edilen sıcaklık verileri ile *C. jejuni*’nin D- ve z-değeri kullanılarak ürün yüzeyinde elde edilen dekontaminasyon değeri hesaplanmış ve proses etkinliği gösterilmiştir (eşitlik 3.2):

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt = D \cdot \log\left(\frac{N_0}{N}\right) \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte, T_{ref} , referans sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$); z , z değerini ve $T(t)$, zamana bağlı sıcaklık değişimini göstermektedir. Letalite değeri hesaplamalarında çizelge 2.2’de verilen z değerlerinden maksimum değer olan $6,35^{\circ}\text{C}$ ve referans sıcaklığı için ise 55°C kullanılmıştır. Modellerden elde edilen sıcaklık verileri dikkate alınarak mikroorganizma yükünde 3 ve 5 logaritmik evre azalma meydana gelmesi için gerekli süre hesaplanmıştır. Matematiksel model çalışmalarında uygulanan proses süresi en fazla 450 s olup bu sürede 3 logaritmik evreye ulaşamayan modellerde ekstrapolasyon ile 450 s’den ileri süreler için sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Benzer şekilde, modellerde 30 s aralıklarla veri alındığından aradaki sürelerde sıcaklık verisi için interpolasyon uygulanmış ve elde edilen sıcaklık değerleri ile hedef mikroorganizmanın 3 ve 5 logaritmik evre azalması için gerekli süreler hesaplanmıştır.

3.2.3 Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan denklikler, sınır koşulları, çözümleyiciler ve ağ yapısı

3.2.3.1 Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan denklikler

Mikroalga uygulama sırasında kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımını ve buna bağlı olarak sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla sonlu eleman metodunu kullanan bir çoklu fizik yazılımı olan COMSOL çoklu fizik programı kullanılmıştır. Bu bağlamda elektromanyetik alan değişimi için radyo frekans (RF) modülü, ürünün sıcaklık değişimi için ise ısı transferi (Heat Transfer) modülü kullanılmıştır. Bunlara ek olarak tavuğun aşırı ısındığı bölgeleri engellemek amacıyla su ve hava sistemi eklenen modellerde ise konveksiyonu çözmek amacıyla akış dinamiği (CFD) modülü kullanılmıştır.

Bu modüller içeriğinde kullanılan diferansiyel denklikler sırasıyla aşağıda verilmiştir:

Isı transferi denkliği:

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

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

$$Q_{abs} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot |\bar{E}|^2 \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te, f frekansı (Hz), ϵ_0 serbest uzay geçirgenlik sabiti değerini ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), ϵ'' ürünün bağıl dielektrik kayıp faktörünü ve $|\bar{E}|$ ise elektriksel alan modülü değerini (V/m) göstermektedir.

$$\nabla \left(\frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \cdot \bar{E} \right) + \nabla^2 \bar{E} + k^2 \cdot \bar{E} = 0 \quad (3.5)$$

Mikrodalga uygulaması ile elektrik alan dağılımı 3.5 numaralı eşitliğin çözülmesiyle elde edilecektir. Bu denklikte k , dalga sayısını ve ϵ ürünün dielektrik sabiti değerini göstermektedir.

Agar ile yapılan çalışmalar kapsamında laboratuvar ölçekli sistemde 2450 MHz, tavuk geometrisi kullanılarak oluşturulan endüstriyel sistemlerde ise 915 ve 2450 MHz frekans kullanılmıştır. Sistem içerisine elektromanyetik dalgaların giriş yaptığı bölüm olarak ele alınan port, laboratuvar ölçekli sistemde TEM modunda eş merkezli port kullanılırken; endüstriyel sistemlerde ise TE10 modunda dikdörtgen port kullanılmıştır. Yukarıda da açıklandığı şekilde laboratuvar ölçekli sistem için deneyden elde edilen sıcaklık verileri değerlendirilerek dur-kalk döngüsü belirlenmiştir. Endüstriyel sistem için hazırlanan silindirik kavitedeki matematiksel modellerde, yapılan ön çalışmalar sonucunda ürün için uygun olan sıcaklıklara 1000 W, dikdörtgensel kavitedeki matematiksel modellerde ise

500 W güç uygulaması sırasında ulaşıldığı belirlenmiş ve tasarım çalışmaları sırasında bu güç değeri temel olarak kullanılmıştır.

Açıklanan denklıklar kapsamında, mikrodalga uygulama sırasında, farklı sistem geometrisi ve konfigürasyonları için, % 2'lik agarın, NaCl çözeltisi katmanının ve tavuğun ısıtılması sırasında elde sıcaklık değişimi ve sistem içi elektrik alan dağılımının belirlenmesi, bir çoklu fizik problemi olarak ele alınmış ve elektromanyetik alan (eşitlik 2,3) kondüksiyonla ısı transferi denkliği (eşitlik 1) ile eş zamanlı olarak çözülmüştür.

Bunların yanında hava üfleme ve su borusunun eklendiği modellerde akışkan (hava ve su hareketi) kullanıldığından eklenen CFD modülü ile laminar akış için de çözüm yapılmıştır. Bu modellerde yukarıda verilen denklıklere ek olarak eşitlik 3.6 - 3.10 kullanarak çözülmüştür.

Enerji eşitliği:

$$v_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \cdot \nabla^2 T + Q \quad (3.6)$$

Süreklilik eşitliği:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \rho \cdot v_r) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \cdot v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot v_z) = 0 \quad (3.7)$$

Momentum eşitlikleri:

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

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

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (3.10)$$

Bu denkliklerde T sıcaklığı (K), t proses süresini (s), P basıncı (Pa), μ dinamik viskoziteyi (Pa.s), ρ yoğunluğu (kg/m³) ve α ısıl yayılım katsayısını (m²/s) ve v_r , v_θ , v_z değerleri ise silindirik koordinat sisteminde sırasıyla r, θ ve z yönlerindeki hız bileşenlerini göstermektedir.

3.2.3.2 Başlangıç ve sınır koşulları

Hazırlanan model çalışmalarında kullanılan ürünlerin başlangıç sıcaklığı sabit ve tekdüze kabul edilmiş ve ürünlerin yüzeylerinde konvektif ısı transfer sınır koşulu uygulanmıştır. Agar geometrisi kullanılarak oluşturulan modellerde ısı transfer katsayısı 10 W/m².K ve dış ortam sıcaklığı 20 °C olarak kabul edilmiştir. Laboratuvar ölçekli sistem ve endüstriyel ölçekli sistemler için oluşturulan modellerin tamamında, kavite duvarlarının elektromanyetik dalgaların tamamını yansıttığı kabul edilip mükemmel elektrik iletkenliği sınır koşulu kullanılmıştır. Agar ile laboratuvar ölçekli mikrodalga sistemde yapılan çalışmalarda ise deney sırasında agar polipropilen bir kap içerisine yerleştirilmiştir. Bu kap için ise geçirgen (transparan) sınır koşulu kullanılmıştır. Laboratuvar ölçekli sistem ile yapılan deney 1,2 ve 3 sırasında 2 farklı noktadan ölçülen sıcaklığın ortalaması hesaplanarak oluşturulan modellere başlangıç sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. Kullanan sistemlere ait başlangıç ve sınır koşulları sırasıyla çizelge 3.5 ve çizelge 3.6'da görülmektedir.

Çizelge 3.5 Çözümler sırasında kullanılan başlangıç koşulları

Sistemler	Çalışma	Isı transferi modülü	Elektromanyetik dalga modülü
Laboratuvar ölçekli sistem	Model doğrulama çalışması - Deney 1	$T_i = 7,13^{\circ}\text{C}$	Şekil 3.9.a
	Model doğrulama çalışması - Deney 2	$T_i = 6,21^{\circ}\text{C}$	Şekil 3.9.b
	Model doğrulama çalışması - Deney 3	$T_i = 8,06^{\circ}\text{C}$	Şekil 3.9.c
	NaCl çözeltisinin etkisinin	$T_i = 6,21^{\circ}\text{C}$	Şekil 3.9.b
Silindirik kavite	915 MHz'te oluşturulan matematiksel modeller	$T_i = 4^{\circ}\text{C}$	1000 W
	2450 MHz'te oluşturulan matematiksel model		1000 W
Dikdörtgensel kavite	2450 MHz'te oluşturulan matematiksel model (3 tane tavuk prosesi)		500 W

Çizelge 3.6 Çözümler sırasında kullanılan sınır koşulları

Sistemler	Çalışma	Isı transferi modülü	Elektromanyetik dalga modülü
Laboratuvar ölçekli sistem	Model doğrulama çalışması - Deney 1, 2, 3	$T_o = 20^{\circ}\text{C}$ $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$	Mükemmel elektrik iletkeni $n \times E = 0$
	NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi		
Silindirik kavite	915 MHz'te oluşturulan matematiksel modeller		
	2450 MHz'te oluşturulan matematiksel model		
Dikdörtgensel kavite	2450 MHz'te oluşturulan matematiksel model (3 tane tavuk prosesi)		

3.2.3.3 Matematiksel modellerde kullanılan çözümleyiciler

Matematiksel modelleme çalışmalarında mikrodalga sistem içerisindeki elektromanyetik alanı ve ürünün sıcaklık değişimini çözümleyebilmek amacıyla COMSOL çoklu fizik programında zamana bağlı çözüm yapılmıştır. Bu yazılım içeriğinde, sonlu eleman problemlerinin çözümünde direkt ya da yinelemeli yöntemler kullanılmaktadır. Direkt metotlar MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver), PARDISO (Parallel Sparse Direct Solver) ve SPOOLES (SParse Object Oriented Linear Equations Solver) olmak üzere 3 farklı çözüm yaklaşımı kullanmakta olup tüm çözümler LU ayrışımına dayanmaktadır. Belirtilen bu 3 çözüm yönteminin de kullanılmasıyla aynı koşullar için hazırlanan matematiksel modellerin çözümünde benzer sonuçlar elde edilmektedir. Çözümler arasındaki temel fark çözüm hızları ve çözüm için gerekli kapasitedir. Bunlardan PARDISO çözüm yönteminin direkt çözümler arasında en hızlı ve SPOOLES çözüm yönteminin ise en yavaş olduğu bilinmektedir. Tüm direkt çözüm yöntemleri fazla RAM gerektirir fakat SPOOLES aralarında en az RAM kullanma eğilimindedir. Bunun yanı sıra MUMPS ve PARDISO, gerektiği zaman çözümün bir kısmını çekirdek dışına aktarabilir ve çözüm sırasında ihtiyaç duyulması halinde sistem hard diskini de kullanabilmektedir (Frei 2013).

Bu tez kapsamında, elektromanyetik alan çözümü için MUMPS, ısı ve momentum transferi için ise PARDISO yöntemi kullanılmıştır. Modellerde, elektromanyetik alan ve ürün sıcaklığının daha doğru olarak hesaplanabilmesi çözümlerinde Δt değeri <0.1 s olarak sınırlandırılmıştır. Tüm simülasyon çalışmaları, HP Z4 G4 model 192 GB RAM ve 4 GHz işlemci hızına sahip iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan her model için 1 ila 10 gün süre sonunda simülasyon sonucu elde edilmiştir. Tavuk geometrisi oluşturularak hazırlanan modellerde daha homojen bir ısınmasının sağlanması amacıyla tavukların belirli hızlarda döndüğü modeller hazırlanmak istenmiş fakat geometrinin kompleks olmasına bağlı olarak RAM altyapısı yetersiz kalmıştır.

3.2.3.4 Ağ yapısının oluşturulması

Sonlu eleman yöntemi kapsamında diferansiyel denklik çözüm temelli çalışmalarda öncelikle ilgili geometrinin ağ yapısı oluşturularak sistem küçük parçalara bölünmekte ve her parça için çözüm yapılmaktadır. Oluşturulan ağ yapısının yeterliliğini ve buna bağlı olarak elektromanyetik alan fiziğinin doğru çözülüp çözülmediğini kontrol etmek amacıyla Nyquist kriteri kullanılmıştır (Eşitlik 3.11).

$$S_{max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\mu'\epsilon'}} \quad (3.11)$$

Burada λ , dalga boyunu (m); c , ışık hızını (m/s); f , frekansı (Hz); μ' , bağlı geçirgenliği ve ϵ' , dielektrik sabitini ifade etmektedir.

Modelleme çalışmalarında, oluşturulan sistemler COMSOL çoklu fizik yazılımının ağ yapısı oluşturma özelliği kullanılarak geometri dörtgensel ağ yapısına bölünmüştür. Çizelge 3.7’de laboratuvar ölçekli mikrodalga sistem için, çizelge 3.8’de but geometrisi içeren ve içermeyen tavuk karkasının silindirik kavitede proses edildiği sistem için, çizelge 3.9’da vurgulu hava jeti ve su akışı eklenen sistemler için, çizelge 3.10’da ise dikdörtgensel kaviteye sahip sistem için kullanılan ağ yapısına dair fiziksel özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.7 Laboratuvar ölçekli sistem için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri

Çalışma	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
Model doğrulama	Dörtgensel element sayısı	244696
	Üçgensel element sayısı	19688
	Köşe element sayısı	3477

Çizelge 3.7 Laboratuvar ölçekli sistem için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri (devam)

	Tepe element sayısı	435
	Element sayısı	244696
	Ağ hacmi (cm ³)	17690
NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi	Dörtgensel element sayısı	426895
	Üçgensel element sayısı	52281
	Köşe element sayısı	6844
	Tepe element sayısı	451
	Element sayısı	426895
	Ağ hacmi (cm ³)	17710

Çizelge 3.8 But geometrisi içeren ve içermeyen modeller için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri

Çalışma	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
But geometrisi içeren matematiksel modeller	Dörtgensel element sayısı	409223
	Üçgensel element sayısı	46922
	Köşe element sayısı	3898
	Tepe element sayısı	239
	Element sayısı	409223
	Ağ hacmi (cm ³)	42060
But geometrisi içermeyen matematiksel modeller	Dörtgensel element sayısı	152963
	Üçgensel element sayısı	15480
	Köşe element sayısı	576

Çizelge 3.8 But geometrisi içeren ve içermeyen modeller için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri (devam)

	Tepe element sayısı	42
	Element sayısı	152963
	Ağ hacmi (cm ³)	42060

Çizelge 3.9 Sisteme vurgulu hava jeti ve su akışı ilave edilen modeller için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri

Vurgulu hava jeti ilave edilen matematiksel model	Dörtgensel element sayısı	146702
	Üçgensel element sayısı	16174
	Köşe element sayısı	1139
	Tepe element sayısı	125
	Element sayısı	173502
	Ağ hacmi (cm ³)	42070
Sistem içerisine su ilave edilen matematiksel model	Dörtgensel element sayısı	11793
	Üçgensel element sayısı	14202
	Köşe element sayısı	1683
	Tepe element sayısı	93
	Element sayısı	125921
	Ağ hacmi (cm ³)	42030

Çizelge 3.10 Dikdörtgensel kavite için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri

Dörtgensel element sayısı	348518
Üçgensel element sayısı	35926

Çizelge 3.10 Dikdörtgensel kavite için oluşturulan matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının özellikleri (devam)

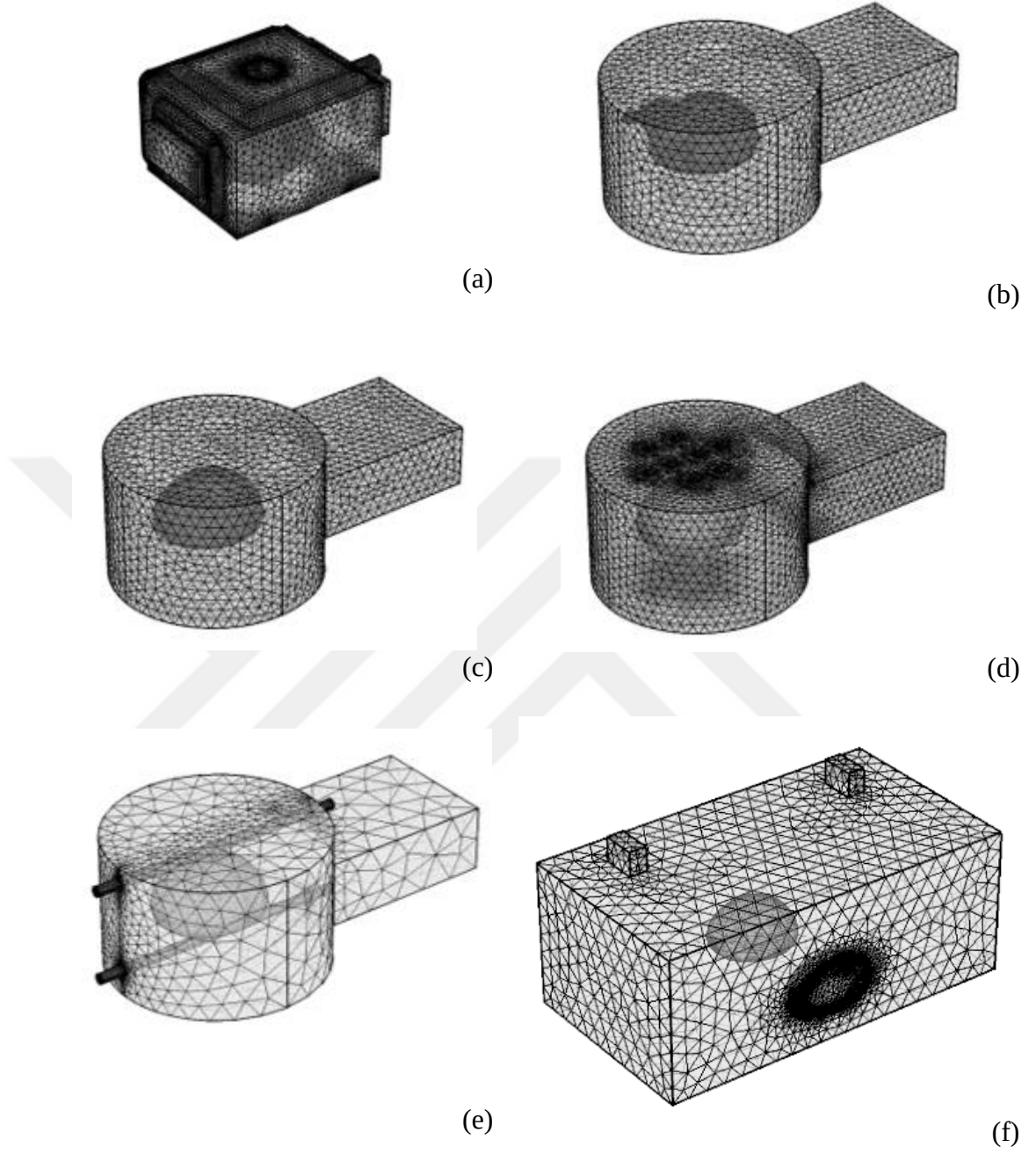
Köşe element sayısı	1877
Tepe element sayısı	98
Element sayısı	348518
Ağ hacmi (cm ³)	163400

Çizelge 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10’da bütün sistemler için kullanılan ağ yapısına dair fiziksel özellikler verilmiştir. Bunlara ek olarak, ağ hacminin element sayısına oranlanması ile elde edilen birim element hacminin küp kökü alınarak hesaplanan ağ boyutu hesaplanmış (Eşitlik 3.12) ve sistemlerde gerçekleştirilecek çözümlerde kullanılan ağ element boyutları Nyquist eşitliğine göre belirlenen değerlerden daha küçük olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, tez kapsamında oluşturulan tüm sistemler için ağ yapısı Şekil 3.17’de gösterilmiştir.

$$\sqrt[3]{\frac{\text{Ağ hacmi}}{\text{Element sayısı}}} = \text{Ağ boyutu} \quad (3.12)$$

Çizelge 3.11 Tez kapsamında kullanılan sistemlerin ağ boyutu

Çalışma	Ağ boyutu (cm)
Model doğrulama	0,42
NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi	0,35
But geometrisi içeren matematiksel modeller	0,47
But geometrisi içermeyen matematiksel modeller	0,65
Vurgulu hava jeti ilave edilen matematiksel model	0,62
Sistem içerisine su ilave edilen matematiksel model	0,69
Dikdörtgensel kavitede oluşturulan model	0,78



Şekil 3.17 Oluşturulan farklı sistemlere ait ağ yapısı

a.laboratuvar ölçekli mikrodalga, b. silindirik kavite but geometrisi içeren, c. silindirik kavite but geometrisi içermeyen, d. vurgulu hava jeti ilave edilen sistem, e. su akışı ilave edilen sistem, f. dikdörtgensel kavite

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gıda proses uygulamalarında, mikrodalga (MW) uygulama sırasında sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak üründe ortaya çıkan tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı dağılımı proses güvenliği ve doğrulaması kapsamında gıda güvenliği sorunlarına neden olabilmektedir. Bu kapsamda, gıda güvenliği problemlerinin önüne geçebilmek amacıyla soğuk – nokta ya da soğuk bölge hedefli proseslerde uzun proses süresi uygulanmaktadır. Bu durum da üründe kalite kayıplarına ve proses maliyetinin artmasına yol açmaktadır. MW uygulama sırasında, sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı belirlenerek uygulamanın daha verimli hale getirilebilmesi ve buna bağlı olarak ürün içerisinde tekdüze bir sıcaklık dağılımının elde edilmesi önemli bir proses tasarım kriteridir. Bu amaçla proses tasarım ve optimizasyonu amacıyla matematiksel model temelli simulasyon çalışmaları uygulanabilmektedir. Bu yaklaşım için en önemli nokta, geliştirilen matematiksel modelin deneysel verilerle doğrulanmasıdır.

Bu tez çalışması kapsamında da MW sistemin etkin olarak kullanılabilmesi amacıyla öncelikle laboratuvar ölçekli bir sistem için matematiksel model geliştirilmiş ardından deneysel çalışmalarla bu modelin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla COMSOL çoklu fizik programı kullanılmış ve sistem içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı ve buna bağlı olarak ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı belirlenmiş ve deneysel veriler ile doğrulanmış olan model kullanılarak endüstriyel proses koşullarında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.1 Dielektrik Özellik Ölçümleri

Dielektrik ısıtma olarak da adlandırılan MW ısıtmada proses edilecek ürünün dielektrik özelliklerinin bilmesi önemli bir noktadır. Bu amaçla tez kapsamında matematiksel model çalışmalarında kullanılan % 2 (w/w) agar ve NaCl çözeltisi ile muamele edilen tavuk deri örneklerinin dielektrik özellikleri sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

4.1.1 %2'lik agarın dielektik özellikleri

% 2'lik agarın termofiziksel özellikleri için suyun özellikleri kullanılırken, dielektrik özellikleri (dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü) ise, sıcaklığın fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.1 915 ve 2450 MHz frekansta % 2'lik agarın dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir. Bu çizelgede gözleneceği üzere, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü her 2 frekans için de sıcaklık artışı ile azalmaktadır.

Çizelge 4.1 Sıcaklığa bağlı ve 915 ve 2450 MHz frekansta % 2 agar çözeltisine ait dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü

Sıcaklık (°C)	Frekans (MHz)			
	915		2450	
	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')
10	78,11 $\pm$ 1,68	12,09 $\pm$ 1,11	75,62 $\pm$ 1,36	19,77 $\pm$ 1,37
25	73,84 $\pm$ 0,75	10,88 $\pm$ 2,15	73,45 $\pm$ 0,65	12,22 $\pm$ 1,49
50	72,54 $\pm$ 0,47	7,28 $\pm$ 0,41	71,49 $\pm$ 0,69	8,83 $\pm$ 0,20
60	66,81 $\pm$ 0,08	1,28 $\pm$ 0,28	66,68 $\pm$ 0,25	3,77 $\pm$ 0,05

4.1.2 NaCl çözeltisi uygulanmış tavuk but örneklerinin dielektik özellikleri

% 2 NaCl çözeltisi ile muamele edilmiş tavuk but örneklerinin dielektrik özellikleri de sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Bu amaçla NaCl çözeltisi, örnek yüzeyine püskürtülmüş ya da örnek direkt olarak çözeltinin içerisinde bekletilmiştir. Bu 2 uygulamanın ve çözelti uygulanmayan kontrol grubu örnekleri için belirlenen dielektrik özellikleri çizelge 4.2 'de verilmiştir.

Çözelti içerisine daldırma işlemi uygulanan örneklerde dielektrik sabitinin kontrol ve püskürtme uygulanan örneklerle göre daha yüksek olduğu bu çizelgede görülmektedir. Çizelge 3.1’de % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik sabitinin 915 MHz’te 8 – 77 °C aralığında 83,88 ila 57,93 arasında değiştiği görülmektedir. NaCl çözeltisi uygulanan tavuk derisi örneklerinin dielektrik sabiti de, beklendiği üzere kontrol grubundakine göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. Dielektrik kayıp faktörü de benzer olarak NaCl uygulanan, ve özellikle daldırma işlemi yapılan örneklerde daha fazla NaCl absorbe edilmesine bağlı olarak kontrol grubu ve püskürtme uygulanan örneklerle oranla daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.2 NaCl çözeltisi uygulanan örneklerin dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü

Örnekler	Sıcaklık (°C)	Frekans (MHz)			
		915		2450	
		Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')	Dielektrik sabiti (ϵ')	Dielektrik kayıp faktörü (ϵ'')
Kontrol	24	15.78 $\pm$ 2.11	4.18 $\pm$ 0.64	15.01 $\pm$ 2.10	2.36 $\pm$ 0.35
	40	25.84 $\pm$ 3.66	8.08 $\pm$ 3.20	23.94 $\pm$ 3.01	6.40 $\pm$ 2.46
	60	20.78 $\pm$ 6.85	8.59 $\pm$ 4.96	19.89 $\pm$ 6.46	4.90 $\pm$ 2.77
Püskürtme	24	17.03 $\pm$ 2.76	5.62 $\pm$ 1.54	15.91 $\pm$ 2.58	3.22 $\pm$ 0.92
	40	31.16 $\pm$ 5.54	9.38 $\pm$ 2.62	29.78 $\pm$ 5.17	6.80 $\pm$ 1.45
	60	19.05 $\pm$ 2.61	8.00 $\pm$ 1.93	18.17 $\pm$ 2.21	4.78 $\pm$ 0.95
Daldırma	24	22.60 $\pm$ 3.23	9.48 $\pm$ 0.90	21.27 $\pm$ 3.10	4.96 $\pm$ 0.59
	40	36.14 $\pm$ 12.34	17.07 $\pm$ 9.42	33.99 $\pm$ 11.67	10.38 $\pm$ 4.86
	60	20.29 $\pm$ 9.11	12.56 $\pm$ 6.45	19.61 $\pm$ 8.76	6.51 $\pm$ 3.53

4.2 NaCl Çözeltisi Uygulanan Tavuklarda Tuz Konsantrasyonu Analizi

Tuz analizi sonucunda püskürtme ve daldırma işlemi uygulanan örneklerin % NaCl miktarı sırasıyla % 0,56 ve 1,13 olarak bulunmuştur. Fakat % 2 NaCl çözeltisi ile muamale edilmeyen kontrol grubu örneklerde gerçekleştirilen analiz sonucunda ise % 0,45 NaCl konsantrasyonu belirlenmiştir. Buradan hareketle püskürtme işleminin tavuk derisi yüzeyindeki NaCl konsantrasyonunda önemli bir değişime sebep olmadığı ifade edilebilir. % 2 NaCl çözeltisi uygulanmasına rağmen özellikle püskürtme yapılan örneklerdeki tuz miktarı oldukça düşüktür. Buna bağlı olarak çizelge 3.1’de verilen Computational Food Processing (CF π) grubu tarafından ölçülen % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özellikleri ile uygulama sonunca ölçülen ve çizelge 4.2’de verilen dielektrik özellikler arasında da önemli fark bulunmaktadır. MW penetrasyon derinliğinin modifiye edilebilmesi ve elektromanyetik enerji absorpsiyonunun sadece ürün yüzeyinde tutulabilmesi amacıyla, tez kapsamında, tavuk derisi katmanının tamamen NaCl çözeltisinin özelliklerini taşıması ve bu kapsamda MW uygulamanın yüzey dekontaminasyonu amacıyla kullanılabileceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple, kullanılan püskürtme ya da daldırma yöntemlerinin uygulama süresi açısından revize edilmesinin planlanması ortaya çıkmıştır.

4.3 Laboratuvar Ölçekli Mikrodalga Sistemde Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

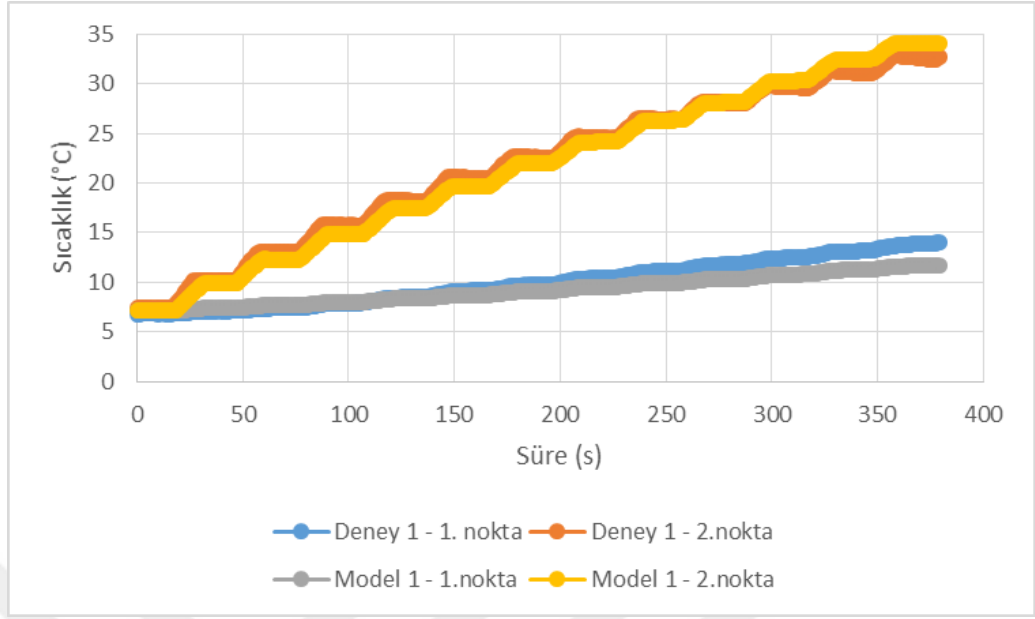
4.3.1 Deneyel verilerle matematiksel model doğrulama çalışmaları

Materyal ve Yöntem bölümünde detaylı olarak açıklandığı gibi geliştirilen modellerin deneysel olarak doğrulanması amacıyla laboratuvar ölçekli MW sistemde % 2 agar çözeltisi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında sistem için çözdürme güç seçeneği kullanılmış olup deney 3’e ait dur-kalk döngüsü şekil 3.9.c’de verilmiştir. Deney 1 ve 2’de yatay pozisyonda olan agar çözeltisi deney 3 sırasında dikey olarak mikrodalga sistem içerisine yerleştirilmiştir. Matematiksel model sonuçları ve deney sırasında

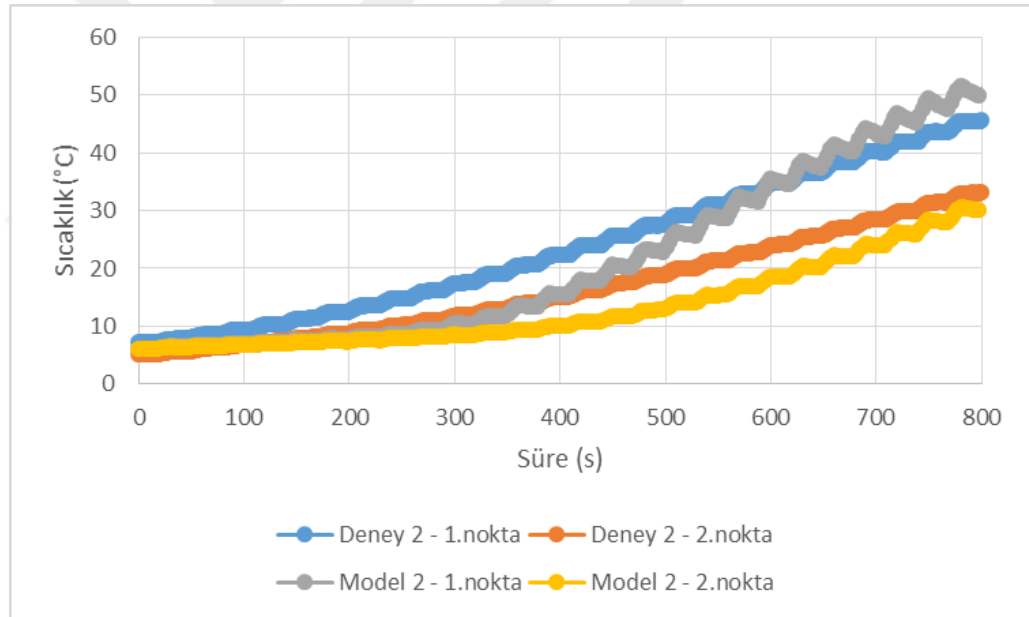
kaydedilen sıcaklık verileri şekil 4.1’de karşılaştırılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen 3 deney için deney sırasında agar çözeltisinin şekil 3.5’te gösterilen 2 farklı noktasında sıcaklık ölçüm değerleri belirlenmiştir.

Elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak, deneysel sıcaklık verilerinin kaydedildiği noktaların koordinatlarında olacak birkaç mm’lik sapmanın bile önemli sıcaklık farklarına sebep olduğu bilinmektedir. Aşağıda model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırıldığı şekillerde ortaya çıkan düşük sıcaklık farklarının önemli bir nedeninin bu duruma bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Şekil 4.2’de ise doğrulama çalışmaları için oluşturulan matematiksel modellerdeki elektromanyetik alan dağılımı görülmektedir. Ürün boyutu tüm deneyler boyunca sabit ve deney 1 ve 2 sırasında ürünün konumu aynı olduğundan bu deneylerde elektromanyetik alan dağılımı da benzer olarak oluşmuştur. Fakat deney 3 sırasında ürün kavite içerisine dikey pozisyonda yerleştirildiğinden elektromanyetik alanın yoğunlaştığı bölgeler değişmiştir. Proses sonunda, matematiksel model çalışmasından elde edilen ürün yüzey sıcaklık değişimleri ise şekil 4.3 ve 4.4’te gösterilmiştir. Yüzey sıcaklığı şekil 4.3’te, zx- ekseninde ürünün merkezine denk gelecek şekilde alınan bir kesitteki sıcaklık dağılımı ise şekil 4.4’te verilmiştir. Aynı zamanda ilgili uygulama sırasında ortaya çıkan elektrik alan dağılımı da bu şekiller üzerinde gösterilmektedir. Buradan da anlaşılabileceği üzere elektromanyetik alan dağılımının yoğun olduğu bölgelerde daha yüksek sıcaklık değerleri ortaya çıkmıştır. Laboratuvar ölçekli sistem için oldukça büyük bir geometriye sahip olan agar için oluşturulan modeller ve deney sırasında alınan sıcaklık verileri kıyaslandığında önemli farklar olmadığı söylenebilir. Deney 1 ve 2 arasında deney koşulları benzer olmasına rağmen önemli sıcaklık farkının ortaya çıkması uygulanan MW ısıtma süresine bağlıdır (deney 1: 380 s ve deney 2: 800 s).



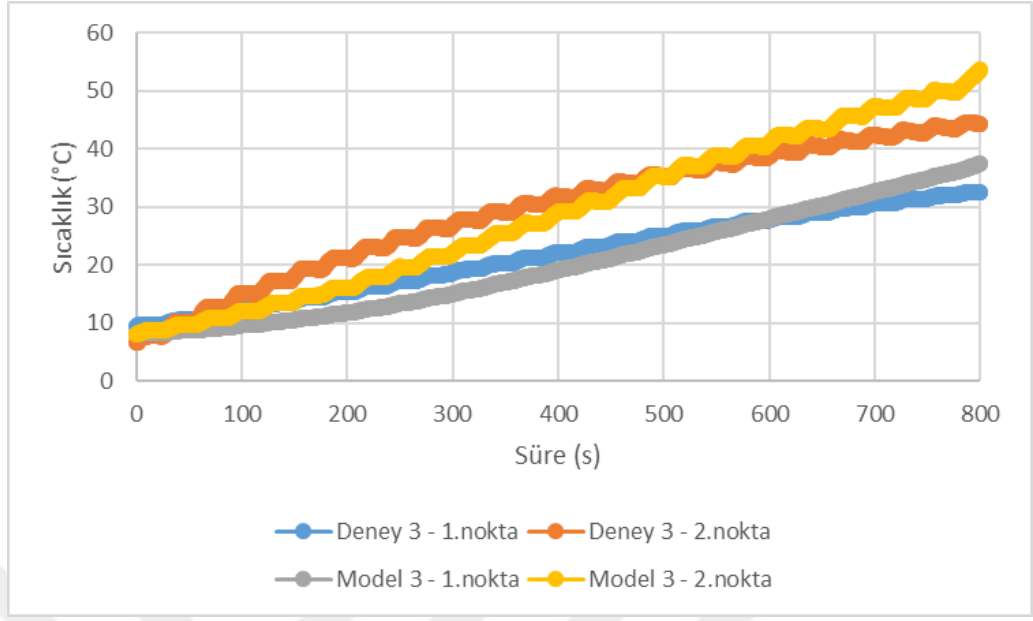
(a)



(b)

Şekil 4.1 %2 Agar çözelitisi kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması

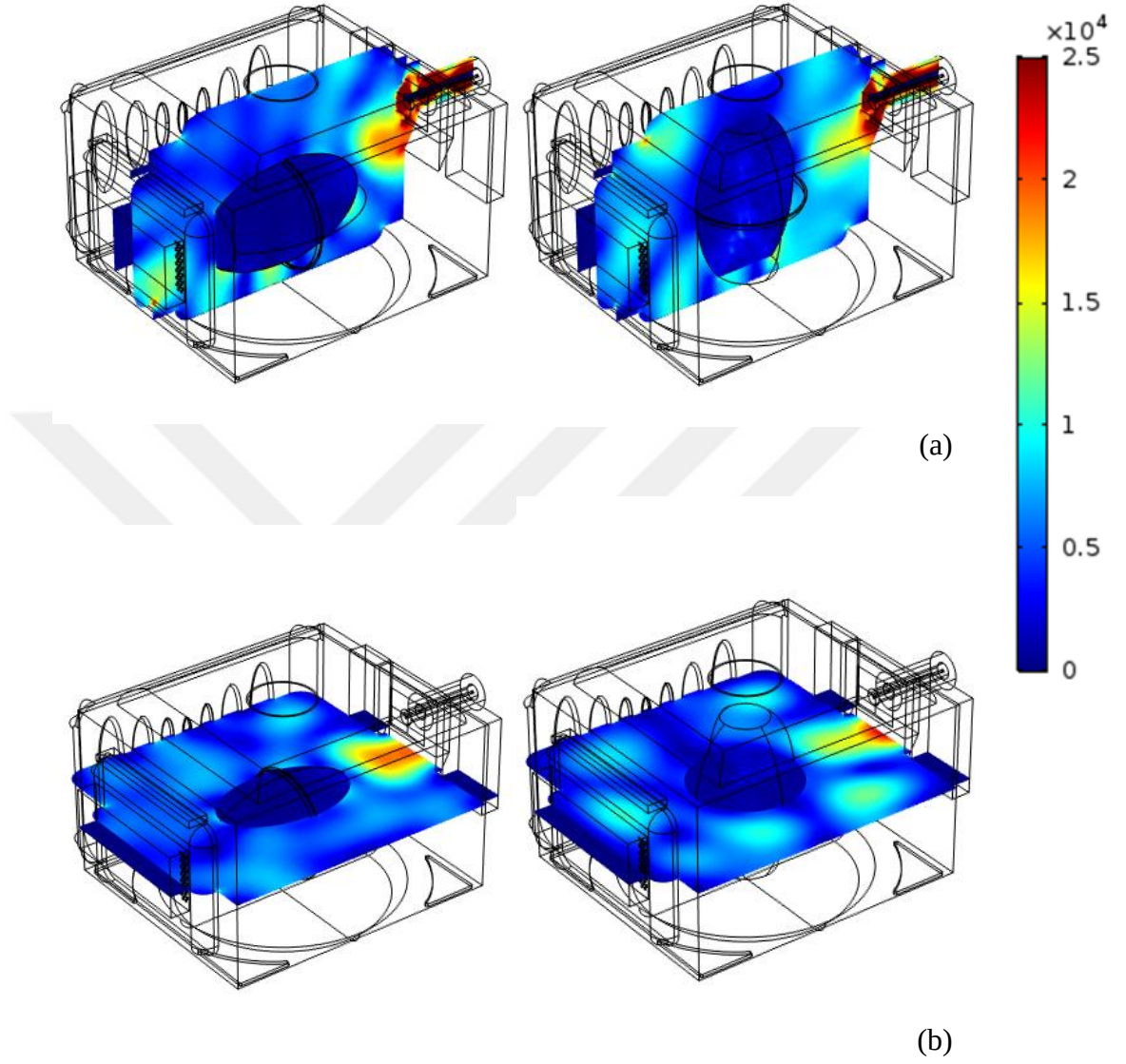
a.deney 1, b. deney 2, c. deney 3



(c)

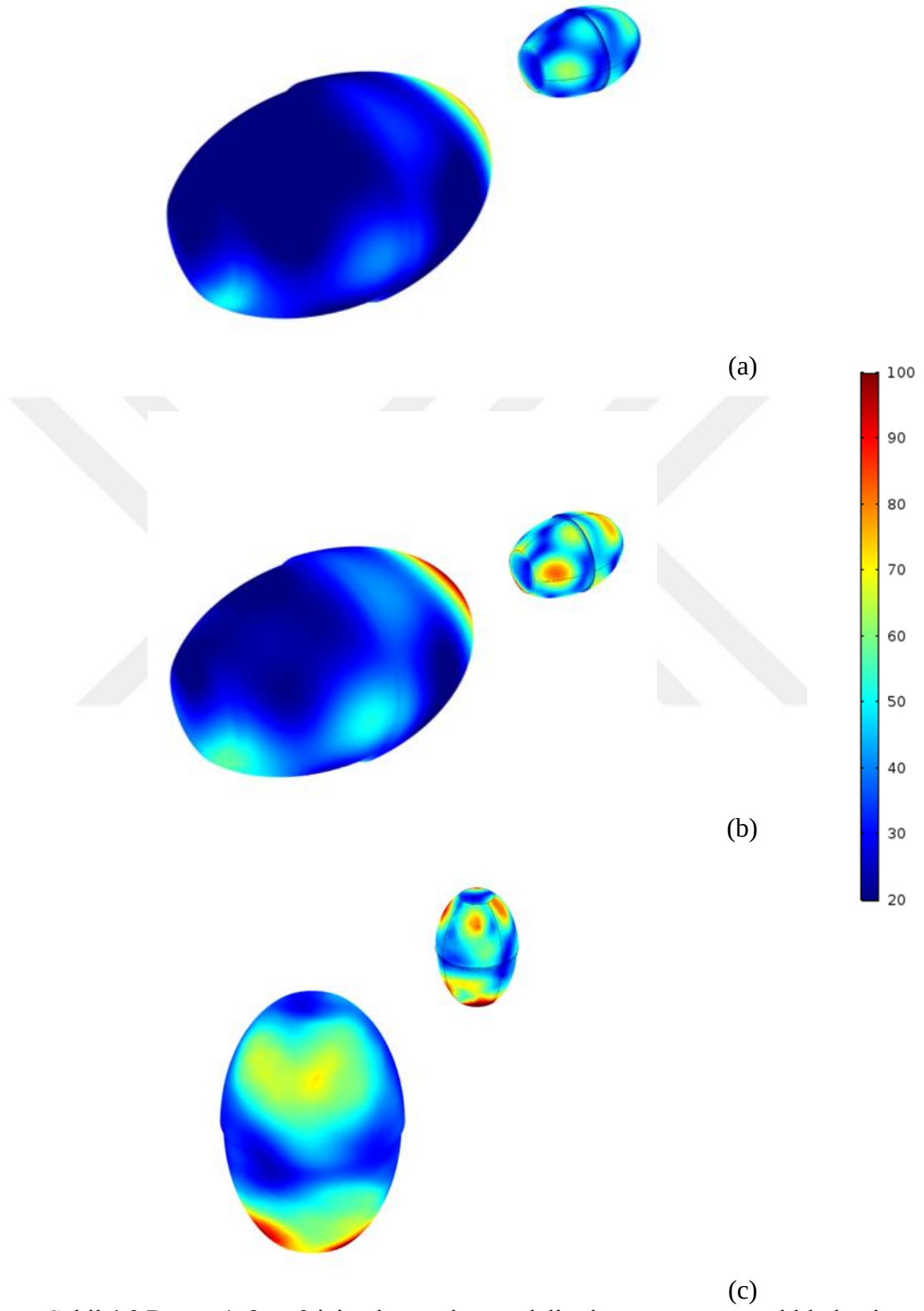
Şekil 4.1 %2 Agar çözelitisi kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sıcaklık verileri ile simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sıcaklık verilerinin karşılaştırılması (devam)

a.deney 1, b. deney 2, c. deney 3



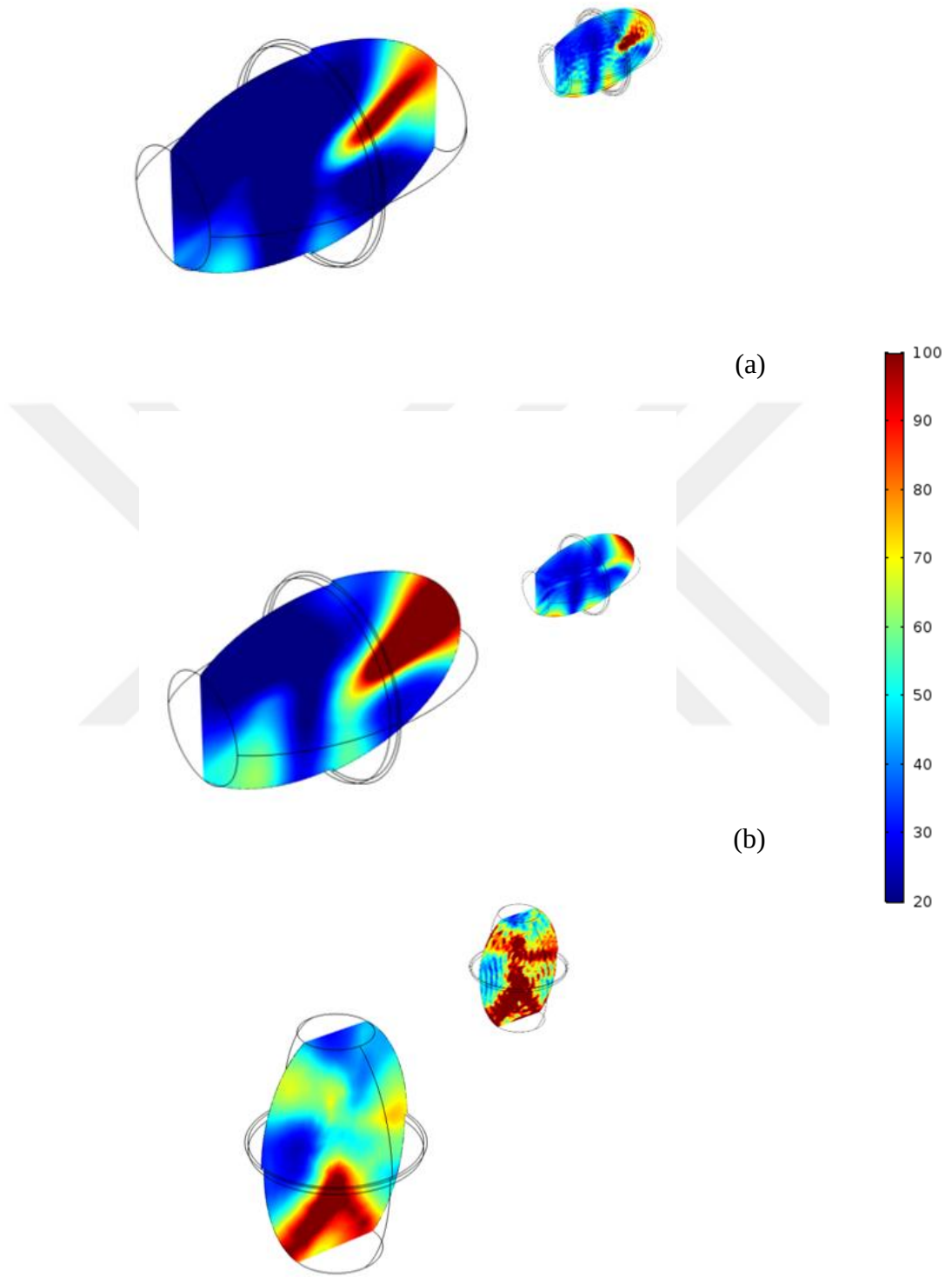
Şekil 4.2 Deney 2 ve 3 için oluşturulan modellerde elektromanyetik alan dağılımı (V/m)

a. deney 1 ve 2, b. deney 3



Şekil 4.3 Deney 1, 2 ve 3 için oluşturulan modellerde ürün yüzey sıcaklık dağılımı (°C)

a.deney 1, b. deney 2, c. deney 3



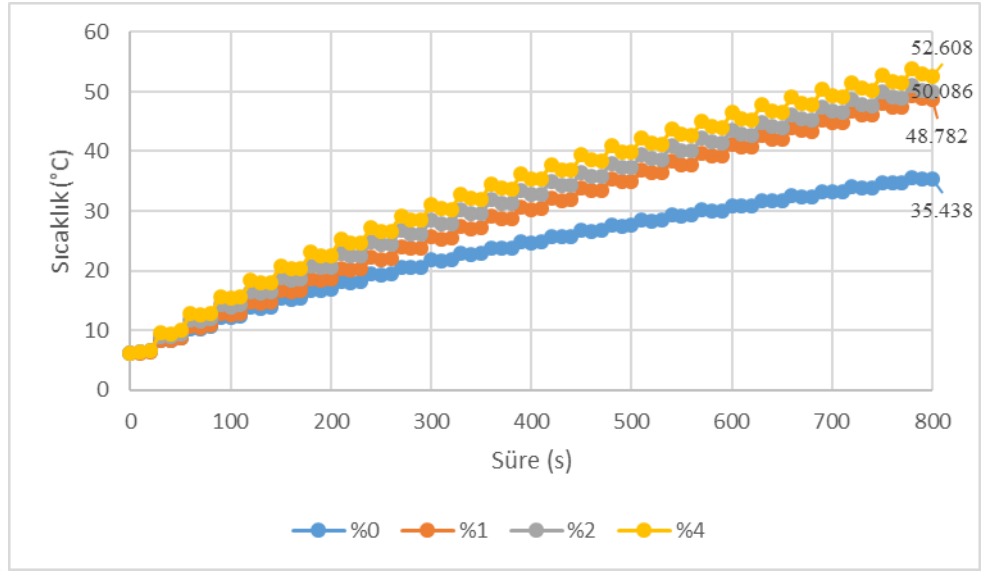
Şekil 4.4 Deney 1, 2 ve 3 için oluşturulan modellerde alınan bir kesitte yüzey sıcaklık dağılımı (°C)

a.deney 1, b. deney 2, c. deney 3

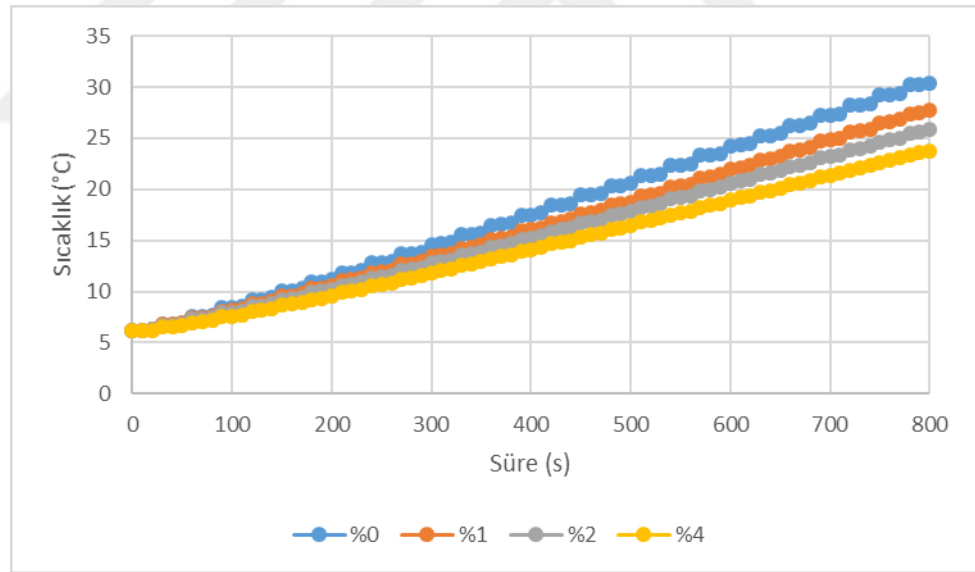
4.3.2 Ürün yüzeyindeki NaCl konsantrasyonunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi

Deneysel veriler kullanılarak matematiksel model doğrulama çalışması tamamlandıktan sonra, laboratuvar ölçekli sistemde % 2'lik agar geometrisinde tuz konsantrasyonunun (% 1, 2 ve 4 NaCl (w/w) konsantrasyonundaki çözelti ile yüzeyin tavuk derisi kalınlığında kaplanmış olduğu varsayımı ile) ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında tavuk derisi kalınlığında bir katmandaki NaCl konsantrasyonu etkisinin elektromanyetik alanı absoerbe edip penetrasyon derinliğini azaltarak ürün yüzey sıcaklık artışına etkisinin belirlenmesi planlanmıştır. Bu amaçla agar geometrisinin dışında 0,5 cm kalınlığında bir katman daha oluşturulmuş ve bu katmana % 2 agarın (NaCl çözeltisinin kullanılmadığı durum) ve % 1, % 2 ve % 4 NaCl çözeltisinin özellikleri tanımlanmıştır. Bu aşamadaki matematiksel model çalışmalarında şekil 3.9.b'de verilen dur – kalk döngüsü kullanılmıştır. Simülasyonlar sonunda NaCl çözeltisi katmanının yüzey ortalama ve hacimsel ortalama sıcaklığı (şekil 4.5) incelenmiştir. Bu bağlamda elde edilen sıcaklık değişimi sonuçları ve penetrasyon derinliğinde meydana gelen değişim şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca sonucu daha iyi açıklayabilmek amacıyla 2450 MHz frekansta % 1, 2 ve 4 NaCl (w/w) içeren çözeltiler için çizelge 3.2'de verilen dielektrik özelliklerine bağlı olarak sıcaklığa bağlı penetrasyon derinliğinde meydana gelen değişim şekil 4.8'de gösterilmiştir.

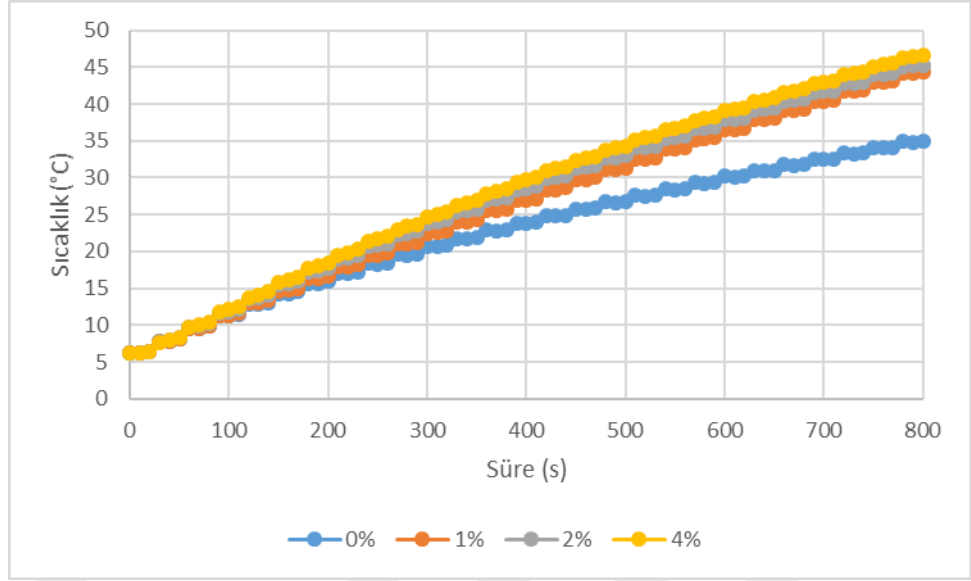
Şekil 4.5 farklı NaCl çözeltisi konsantrasyonundan oluşan katmanın hacimsel sıcaklık değişimini göstermektedir. Bu şekilde NaCl konsantrasyonu etkisinin sıcaklık artışına etkisi net olarak gözlenirken, dielektrik özelliklerdeki değişime bağlı olarak konsantrasyon artışı ile sıcaklık da artmaktadır. Bu durumun aksine, şekil 4.6'da agar hacimsel sıcaklık ortalama artışının NaCl konsantrasyonu ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu iki şekilden de anlaşılabacağı üzere elektromanyetik alanın yüzey katmanında absorplanmasıyla bu katman sıcaklık artışı ile agar bölümü sıcaklık artışı net bir değişiklik göstermektedir. Şekil 4.7'de ise hem agar hem de NaCl katmanı yüzey sıcaklık değişimi gösterilmiş olup, NaCl katmanı etkisiyle net bir yüzey sıcaklık artışı sağlanmıştır. Sıcaklık artışlarında gözlenen bu durum şekil 4.8'de verilen penetrasyon derinliğine NaCl konsantrasyonunun etkisi ile de açık bir şekilde açıklanabilmektedir. NaCl konsantrasyonundaki artış elektromanyetik alan penetrasyon derinliğini azaltmıştır.



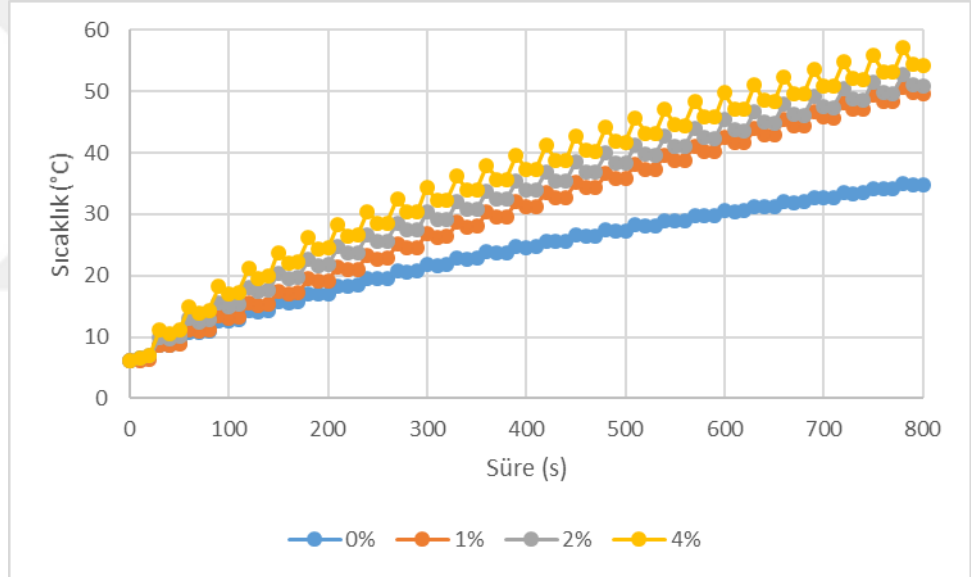
Şekil 4.5 % 1, % 2 ve % 4 NaCl çözelti katmanlarının hacimsel ortalama sıcaklıkları



Şekil 4.6 Yüzeyi % 1, % 2 ve % 4 NaCl çözeltisi ile kaplanmış % 2'lik agarın hacimsel ortalama sıcaklığı



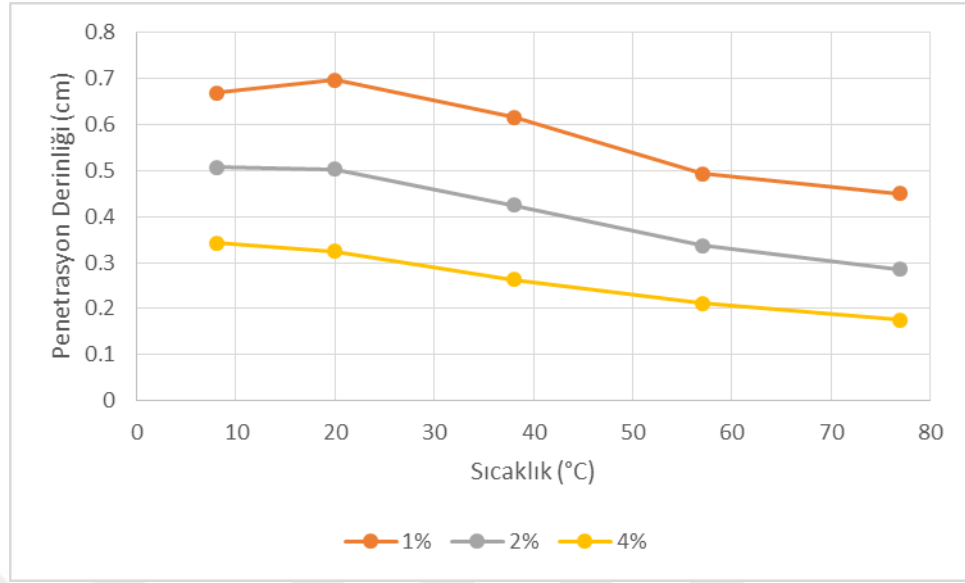
(a)



(b)

Şekil 4.7 Proses süresince elde edilen yüzey ortalama sıcaklıkları

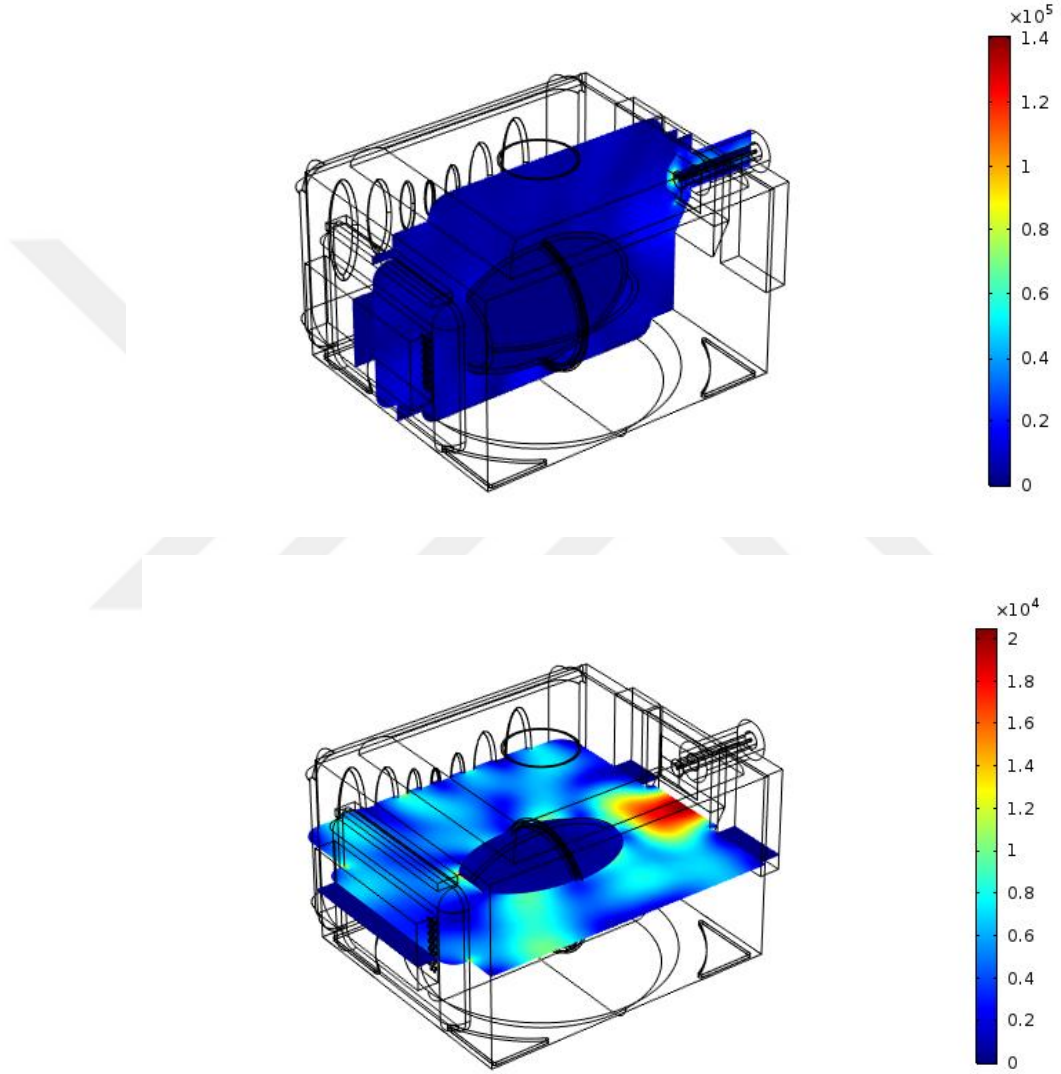
a.agar, b. NaCl katmanı



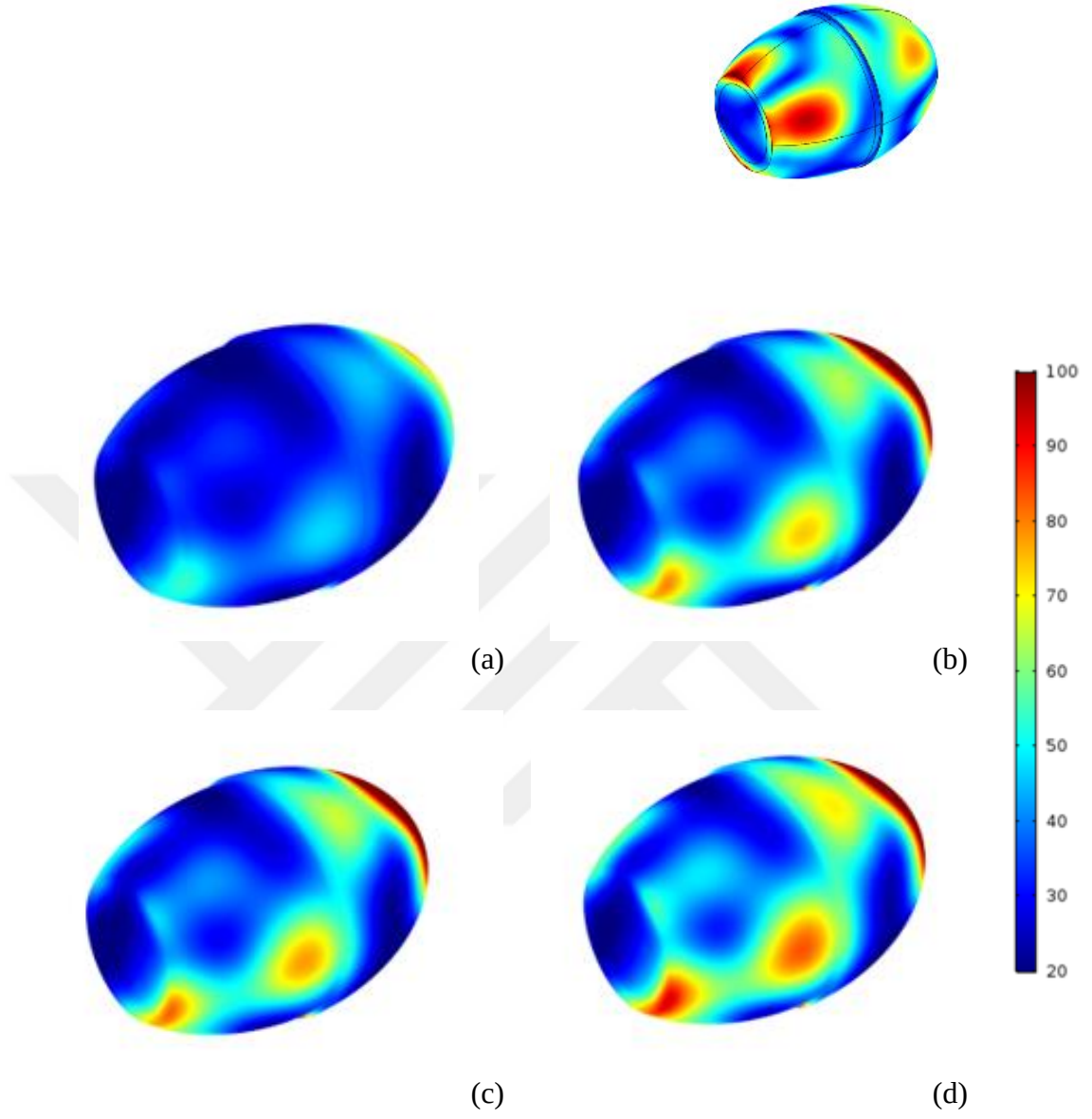
Şekil 4.8 %1, %2 ve %4 NaCl içeren çözeltilerin penetrasyon derinliği

Agar yüzeyinde 0.5 cm kalınlığında planlanan ve % 1, 2 ve 4'lük NaCl çözeltisi dielektrik özelliklerine sahip olan katman varlığının sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımına ve ürün yüzey sıcaklık değişimine etkisi şekil 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.9'da elektromanyetik alanın özellikle zx- kesiti için şekil 4.2'de verilen ve sadece %2 agar ile gerçekleştirilen model çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre daha tekdüze olduğu görülmektedir. Şekil 4.10'da proses sonu yüzey sıcaklık değişimleri görülen geometrilere % 0 NaCl çözeltisi ile kaplanmış (yani NaCl çözeltisi yerine % 2 agar çözeltisinin özellikleri tanımlanmış) ürün, diğerlerine oranla çok daha düşük sıcaklığa ulaşmıştır. Ürün yüzeyinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı da aynı şekilde gösterilmektedir. Tüm modellerde ürün sistem içerisinde aynı konumda yer aldığı ve proses koşulları aynı olduğu için ürün yüzeyindeki elektromanyetik alan dağılımı aynıdır. Belirli bölgelerde başlayan ısınma % 4 NaCl çözeltisinin kullanıldığı modelde en net şekilde görülmektedir. Şekil 4.11'de ise zx- ekseninde agarın merkez kesitinde gerçekleşen sıcaklık dağılımı verilmiştir. Alınan kesitlerdeki elektromanyetik alan dağılımı, her görüntünün üst kısmında yer almaktadır. Şekil 4.11.a'da verilen NaCl çözeltisi ile kaplanmayan agarda ürün merkezine doğru daha fazla ısınma olduğu, ısının yüzeyde tutulamadığı açıkça görülmektedir. Bu da şekil 4.6'da verilen agarın hacimsel

ortalama sıcaklık değişimini desteklemektedir. Tez kapsamında tavuk geometrisi ile yapılan çalışmalarda, % 4 NaCl özeltisi kullanılması halinde üründe yüksek miktarda NaCl özeltisi kalıp insan sağlığına zararlı olacağı ve duyuşsal açıdan tercih edilmeyeceği düşünülerek % 2 NaCl özeltisi kullanılmıştır.

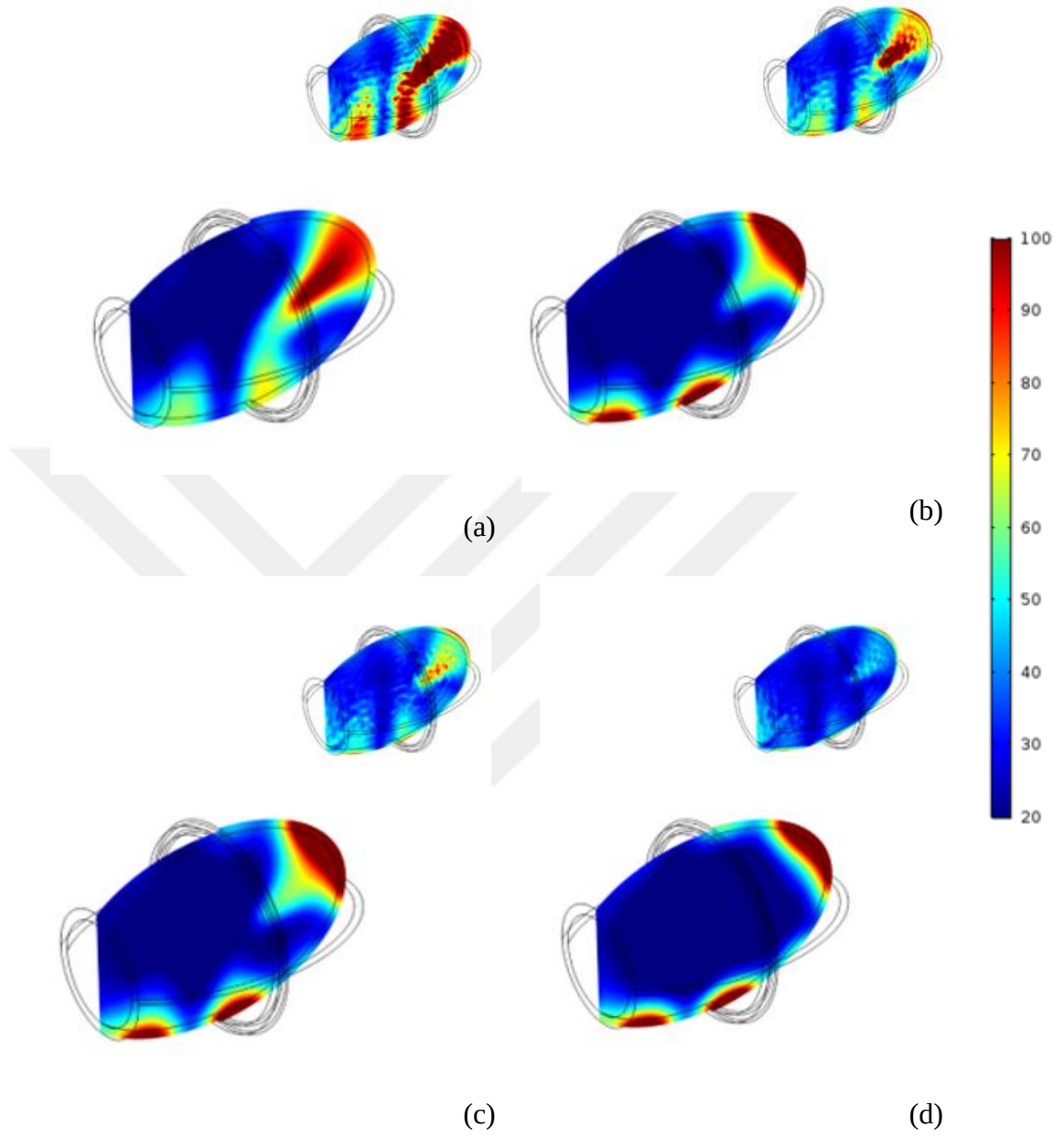


Şekil 4.9 NaCl özeltisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modellerde elektromanyetik alan dağılımı (V/m)



Şekil 4.10 NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modellerde proses sonu ürün yüzey sıcaklık dağılımı (°C)

a.%0 NaCl, b. %1 NaCl, c. %2 NaCl, d. %4 NaCl içeren çözelti ile kaplanmış agar



Şekil 4.11 NaCl çözeltisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modellerde proses sonu ürünün bir kesitinde sıcaklık dağılımı (°C)

a.%0 NaCl, b. %1 NaCl, c. %2 NaCl, d. %4 NaCl içeren çözelti ile kaplanmış agar

4.4 Tavuk Geometrisi Kullanılarak Oluşturulan Matematiksel Modeller

Tavuk geometrisi kullanılarak silindirik ve dikdörtgensel olmak üzere 2 farklı kavitede matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. Her 2 kavitede endüstriyel ölçekli sistem boyutlarında planlanmıştır.

4.4.1 Silindirik kavitede oluşturulan matematiksel modeller

Materyal ve yöntem kısmında detaylı anlatıldığı üzere, bu bölümde geliştirilen model çalışmalarında 20,3 cm çapında silindirik bir kavite, 67,3 cm genişliğe, 24,8 cm derinliğe ve 12,4 cm uzunluğa sahip bir dalga kılavuzu kullanılmıştır. Özellikleri belirtilen kavite içerisinde tavuk karkas geometrisinin prosesi simüle edilmiş ve prosesin nihai hedefi olarak, tavuk karkasının iç kısımları ısınmadan sadece yüzeyin ısıtılarak hedef mikroorganizma sayısında önemli bir azalma sağlanması planlanmıştır. Sistemin 1000 W ve 915 ve 2450 MHz olmak üzere 2 farklı frekansta çalışacağı kabul edilmiştir.

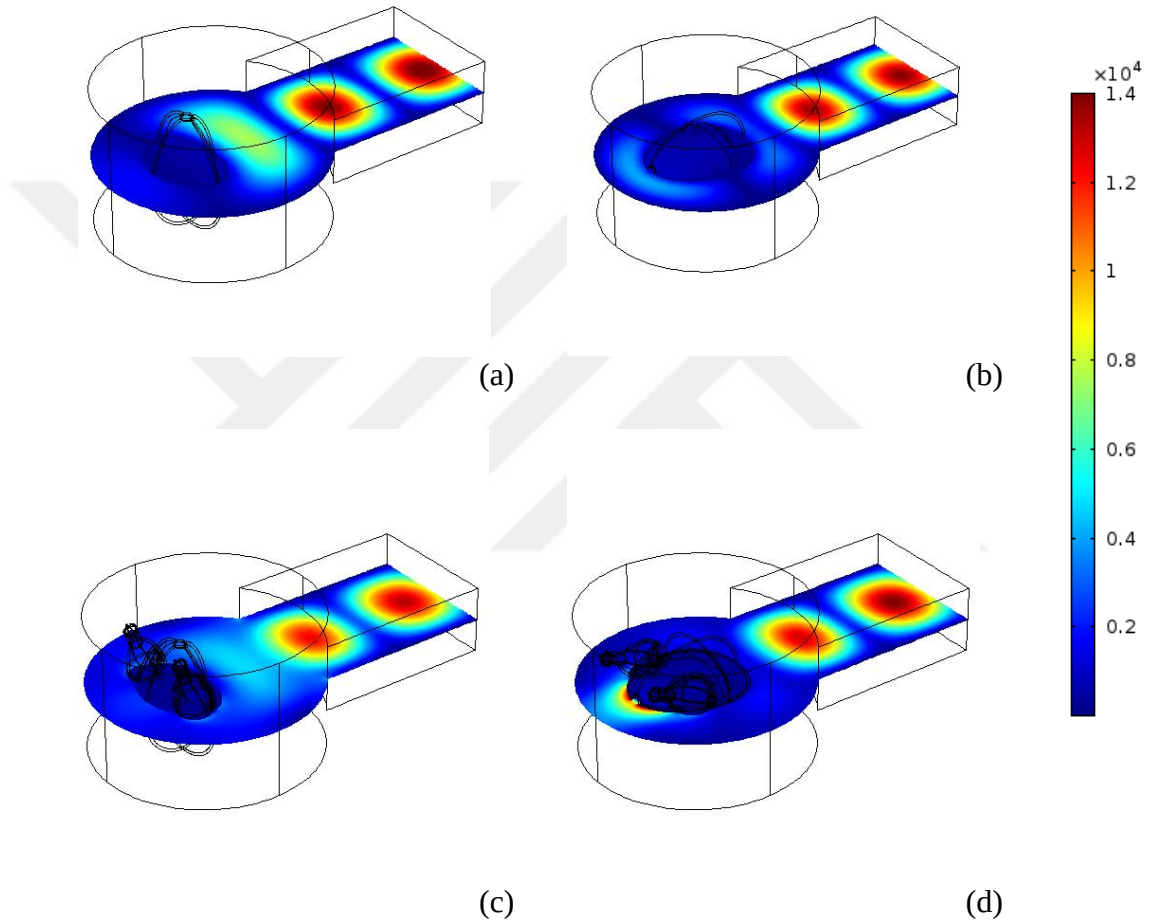
4.1.1.1 915 MHz frekansta çalışan endüstriyel mikrodalga sistem

915 MHz’te çalışan mikrodalga sistemde tavuk karkasının dış yüzeyinde NaCl katmanı olmasının, karkasın konumunun, but geometrisi içerip içermemesinin, sisteme vurgulu hava jeti ve su akış sistemi ilave edilmesinin ürünün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir.

Sistem içerisinde tavuk geometrisinin konumu ve but geometrisinin etkisi:

Bu bölümde 915 MHz frekansta tavuk geometrisinin kavite içerisindeki konumunun ve but geometrisi içerip içermemesinin elektromanyetik alan ve sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.12’de sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımları verilmiştir. Bu durumun sıcaklık dağılımına etkisini inceleyebilmek amacıyla ise,

oluşturulan modellerde NaCl çözeltisinin dielektrik özellikleri tanımlanan deri katmanının yüzey ve hacimsel ortalama sıcaklıkları belirlenmiştir. Şekil 4.13’de yüzey ortalama sıcaklıkları, şekil 4.14’te ise hacimsel ortalama sıcaklık değişimleri görülmektedir.

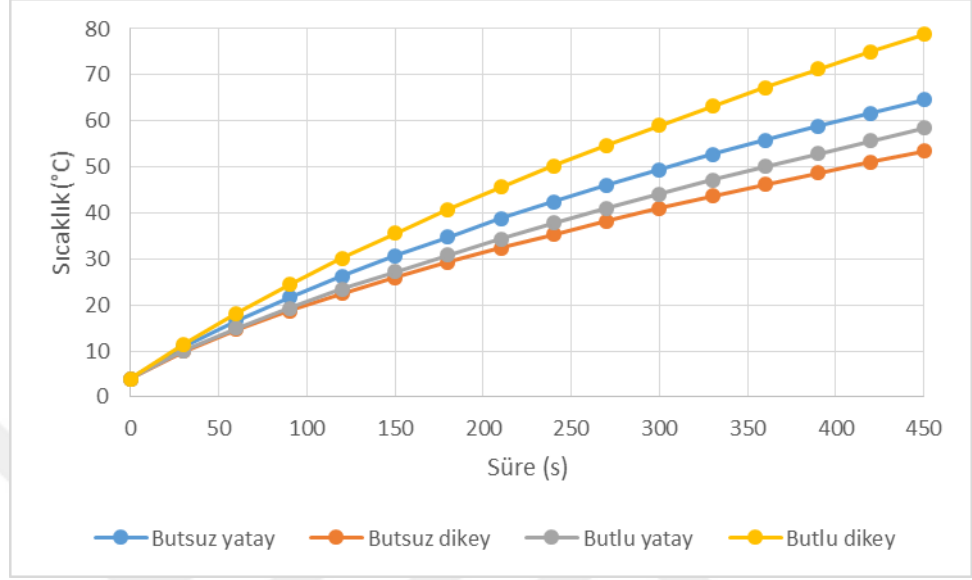


Şekil 4.12 Silindirik kavite 915 MHz frekansta tavuk karkasının konumu ve but geometrisinin elektromanyetik alana etkisi (V/m)

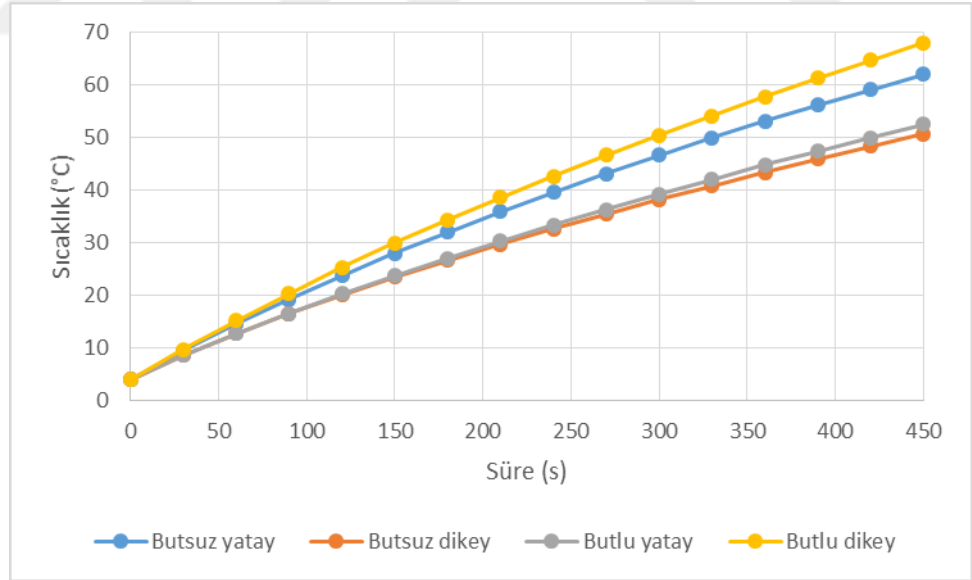
a. But geometrisi içermeyen kavite içerisinde dikey pozisyonda bulunan, b. but geometrisi içermeyen kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan, c. but geometrisi içeren kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan ve d. but geometrisi içeren kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan

Şekil 4.12’de gözleneceği üzere elektromanyetik alanın belirli bölgelerde yoğunlaşmış olup, özellikle sistem içerisinde yatay pozisyonda yer alan tavuk karkasının ön kısmında, dikey pozisyonda yer alan modellerde ise arka kısmında elektromanyetik alanın karkasın

diğer bölgelerine oranla daha yoğun olduğu gör÷lmektedir. Buna bağlı olarak bu bölgelerde daha fazla ısınma olması beklenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.13 Dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları

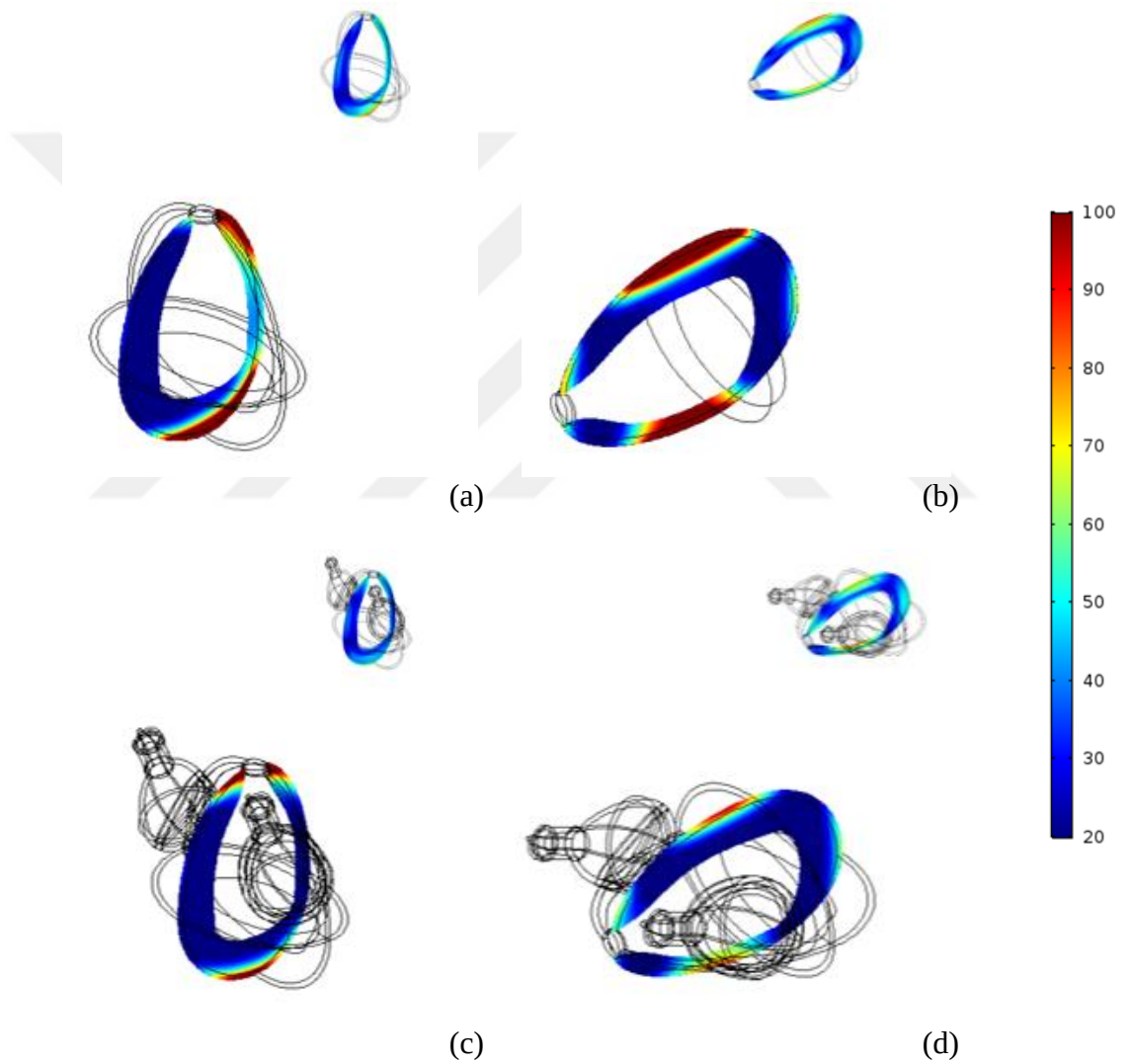
But geometrisi içeren ve içermeyen modellerin sistem içerisine dikey ve yatay pozisyonda yerleştirilmesiyle 450 s proses sonunda ürün dış yüzey sıcaklığı şekil 4.13.a’da görülmektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere 450 s sonunda tavuk karkasının but geometrisi içerip içermemesine ve sistem içerisindeki konumuna bakılmaksızın tüm modellerde hacim ve yüzey ortalama sıcaklık değerleri 50 °C’nin üzerine çıkmıştır. Bu da kısa proses süresi ile hedef mikroorganizmanın elimine edilebileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, şekil 4.13.b’de ise dış yüzeyde bulunan katmanın hacim ortalama sıcaklığına ait sonuçlar görülmektedir. Şekil 4.13’te but geometrisi içermeyen model çalışmalarında ürünün sistem içerisine yatay bir şekilde yerleştirilmesi ile daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Bu durumun aksine but geometrisi içeren modellerde ise ürünün sistem içerisinde dik pozisyonda yer aldığı sistemlerde daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır.

Tavuk geometrisinin iç kısmında ise hacim ortalama olarak en yüksek sıcaklığa but geometrisi içermeyen ve yatay pozisyonda yerleştirilen sistemde ulaşılmış olup; 450 s’lik proses sonundaki sıcaklık 34 °C olarak belirlenmiştir. Bu da beklenildiği üzere tavuk karkasında yüksek sıcaklıklara ulaşılmadan prosesin tamamlanabileceğini göstermektedir.

Belirtilen sistemler için zx ekseninde ürün merkez kesit sıcaklık dağılımı ve elektromanyetik alan dağılımı şekil 4.14’te, ürün yüzey sıcaklık ve ürün yüzeyindeki elektromanyetik alan dağılımı ise şekil 4.15’te gösterilmiştir. Görüntülerin sağ üst tarafında bulunan figürler elektromanyetik alan dağılımlarını ifade etmektedir. Verilen şekillerde kırmızı ile gösterilen bölgelerde 100 °C ve üzerindeki sıcaklık artışı meydana gelmiştir.

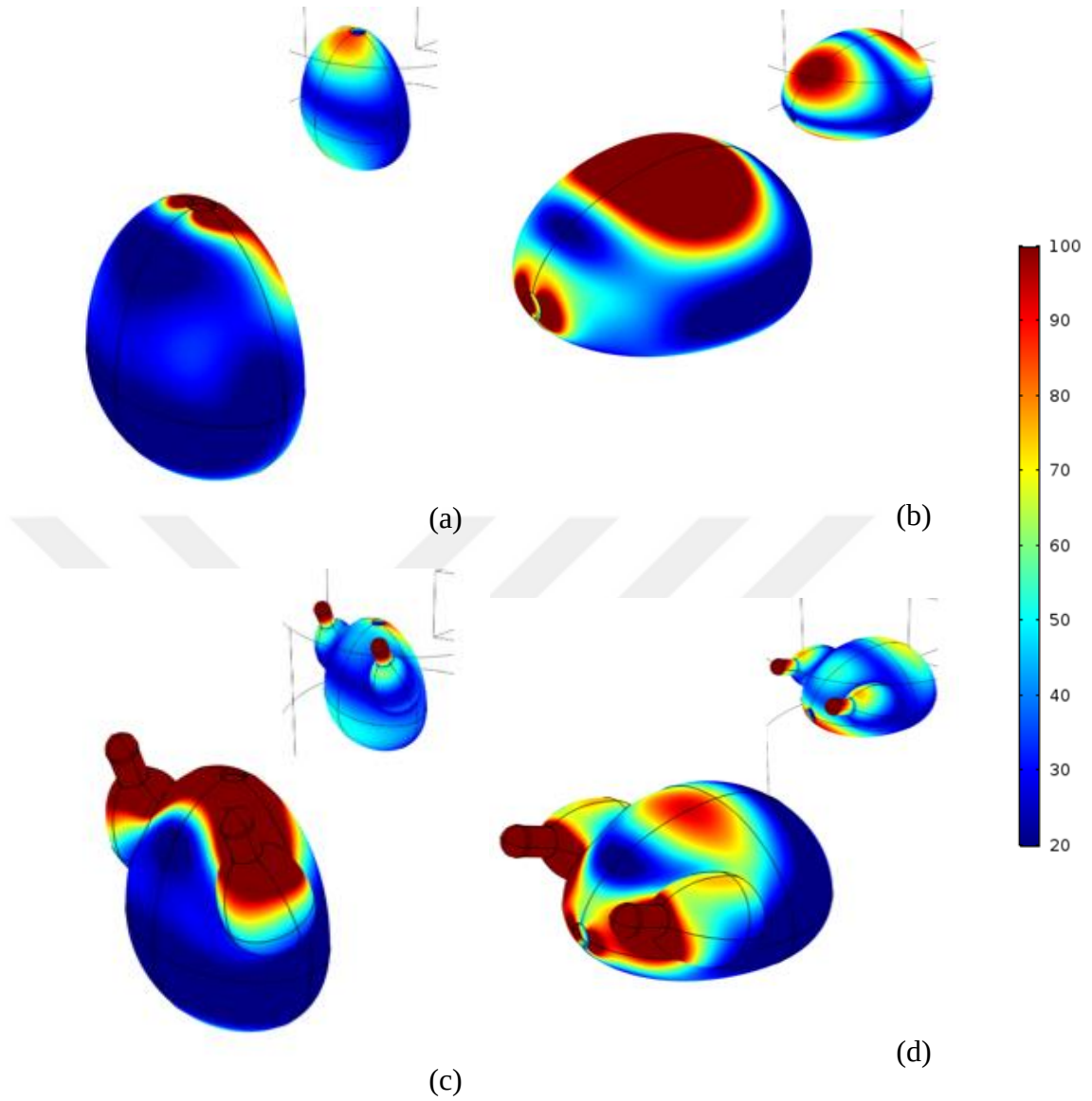
Tavuk karkas geometrisi kıvrımlı bir yapıya sahip olduğundan belirli bölgelerde (özellikle kenar ve köşe olarak tabir edilen bölgelerde) elektromanyetik alan yoğunlaşmasına bağlı olarak daha fazla ısınma olmuştur. Şekil 4.14.b ve 4.14.d’de sistem içerisinde aynı lokasyonda bulunan ve sırasıyla but geometrisi içeren ve içermeyen tavuk karkalarına ait bir kesitteki sıcaklık dağılımları görülmektedir. But geometrisi

içermeyen tavuk karkasının üst kısmında daha yüksek sıcaklıklara ulaşılırken, but geometrisi içeren modellerin but geometrisi içermeyen modellere oranla daha düşük sıcaklıklara ulaşabileceği ortaya çıkmıştır. Bu durumun nedeni şekil 4.15.d’de net bir şekilde görülmekte olup but geometrisi oluşan elektromanyetik alanı absorbe ederek ısınmasının but kısımlarında yoğunlaşmasına neden olmuştur. Benzer şekilde kavite içerisine dikey olarak yerleştirilen tavuk karkaslarında da aynı durum görülmektedir.



Şekil 4.14 Proses sonunda zx- ekseninde alınan bir kesitte sıcaklık dağılımları (°C)

a.but geometrisi içermeyen kavite içerisinde dikey pozisyonda bulunan, b. but geometrisi içermeyen kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan, c. but geometrisi içeren kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan ve d. but geometrisi içeren kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan



Şekil 4.15 Proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımları (°C)

a.but geometrisi içermeyen kavite içerisinde dikey pozisyonda bulunan, b. but geometrisi içermeyen kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan, c. but geometrisi içeren kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan ve d. but geometrisi içeren kavite içerisinde yatay pozisyonda bulunan

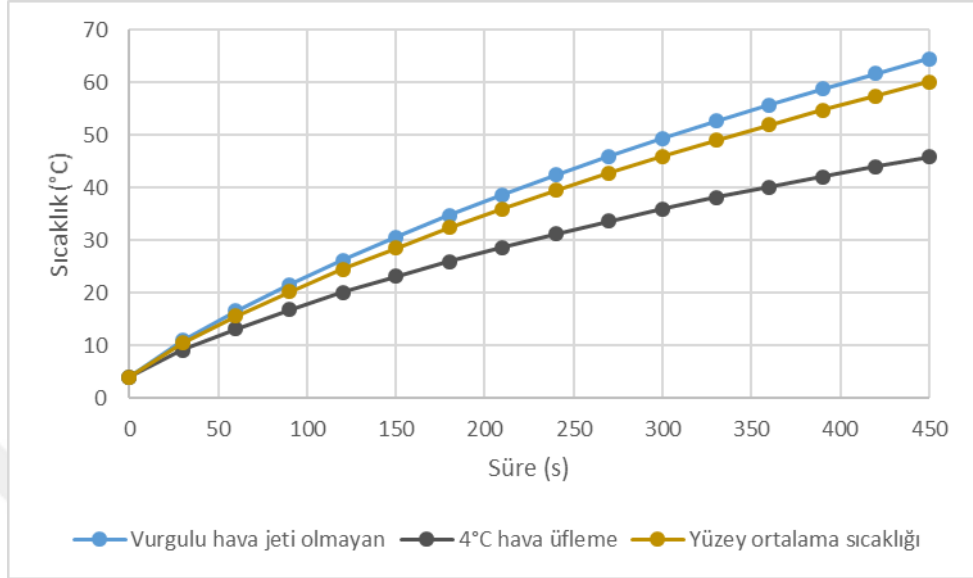
Tavuk karkasının MW sistem içerisindeki lokasyonu ve but geometrisi içerip içermemesindeki değişime bağlı olarak farklı elektromanyetik alan dağılımı ve sıcaklık değişimi elde edilmektedir. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi but geometrisi sıcaklık dağılımında önemli bir değişiklik yapmaktadır ve but geometrisi içeren modellerde but kısmında aşırı ısınma meydana gelmiştir. But geometrisi kavisli ve nispeten ince bir yapıya sahip olduğundan yüksek sıcaklık artışları meydana gelmiştir. Bu kısımlarda

elektromanyetik alan dağılımına bağılı olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklık artışı diğer kısımlardakini engellemiştir. Bu nedenle proses sırasında but kısımlarının, tavuk karkasının diğer bölgelerine oranla daha yüksek sıcaklıklara ulaşacağı net olarak ortaya çıkmıştır. Bu durumu engellemek amacıyla but kısımlarının, gelen elektromanyetik dalgayı yansıtması ve bu kapsamda elektromanyetik enerjiyi yansıtmak amacıyla alüminyum folyo gibi materyallerin kullanılması farklı proses tasarım çalışmalarının temelini oluşturabilir. Bu kapsamda bir matematiksel model çalışması için gerekli olan hesaplama – RAM kapasitesi mevcut olmadığından ilerleyen çalışmalarda but bölümünün olmadığı gövde modelleri ile çalışmalara devam edilmiştir. But geometrisi içermeyen modellerde ise konuma bağılı olarak farklı bölgelerde ısınma olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, ısınmanın tekdüze olmadığı, belirli bölgelerde ekstrem sıcaklıklar olduğu tespit edilmiştir. But geometrisi içermeyen modellerde tavuk karkasının lokasyonuna bakılmaksızın aynı sorun meydana gelmektedir. Fakat endüstri açısından yatay pozisyonda proses etmek daha kolay olacağından çalışmalar bu model üzerinden devam etmiştir.

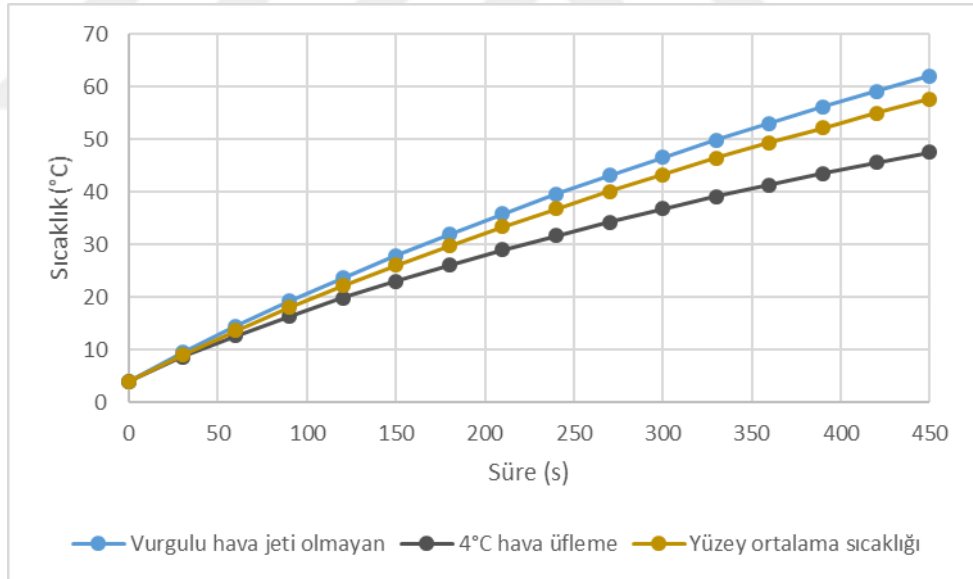
Sisteme ilave edilen vurgulu hava jetinin etkisi:

Tekdüze olmayan ısınmayı engellemek amacıyla but içermeyen ve kavite içerisinde yatay pozisyonda yer alan tavuk geometrisinin bulunduğu sisteme vurgulu hava jeti uygulaması eklenmiştir. Bu sistemde hava hızı 4 m/s olarak planlanmıştır. 4 °C ve ürünün anlık yüzey ortalama sıcaklığı hesaplanarak elde edilen hava sıcaklık değerleri de ısı transferi kapsamında başlangıç koşullarını meydana getirmiştir. 450 s olarak belirlenen proses süresince elde edilen ürün dış yüzey ortalama sıcaklığı ve dış katmanın hacim ortalama sıcaklığı şekil 4.16’da görülmektedir. Bu şekilde gözleneceği üzere vurgulu hava jeti içermeyen model ile anlık olarak ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenen model için dış yüzey ortalama sıcaklıkları arasında önemli bir fark olmamıştır. Bunun aksine, 4 °C hava üflendiğinde diğer 2 modele kıyasla 10 °C’den daha az ısınma olduğu görülmektedir. Bu da amaçlanan mikroorganizmadaki azalmaya ulaşmak için gerekli süreyi arttırmıştır. Hava jeti uygulamasında kullanılan hava sıcaklığının 4 °C ve anlık yüzey sıcaklık ortalaması olduğu durumlar için proses sonunda oluşan ürün yüzey sıcaklık değişimi şekil 4.17’de verilmiştir. Aynı zamanda vurgulu hava jetinin ürün

sıcaklık dağılımına etkisini görmek amacıyla vurgulu hava jeti ilave edilmeyen sistem sonuçları da şekil 4.17’de görülmektedir.

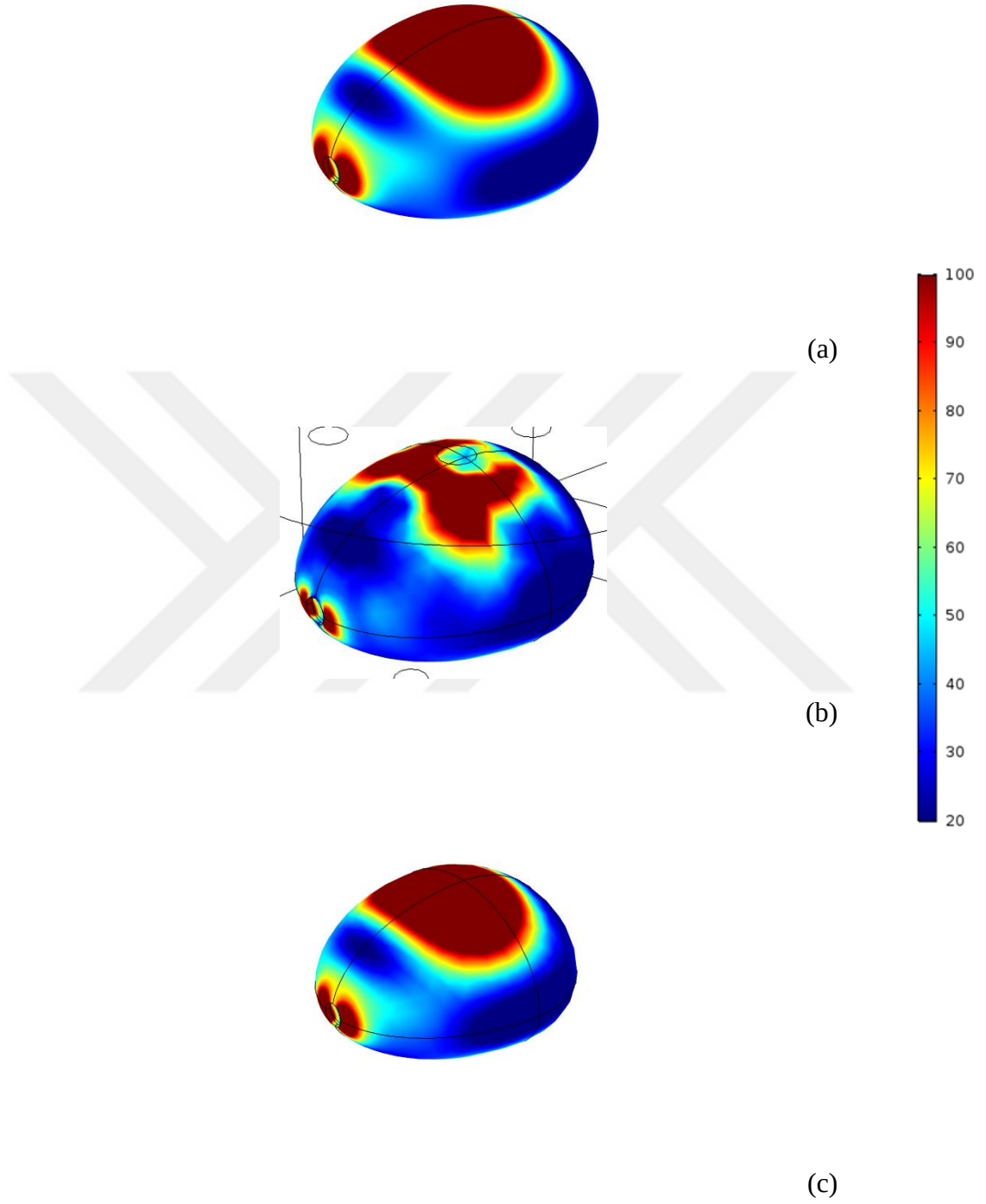


(a)



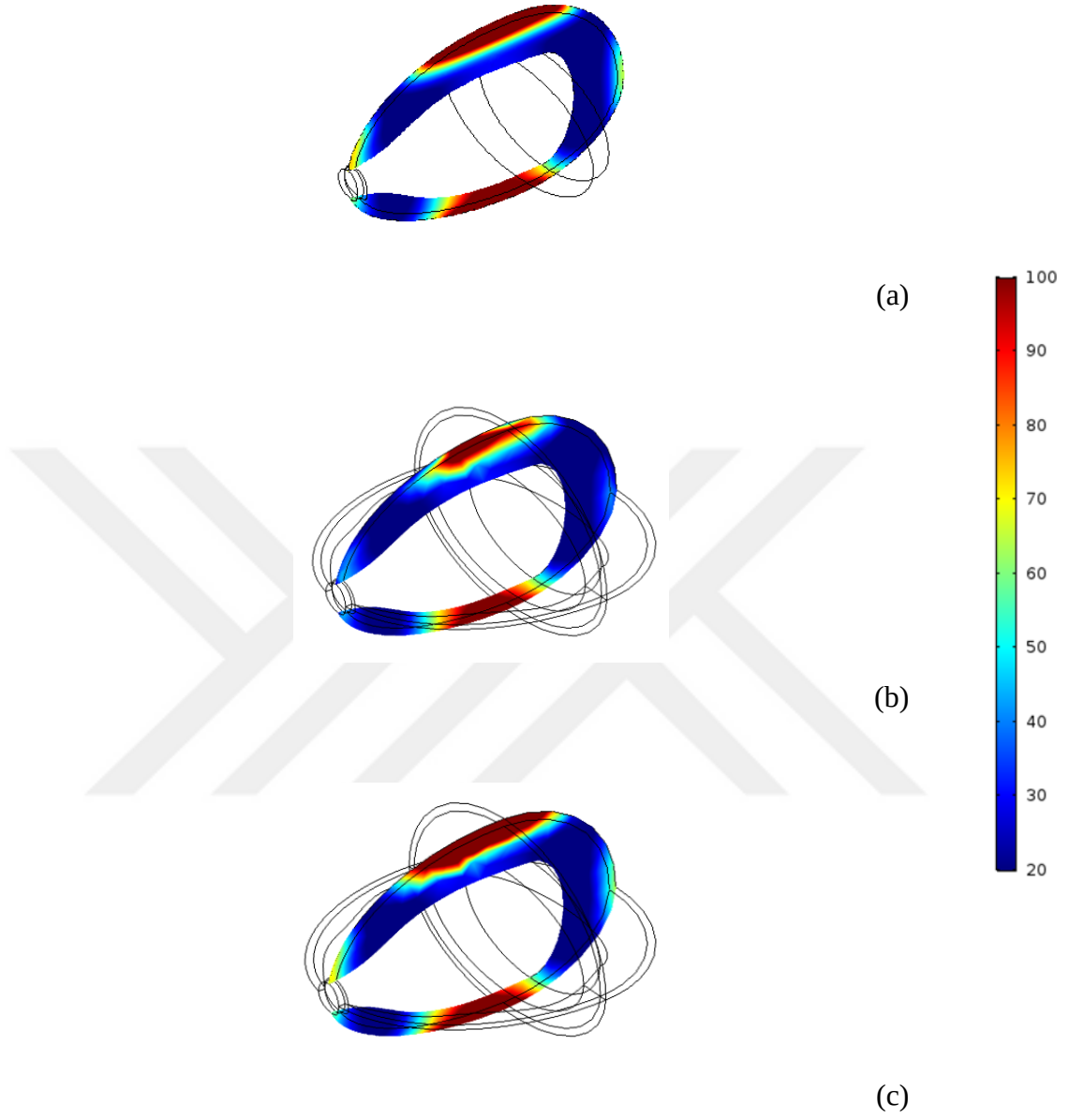
(b)

Şekil 4.16 Proses boyunca vurgulu hava jeti içermeyen, 4 °C hava üflenene ve ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenene modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları



Şekil 4.17 Proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımları (°C)

a.vurgulu hava jeti bulunmayan sistem, b. 4 °C hava üflenene sistem c. ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenene sistem



Şekil 4.18 Proses sonu ürün yüzey sıcaklık dağılımları (°C)

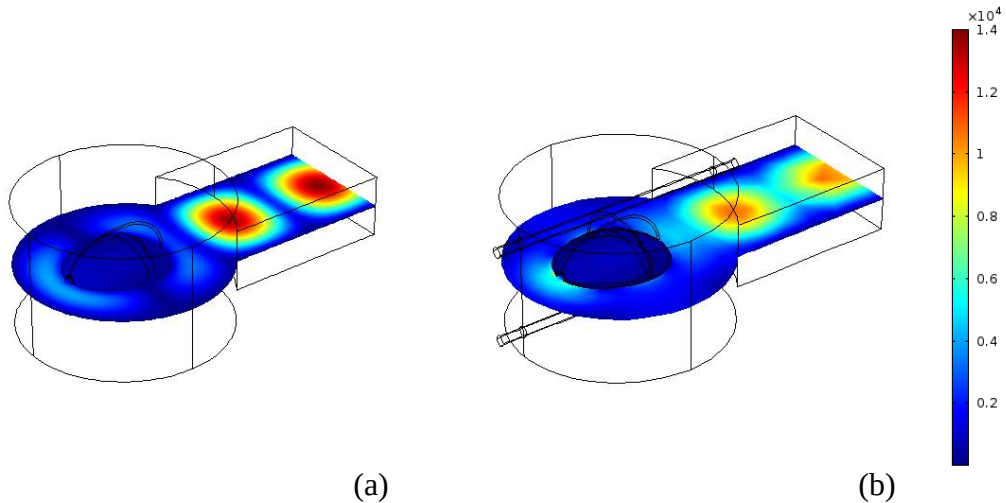
a.vurgulu hava jeti bulunmayan sistem, b. 4 °C hava üflenmesi ile sistem c. ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenmesi ile sistem

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenmesi ile vurgulu hava jeti içermeyen modellerde önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Fakat 4 °C hava üflenmesi ile bölgesel ısınmaların önüne geçildiği de net olarak ortaya çıkmıştır.

Şekil 4.18’de görüldüğü üzere sisteme vurgulu hava jeti eklenmesi ile ürünün yüksek sıcaklıklara ulaşan bölge alanı azalmıştır. Fakat ürünün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenmesi ile vurgulu hava jeti içermeyen sistem arasında önemli bir fark olmadığı da göze çarpmaktadır. Şekil 4.18.b’de vurgulu hava jeti uygulamasında 4 °C hava üflenenden sistemde yüzeyde aşırı ısınma oluşan bölgelerin azaldığı ve sıcaklığın düştüğü görülmektedir. Fakat bu durumda prosesin etkinliği azalmış ve gerekli mikrobiyal azalmayı sağlamak için daha uzun proses süresi gerekeceği ortaya çıkmıştır. İncelenen proseslerde ürün yüzeyinde ve kesitindeki elektromanyetik alan dağılımı 4.14.b ve 4.15.b’deki ile aynıdır.

Sisteme su akışı eklenmesinin etkisi:

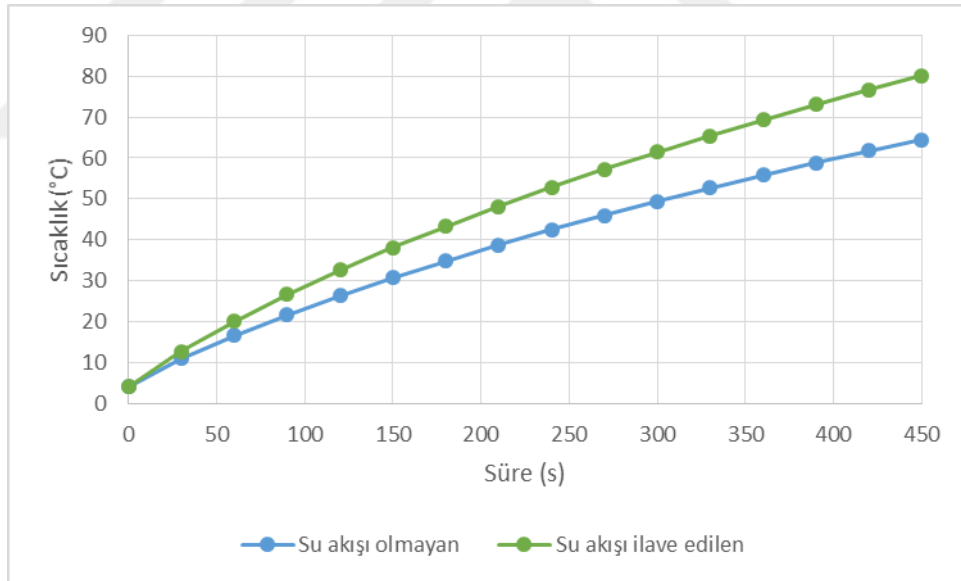
915 MHz frekans ile çalışan silindirik kaviteye 2 cm çaplı 2 boru yerleştirilmiş ve içerisinden 0,1 m/s hızla 4 °C sıcaklığındaki su akışı sağlanmıştır. Burada amaç; oluşan elektromanyetik dalgaların bir kısmının su tarafından absorbe edilerek tavuk karkasının bazı bölgelerinde meydana gelen aşırı ısınmayı engellemektir. Şekil 4.19’da xy-ekseninde ürün merkezine denk gelecek şekilde alınan bir kesitte sisteme su akışının eklenmesi ile kavite içerisindeki elektromanyetik alan değişimi görülmektedir.



Şekil 4.19 Su akışı bulunmayan (a) ve bulunan sistemde (b) elektromanyetik alan dağılımı (V/m)

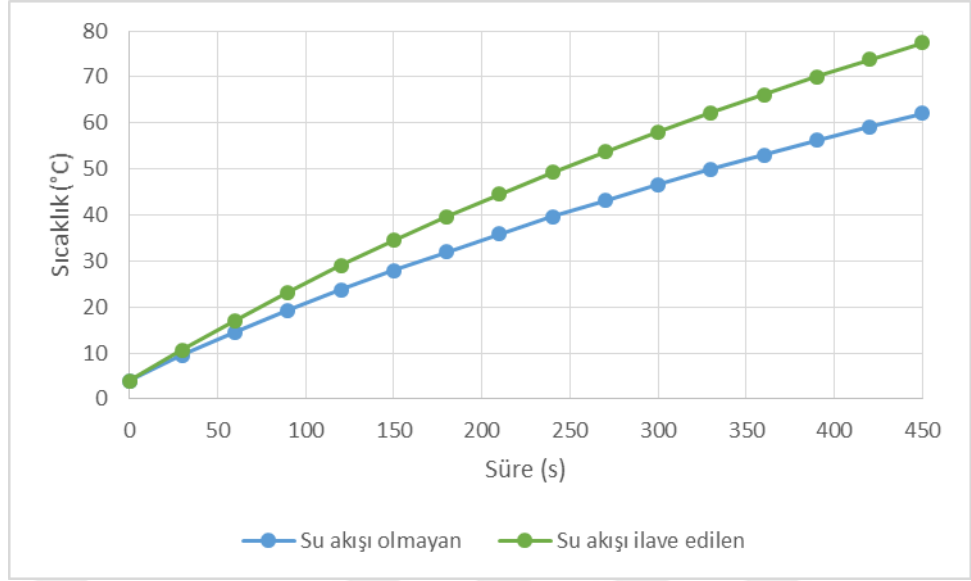
Şekil 4.20’de sisteme su akışı eklenmesinin dış katman sıcaklığına etkisi görülmektedir. Burada sisteme eklenen su akışı ürünün dış kısmının daha fazla ısınmasına yol açmıştır. Buna paralel olarak ürün iç kısmında da su akışı ilave edilen sistemde daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmaktadır.

Şekil 4.21 ve 4.22’de ise sırasıyla su akışı içeren ve içermeyen sistemlerde zx- ekseninde ürünün orta kesitinde ve ürün yüzeyinde 450 s proses sonundaki sıcaklık dağılımları ve kenarlarda ise elektromanyetik alan dağılımları görülmektedir. Şekil 4.21’de sisteme su akışının dahil edilmesi sonucu, ısımanın sadece ürün yüzeyinde olmadığı iç kısımların da yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmektedir. Fakat şekil 4.22’de bazı bölgelerde oluşan yerel sıcaklık artışlarının nispeten önüne geçildiği, bu alanın su akışı içermeyen modele göre azaldığı gözlenmiştir. Şekil 4.21’den de anlaşılacağı üzere elektromanyetik alanın yoğunlaşması ile ürünün iç kısımlarında daha fazla ısınma meydana gelmiştir.



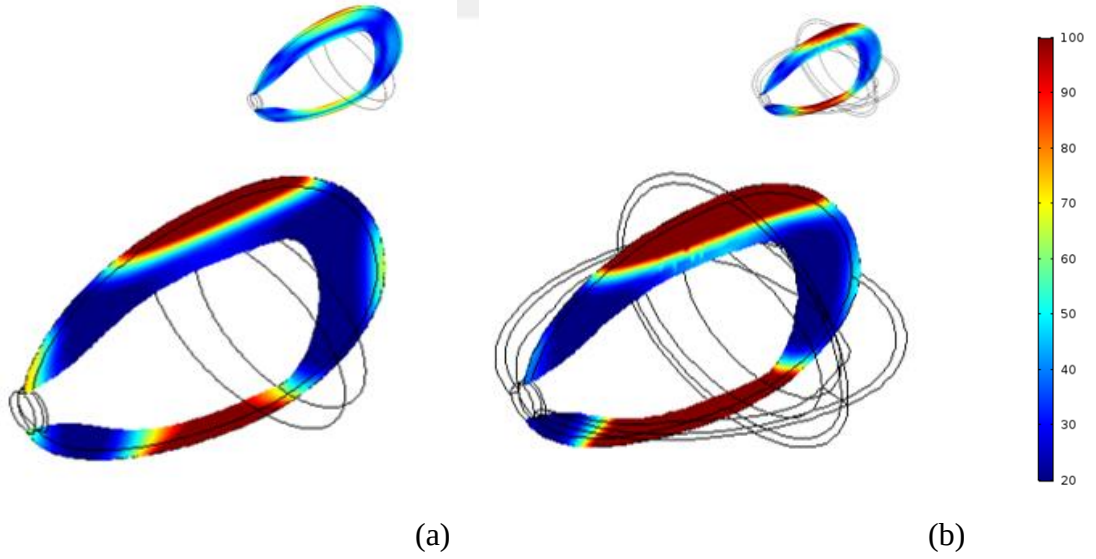
(a)

Şekil 4.20 Sisteme su akışı ilave edilmesi ile dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları

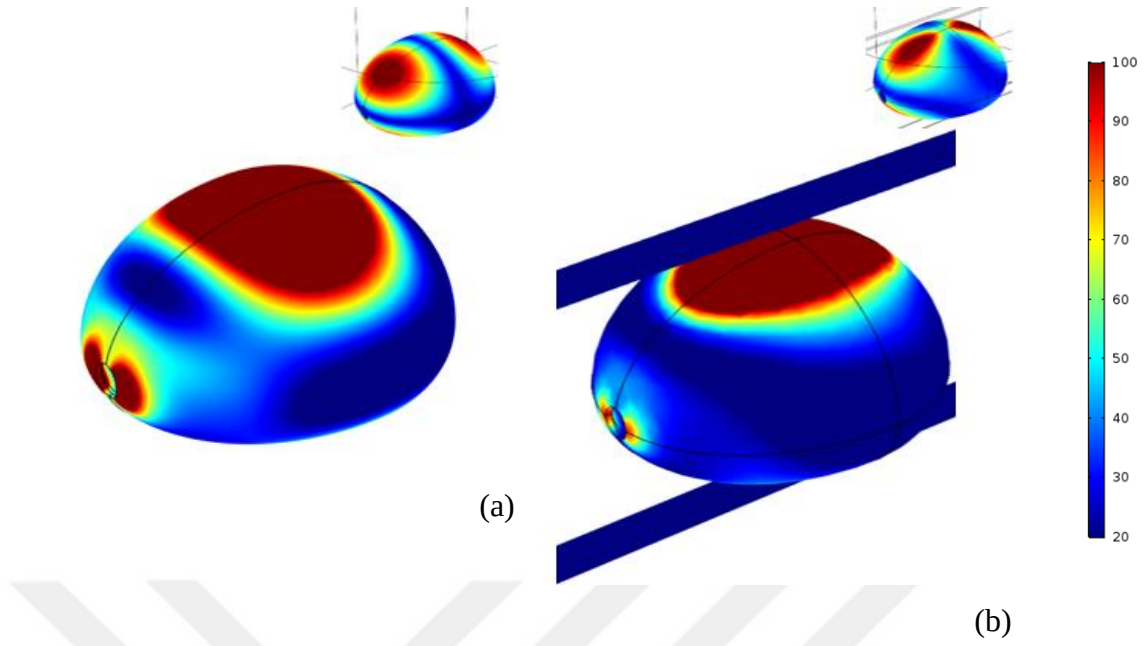


(b)

Şekil 4.20 Sisteme su akışı ilave edilmesi ile dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları (devam)



Şekil 4.21 Su akışı bulunmayan (a) ve bulunan sistemde (b) zx- ekseninde orta kesitte sıcaklık dağılımı (°C)

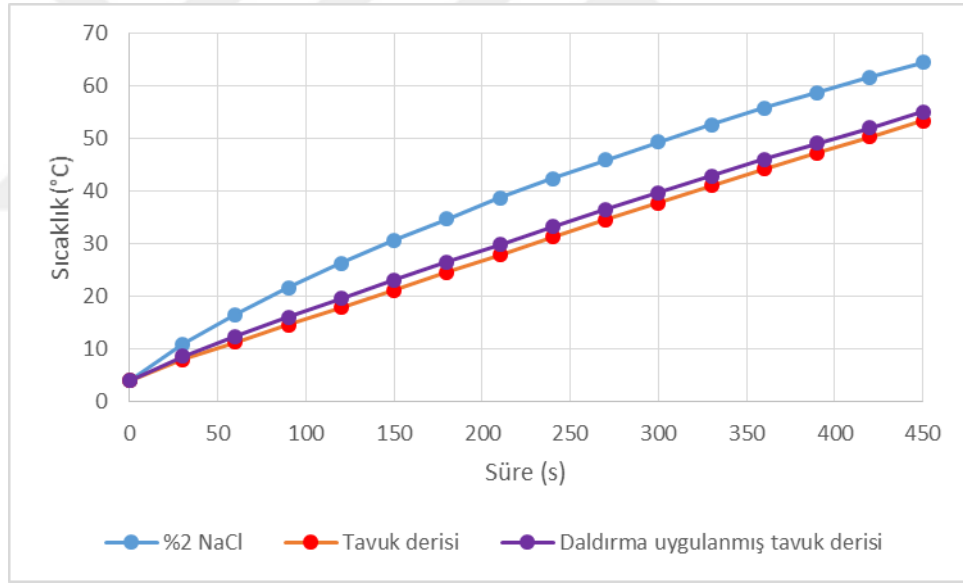


Şekil 4.22 Su akışı bulunmayan (a) ve bulunan sistemde (b) proses sonu ürün yüzey sıcaklık dağılımı (°C)

NaCl çözeltisi uygulamasının etkisi:

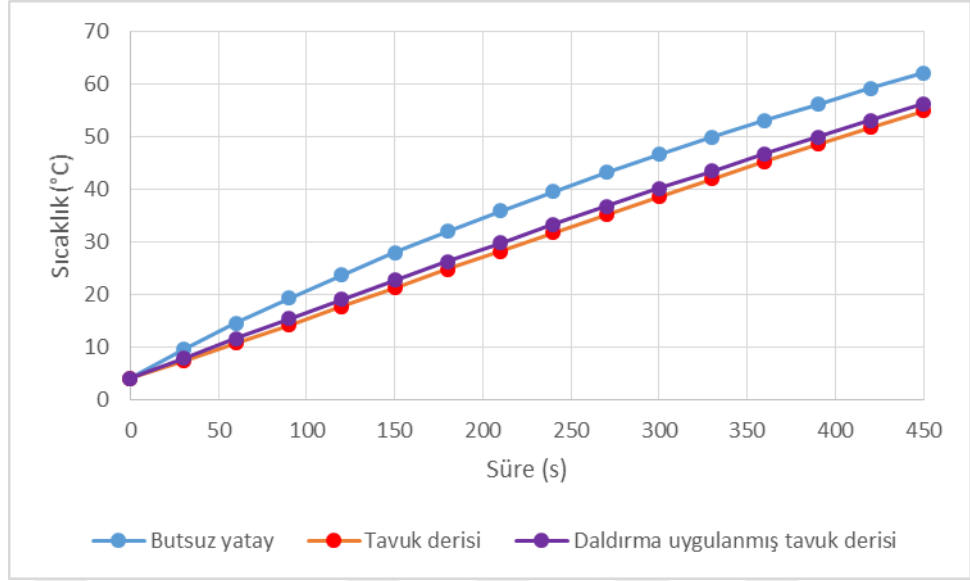
Bu bölümde tavuk karkası dış yüzeyinde oluşturulan 0,5 cm katmanının materyal özelliklerine bağlı olarak etkisi incelenmiştir. Bu amaçla dış katman, çizelge 4.2’de verilen ve kontrol grubu örneklerin dielektrik özellikleri olarak tanımlanmıştır. Kontrol grubu örneklerde NaCl uygulaması yapılmadığından direkt olarak tavuk derisinin sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Ayrıca gerçek tavuk but örneklerine daldırma yöntemi ile NaCl uygulaması sonucu ölçülen ve benzer şekilde çizelge 4.2’de sonuçları verilen dielektrik özellikler kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Bahsedilen bu iki modelden elde edilen sonuçlar, referans model olarak belirlenen but geometrisi içermeyen ve sistem içerisinde yatay pozisyonda yer alan çalışmanın sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Böylece NaCl çözeltisi uygulaması ile sıcaklık profilinde meydana gelecek değişimler gözlenmiştir. Özetle bu 3 modelde tavuk karkasının dış katmanına % 2 NaCl çözeltisi (referans model), tavuk karkası ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk derisinin dielektrik özellikleri tanımlanmıştır. Buun yanı sıra ürünün özellikleri belirtilen modellerde aynıdır. Simülasyon çalışmalarında 450 s proses sonucunda oluşan dış katmanın yüzey ve hacim ortalama sıcaklığı şekil 4.23’te görülmektedir.

Şekil 4.23.a’da görüldüğü gibi tavuk karkası dış yüzeyindeki 0,5 cm’lik katmana, % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile oluşturulan modelde dış yüzey ortalama sıcaklığı tavuk derisinin ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk deri örneklerinden ölçülen dielektrik özelliklerin tanımlanması ile oluşturulan modellere göre daha yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır. Benzer şekilde, şekil 4.23.b’de dış katmanın hacim ortalama sıcaklığına bakılacak olursa % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özellikleri kullanılarak oluşturulan model en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır. Bunun yanı sıra daldırma yöntemi ile NaCl çözeltisi uygulanmış tavuk derisinin dielektrik özelliklerinin kullanıldığı model ile NaCl çözeltisi uygulanmamış tavuk derisinin dielektrik özelliklerinin dış katmana tanımlandığı modelde önemli sıcaklık farkı olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi bölüm 4.2’de verilen daldırma yöntemi uygulandığında derinin NaCl miktarının % 1,13 olarak belirlenmesidir.



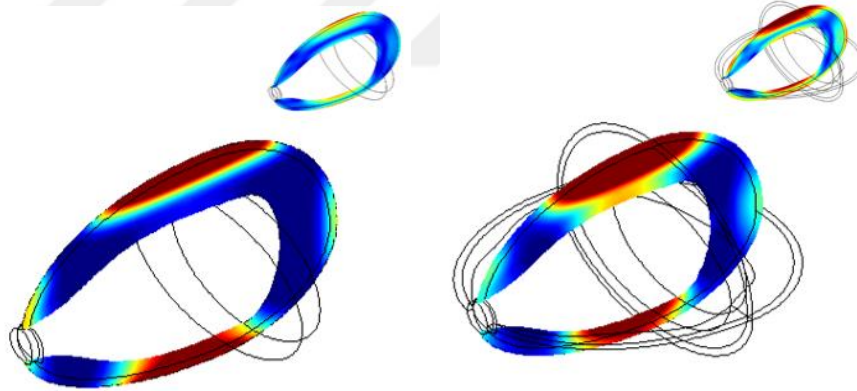
(a)

Şekil 4.23 Dış katmana farklı dielektrik özelliklerin tanımlandığı modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları



(b)

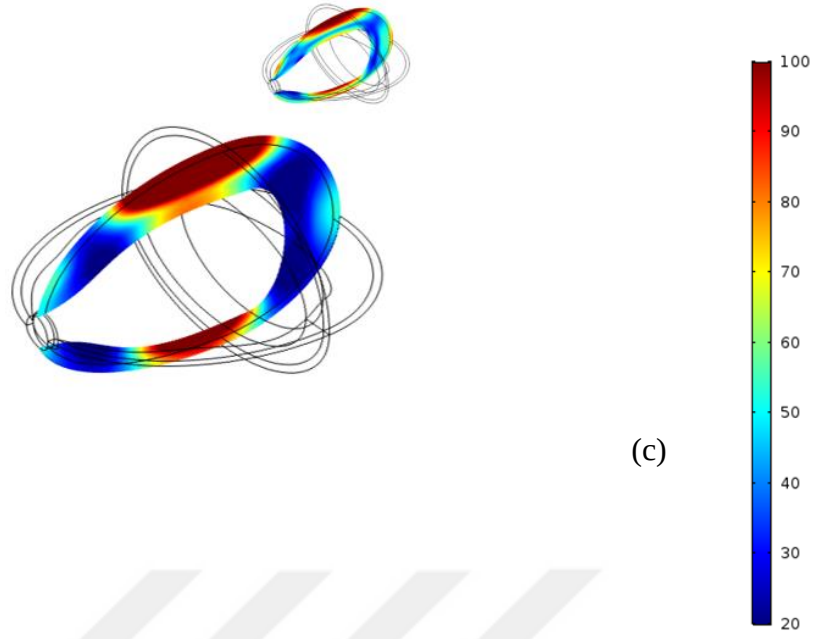
Şekil 4.23 Dış katmana farklı dielektrik özelliklerin tanımlandığı modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları (devam)



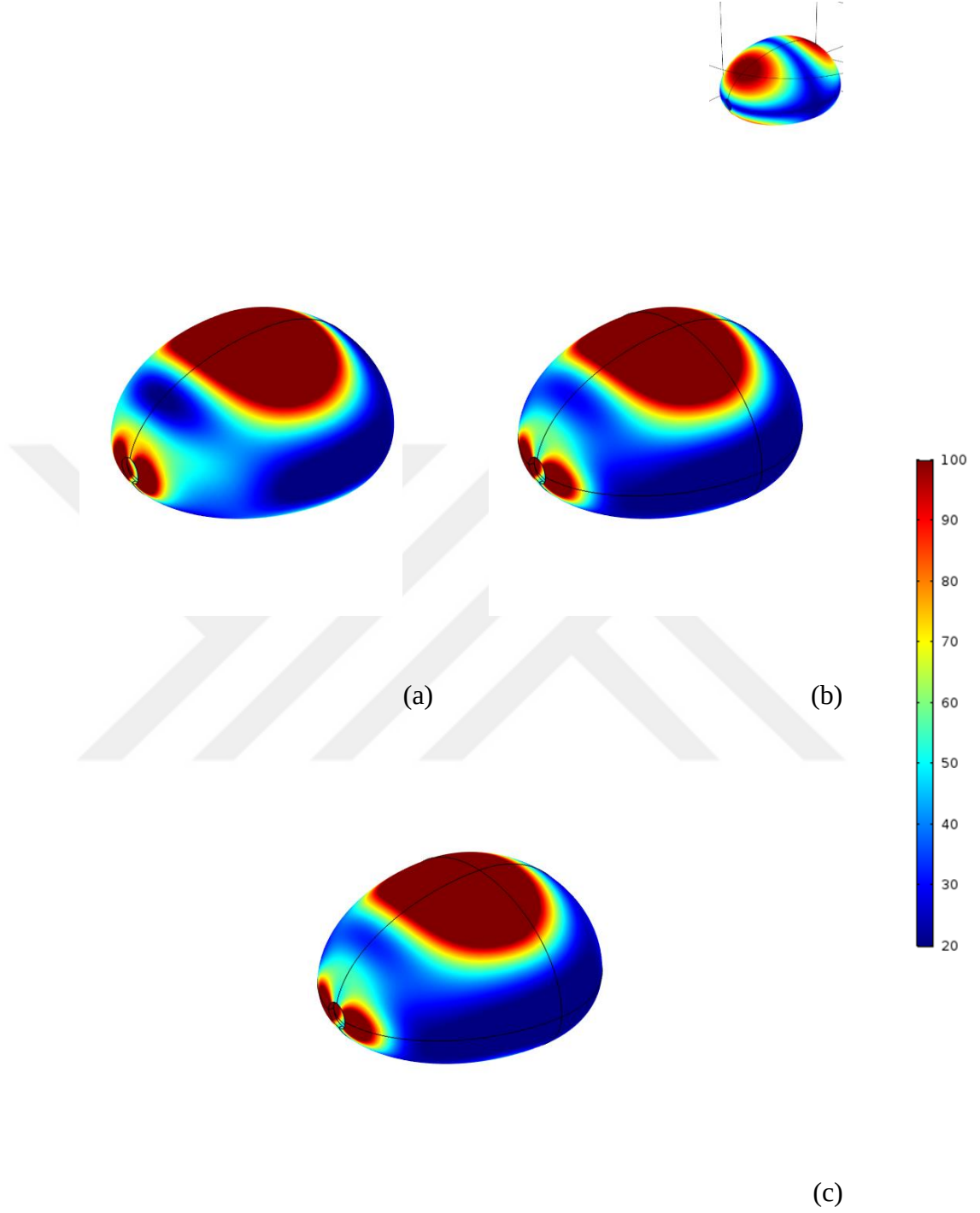
(a)

(b)

Şekil 4.24 Dış katmana %2 NaCl çözeltisinin (a), herhangi bir işlem uygulanmamış tavuk derisinin (b) ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk but derisinin (c) dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C)



Şekil 4.24 Dış katmana %2 NaCl çözeltisinin (a), herhangi bir işlem uygulanmamış tavuk derisinin (b) ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk but derisinin (c) dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C) (devam)



Şekil 4.25 Dış katmana %2 NaCl çözeltisinin (a), tavuk derisinin (b) ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk but derisinin (c) dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile proses sonu yüzey sıcaklık dağılımı (°C)

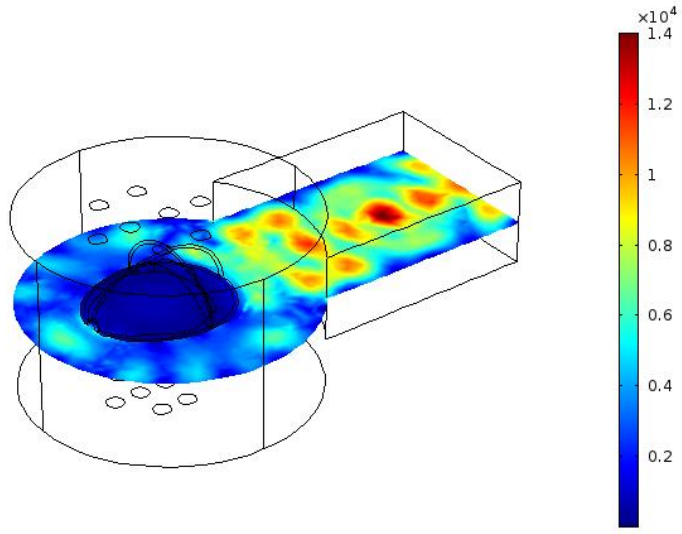
Şekil 4.24'te dış katmana tanımlanan dielektrik özelliklere bağlı olarak zx- kesitinde 450 s proses sonunda oluşan sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil 4.24.a'da görülen ve referans kabul edilen modelde dış katmanın tamamen % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özelliklerine sahip olduğu varsayımı yapılmıştır. Şekil 4.23'teki sıcaklık verileriyle paralel olarak şekil 4.24'te de % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özellikleri kullanılan modelde ısınma sadece yüzeyde kalmıştır ve tavuk karkasının olduğu bölgelerde diğer modellere kıyasla daha az ısınma olmuştur. Buradan da anlaşılabileceği üzere NaCl çözeltisi uygulanmamış tavuk geometrisinde (şekil 4.24.b) elektromanyetik alan değişimi sadece yüzeyde tutunamayıp karkasın içinde de ısınmaya sebep olmuştur ki bu tavuğun pişmesi anlamına geldiğinden istenmeyen bir durum olarak ortaya çıkmıştır. Bu durumun tam aksine NaCl katmanı içeren modelde (şekil 4.24.a) ise ısınma sadece yüzeyde meydana gelmiş ve bu durum ürün iç kısmının ısınmasını engellemiştir.

Şekil 4.25'te ise proses sonunda dış yüzey sıcaklıkları görülmektedir. Bu değişim şekil 4.23.a'da elde edilen sonuçları desteklemektedir. Bunun yanı sıra, şekil 4.25'te görülen NaCl çözeltisinin penetrasyon derinliğine bağlı olarak çalışmanın nihai hedefi olan tavuk karkasını ısıtmadan yüzeyde ısınma sağlanmıştır. % 2 NaCl çözeltisinin penetrasyon derinliği sıcaklığa bağlı olmakla birlikte 0,3 – 0,5 cm aralığındadır. Dış katman için oluşturulan geometri 0,5 cm kalınlığında olduğundan elektromanyetik dalgalar iç kısımlara ulaşamamış ve bu nedenle 450 s proses sonunda % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özelliklerinin tanımlanması ile oluşturulan modelde tavuk karkası hacim ortalama sıcaklığı 34 °C iken tavuk karkası ve daldırma yöntemi uygulanan tavuk derisinin dielektrik özellikleri kullanılan modellerde 40 °C'nin üzerinde sıcaklıklara ulaşmıştır. Tavuk karkasının ısınması istenmeyen bir durum olduğundan dış katmanda daha fazla NaCl çözeltisinin bulunması tavuk karkasının daha az ısınmasında etkili olacaktır.

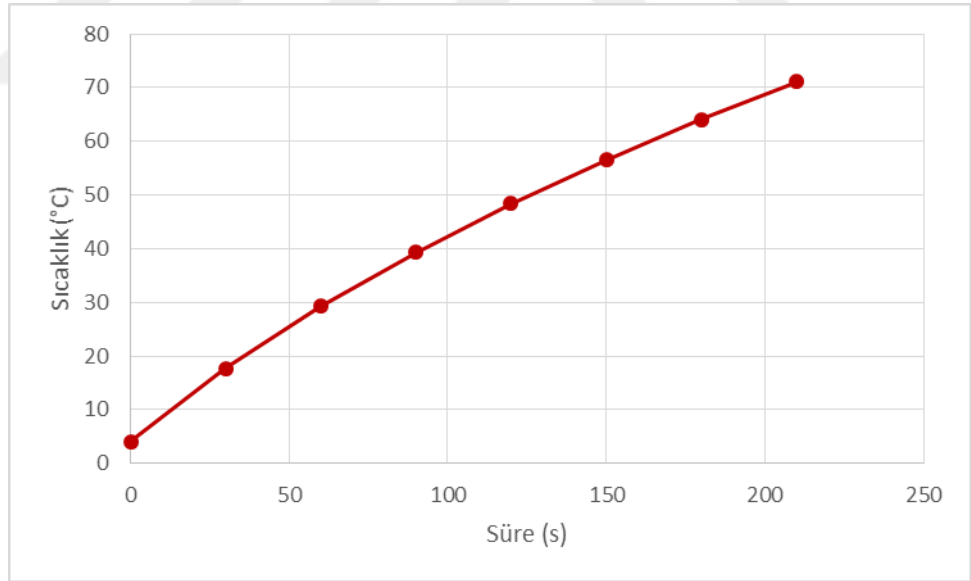
4.1.1.2 2450 MHz frekansta çalışan endüstriyel mikrodalga sistem

915 MHz frekans uygulaması için planlanan silindirik kavite bu bölümde 2450 MHz frekans uygulaması ile çalıştırılmıştır. 915 MHz için kullanılan dalga kılavuzu, 2450 MHz frekans için gerekli olandan daha büyük olduğundan dalga kılavuzunun boyutları

değiştirilmemiş ve bu şekilde elektromanyetik alanın kavite içerisinde dağılımı sağlanmıştır. Bunun yanı sıra oluşturulan bu modelde de vurgulu hava jeti uygulaması gerçekleştirilmiştir. 915 MHz frekans ile çalışan modeldekine benzer şekilde vurgulu hava jetinde kullanılan havanın hızı 4 m/s'dir. Hava sıcaklığı için ise ürünün dış yüzeyinin ortalama sıcaklığı anlık olarak hesaplanmış ve bu belirlenen sıcaklıkta hava üflenmiştir. Oluşturulan model ile elde edilen elektromanyetik alan dağılımı şekil 4.26'da görülmektedir. Burada görüldüğü gibi kullanılan dalga kılavuzu ve kavite boyutlarına bağlı olarak elektromanyetik alanın sistem içerisinde dağılması sağlanmış ve bu kapsamda ürünün belirli bölgelerinin aşırı ısınması engellenerek daha tekdüze bir sıcaklık dağılımının elde edilmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.27'de ise 210 s'lik proses boyunca ürün yüzey ortalama sıcaklığı ve dış katmanın hacim ortalama sıcaklığı görülmektedir. Buradan da anlaşılabileceği üzere daha kısa proses süresi sonunda bile hedeflenen sıcaklıklara ulaşılmıştır. 210 s proses sonunda ürün yüzeyinde 70 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerleri elde edilirken, dış katmanın hacim ortalama sıcaklığı da 60 °C'nin üzerine çıkmıştır. Buradan ürünün iç kısımlarına ısının ulaşmadığı sonucu çıkarılabilmektedir. Şekil 4.28 ve 4.29'da ise 210 s sonunda ürün yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve zx- kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Aynı zamanda ürün yüzeyindeki ve orta kesitteki elektromanyetik alan dağılımı da verilen ilgili şekillerin üst kenarında gösterilmiştir. Şekil 4.28 ve 4.29'da görüldüğü gibi aynı kavitede oluşturulan ve 915 MHz frekansla çalışan modellere oranla nispeten daha tekdüze bir ısınma sağlanmıştır.

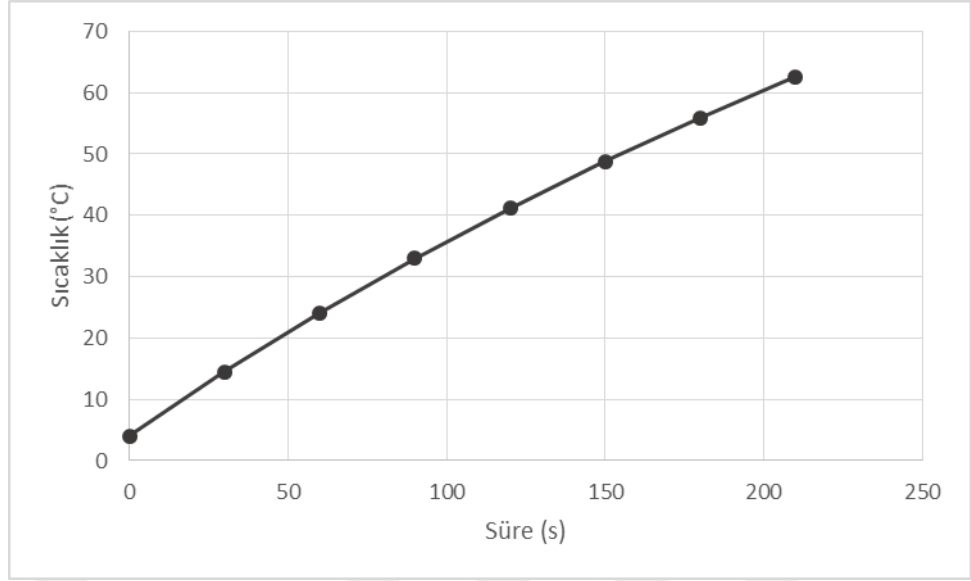


Şekil 4.26 Silindirik kavitede 2450 MHz frekansta çalışan sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı (V/m)



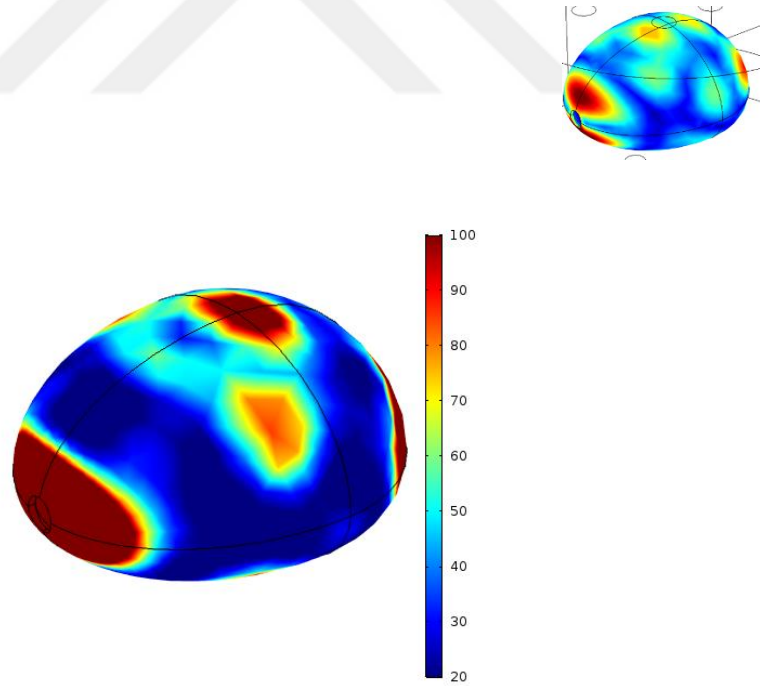
(a)

Şekil 4.27 Silindirik kavitede 2450 MHz frekans ile çalışan sistem için oluşturulan modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları

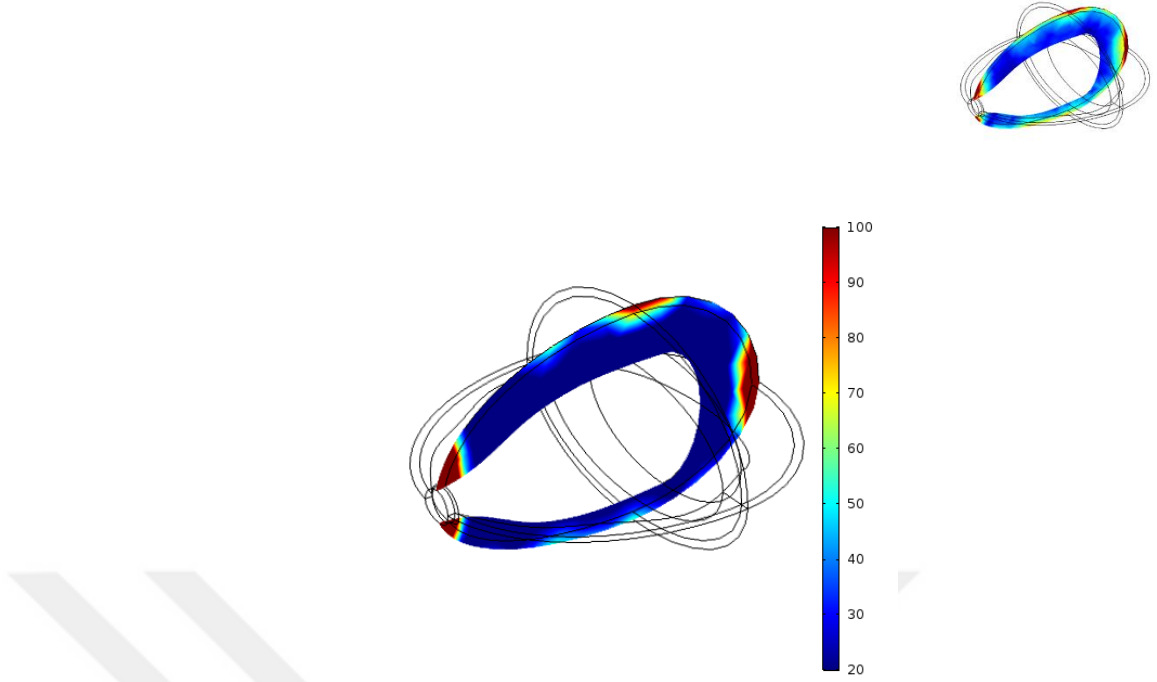


(b)

Şekil 4.27 Silindirik kavitede 2450 MHz frekans ile çalışan sistem için oluşturulan modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları (devam)



Şekil 4.28 Silindirik kavitede 2450 MHz frekansta çalışan sistem içerisinde proses edilen tavuk karkasının proses sonu yüzey sıcaklık dağılımı (°C)



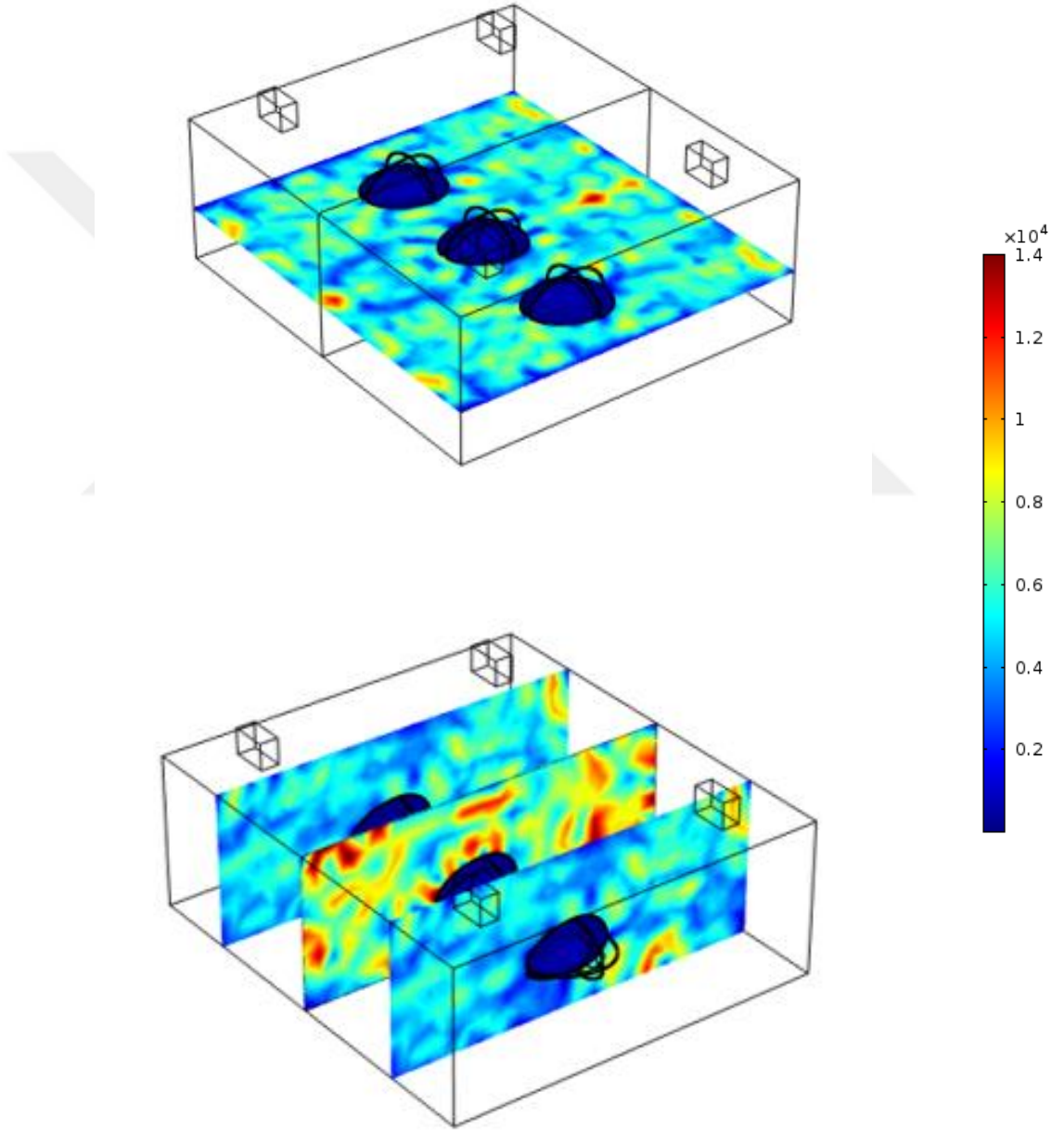
Şekil 4.29 Silindirik kavitede 2450 MHz frekansta çalışan sistem içerisinde proses edilen tavuk karkasının proses sonu alınan bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C)

4.4.2 Dikdörtgensel kavitede oluşturulan matematiksel modeller

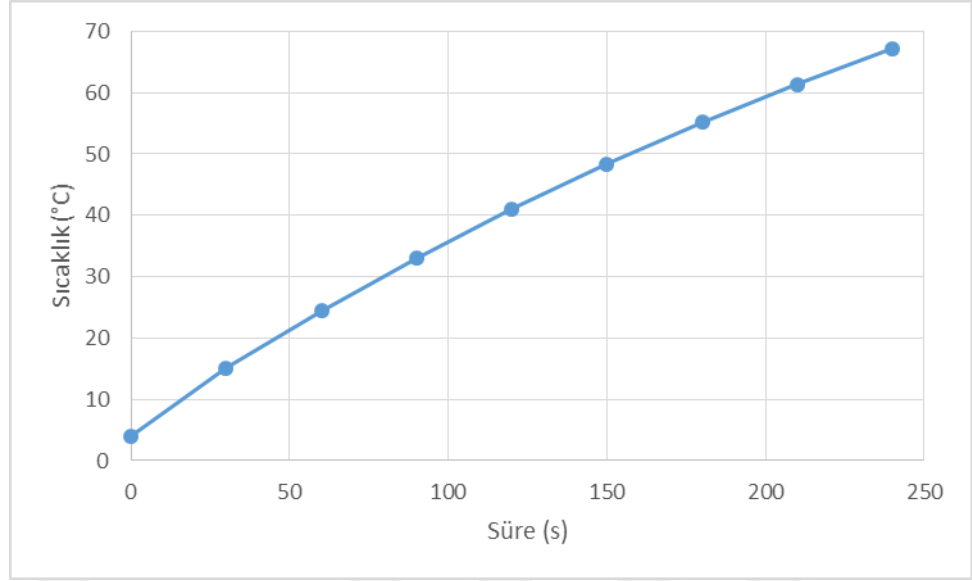
Dikdörtgensel kavitede aynı anda 3 adet tavuk karkasının proses edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kaviteye gücü 500 W olan 4 adet magnetronun sistem üst yüzeyinde olması planlanmıştır. Dörtgensel kavitenin genişliği 90 cm, derinliği 100,6 cm, uzunluğu 36 cm'dir. Dalga kılavuzunun ise genişliği 4,32 cm, derinliği 8,64 cm ve uzunluğu 6,12 cm'dir. Kavitenin büyük olması sebebiyle ağ yapısını daha yoğun yapabilmek amacıyla sistemin simetri merkezinden yarısı alınmış ve sadece bu kısım için çözüm yapılmıştır. Bu nedenle oluşturulan geometride 1 tane tavuk karkasının tamamı 1 tanesinin ise yarısı yer almaktadır.

Şekil 4.30'da 2 farklı kesitte dikdörtgensel kavitede oluşan elektromanyetik alan dağılımı görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere silindirik kaviteye oranla daha tekdüze bir dağılım elde edilmiştir. Aynı zamanda kavitenin büyük ve 2450 MHz frekansta dalga boyunun küçük olmasına bağlı olarak kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alan

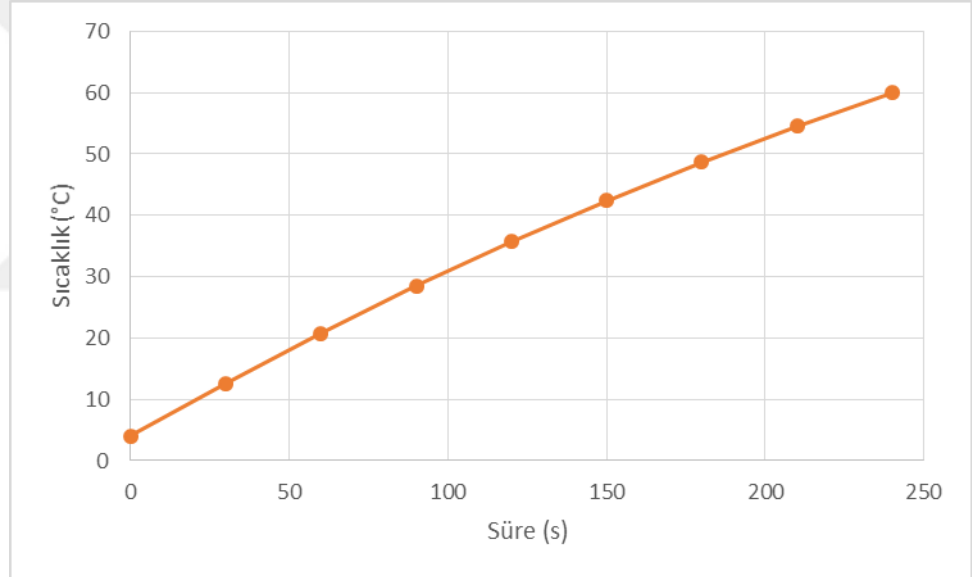
dağılımının meydana geldiği de bu şekilde görülmektedir. Dikdörtgensel kavite için oluşturulan modellerde dış katman yüzey ortalama ve hacim ortalama sıcaklık değişimleri ise şekil 4.31.a ve 4.31.b’de görülmektedir. Şekil 4.32 ve 4.33’te ise 240 s proses sonunda dikdörtgensel kaviteye sahip MW sistem içerisinde proses edilen örneklerin sırasıyla yüzey sıcaklık dağılımı ve ortasından alınan bir kesitteki sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.30 Dikdörtgensel kavitede oluşan elektromanyetik alan dağılımı (V/m)

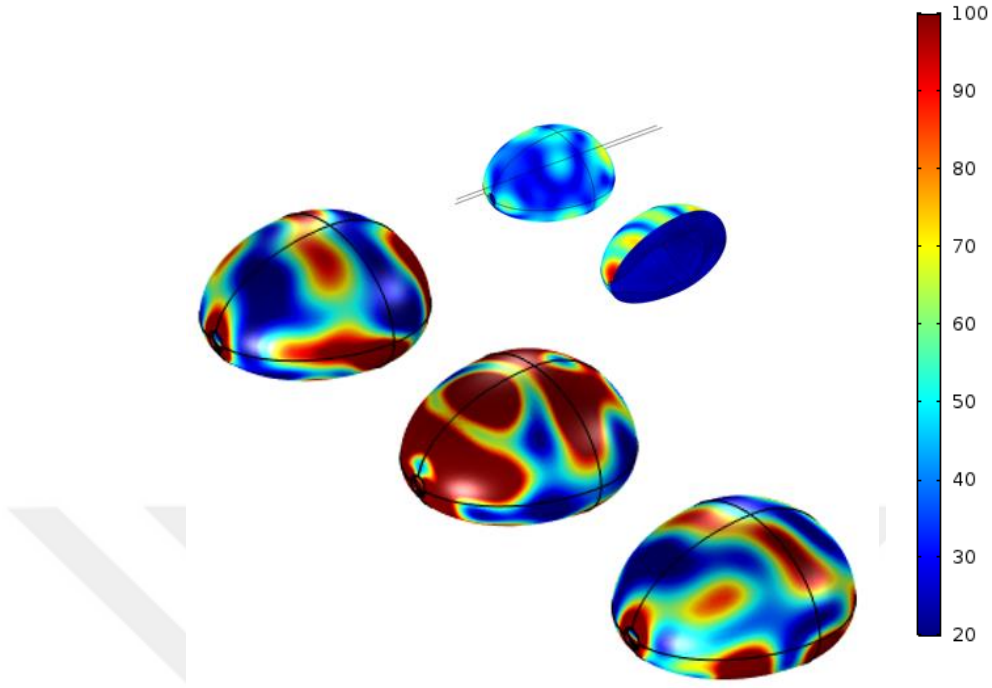


(a)



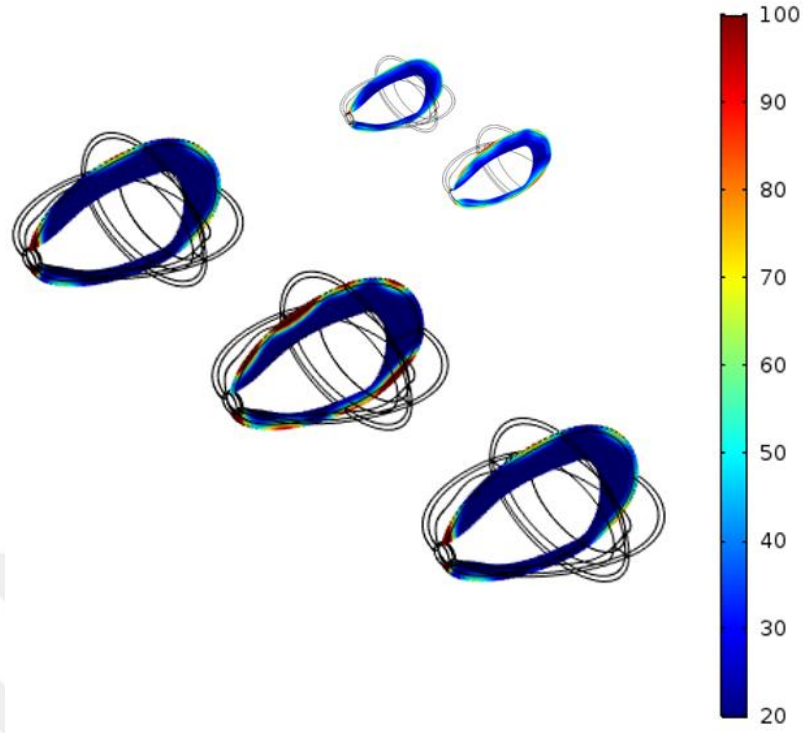
(b)

Şekil 4.31 Dikdörtgensel kavite için oluşturulan modellerde dış katman yüzey ortalama (a) ve hacim ortalama (b) sıcaklıkları



Şekil 4.32 Dikdörtgensel kavitede proses edilen tavuk karkaslarının proses sonu yüzey sıcaklık dağılımı (°C)

Şekil 4.32’de de görüldüğü gibi dikdörtgensel kavite kullanılmasıyla birlikte 240 s proses sonunda kavitenin kenarlarında bulunan ürünlerin yüzey sıcaklıklarında silindirik kaviteye oranla daha tekdüze bir dağılım elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, şekil 4.30’da görülen elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak kavitenin ortasına yerleştirilen tavuk karkasının kenarlarda bulunanlardan daha hızlı ısındığı da saptanmıştır. Bu durumu engellemek amacıyla kavitenin ortasına yerleştirilen tavuk karkası kaldırılıp sadece kenarlarda bulunan 2 ürünün proses edilebileceği veya dalga kılavuzunun konumunun, sistem içindeki elektrik alan dağılımına etkisi gözönüne alınarak, değiştirilmesi ile ürün sıcaklık dağılımının daha tekdüze olması temelinde optimizasyon çalışmaları bu kapsamda planlanabilir.



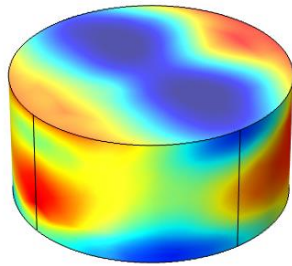
Şekil 4.32 Dikdörtgensel kavitede proses edilen tavuk karkaslarının proses sonu alınan bir kesitte sıcaklık dağılımı (°C)

Dikdörtgensel kavitede proses edilen örneklerde silindirik kavite oluşan belirli bölgelerde aşırı ısınma sorununa çözüm bulunabileceği gözlenmiştir. Yine belirli bir bölgede aşırı ısınma olmasına karşın bu bölgenin yüzey alanının daha küçük olduğu da net olarak gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, istenilen sıcaklık artışları bu sistemde daha daha kısa sürede elde edilmiş ve bu kapsamda proses süresinin kısaltılabileceği belirlenmiştir.

Özetle, dikdörtgensel kavitede geliştirilen modellerde daha tekdüze bir ısınma meydana gelmiştir. Ancak, belirli bölgelerde var olan aşırı ısınmayı engellemek amacıyla farklı proses tasarımlarının planlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, sistemde daha düşük güç seviyesi kullanılarak proses süresinin uzatılması, ürünlere dönme hareketi verilmesi ya da sürekli sistem tasarlanarak ürünlerin bir bant üzerinde ilerlemesi olası tasarım planları olarak düşünülebilir.

Dönme hareketinin sistemdeki sıcaklık dağılımına etkisinin incelenmesi amacıyla Gıda Mühendisliği bölümü - Computational Food Processing (CF π) grubu tarafından dikdörtgensel bir kavite içerisine 4,23 cm çap ve 4 cm yüksekliğe sahip silindirik geometride % 77 su oranında Tylose jeli yerleştirilmiştir. Başlangıç sıcaklığı -18 °C olan jelin mikrodalga sistem içerisinde 90 s prosesi sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Bu amaçla ürüne dönme işlemi uygulanmayan, merkezde dönme işlemi uygulanan ve merkez dışı dönme işlemi uygulanan matematiksel modeller oluşturulmuştur. Proses sonu yüzey sıcaklıkları şekil 4.33'te görülmektedir.

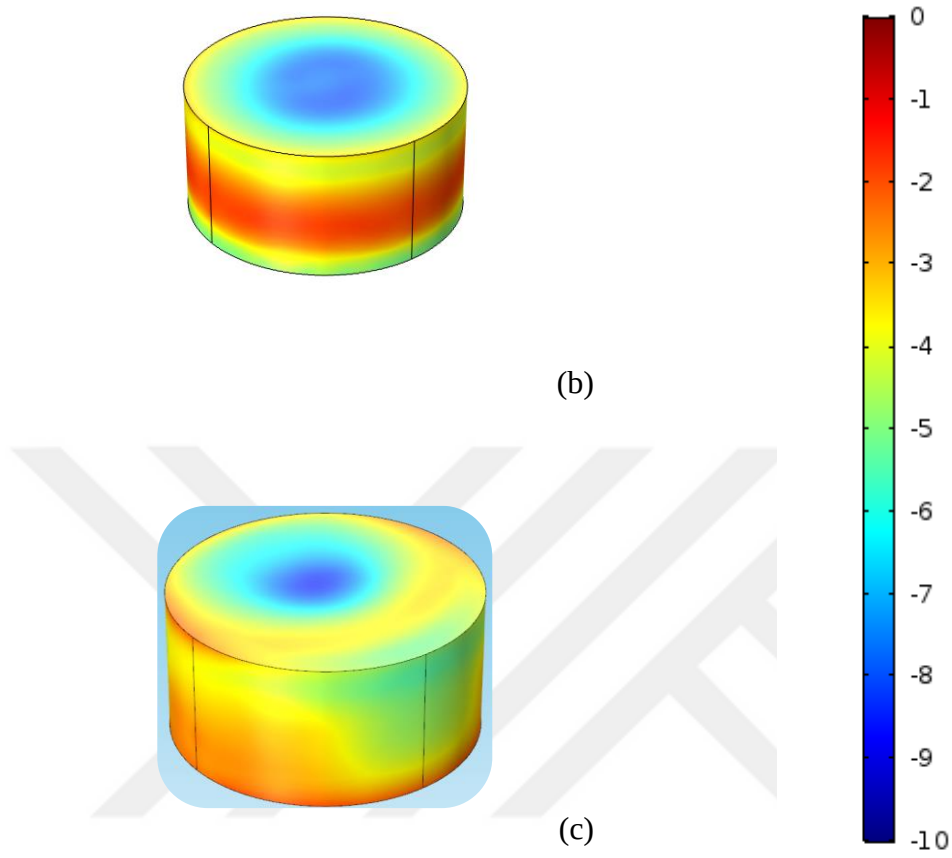
Şekil 4.33'te bu çalışmada uygulanan dönme işleminin ürün sıcaklığına olan etkisi görülmektedir. Dönme işlemi uygulanmayan üründe tekdüze olmayan sıcaklık dağılımı göze çarparken dönme işleminin uygulandığı modellerde daha tekdüze bir ısınma olduğu belirlenmiştir. Özellikle merkez dışı dönme işlemi uygulanması ile ürün farklı elektromanyetik alana maruz kalmış ve en tekdüze ısınma bu işlemin uygulanması ile sağlanmıştır. Buradan da anlaşılabacağı üzere ürünlere dönme işlenmi uygulanarak daha tekdüze ısınma sağlanabilir. Bu uygulamanın tavuk karkasında da etkili olacağı öngörülmekte olup mevcut koşullardaki fiziki yetersizlik nedeniyle daha sonra denemesi planlanmaktadır.



(a)

Şekil 4.33 Dönme hareketinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi (°C)

a. dönme işlemi uygulanmayan, b. merkezde dönme işlemi uygulanan, c. merkez dışında dönme işlemi uygulanan



Şekil 4.33 Dönme hareketinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi (°C) (devam)

a. dönme işlemi uygulanmayan, b. merkezde dönme işlemi uygulanan, c. merkez dışında dönme işlemi uygulanan

Letalite değeri hesaplamaları

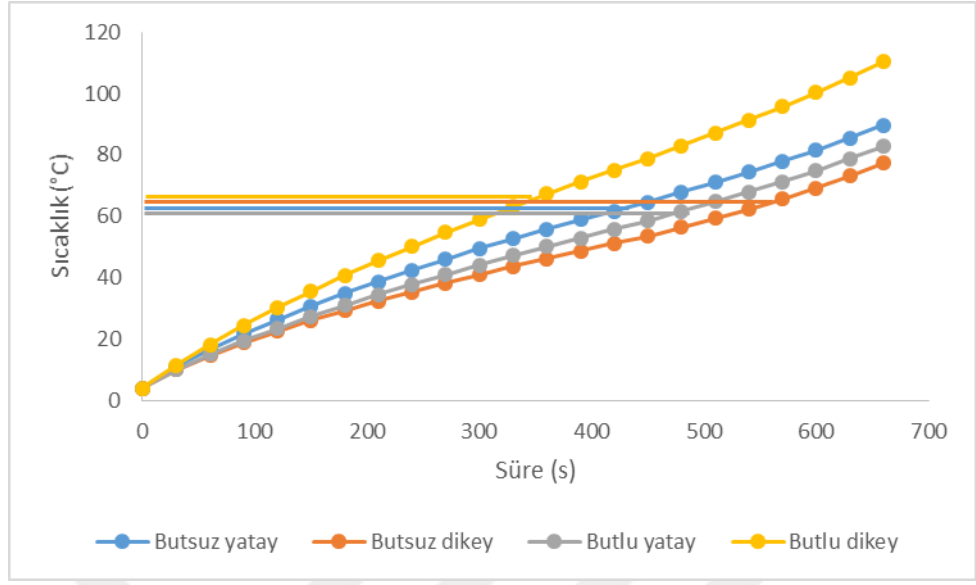
Uygulanan farklı tasarımlarda prosesin etkinliğini belirleyebilmek amacıyla *Campylobacter jejuni* için z- değeri 6,35 °C ve referans sıcaklığı 55 °C (çizelge 2.2) kullanılarak letalite değeri hesaplaması yapılmıştır. Burada dış katmanın yüzey ortalama sıcaklıkları dikkate alınmış ve uygulanan proses süresinde hedef mikroorganizmanın 3 ve 5 logaritmik evre ve daha fazla azalması için gerekli süre belirlenmiştir (çizelge 4.3). Belirtilen çizelgede, hesaplamalarda kullanılan sıcaklık verileri de görülmektedir. Çizelge 4.3'te hesaplanan süreler için modellerden elde edilen sıcaklık verileri

kullanılarak uygulanan proses zamanından uzun daha fazla süre gerektiren prosesler için ekstrapolasyon ile sıcaklık değeri hesaplanmış ve 3 ve 5 logaritmik evre azalmanın gerçekleşmesi için gerekli süre belirlenmiştir.

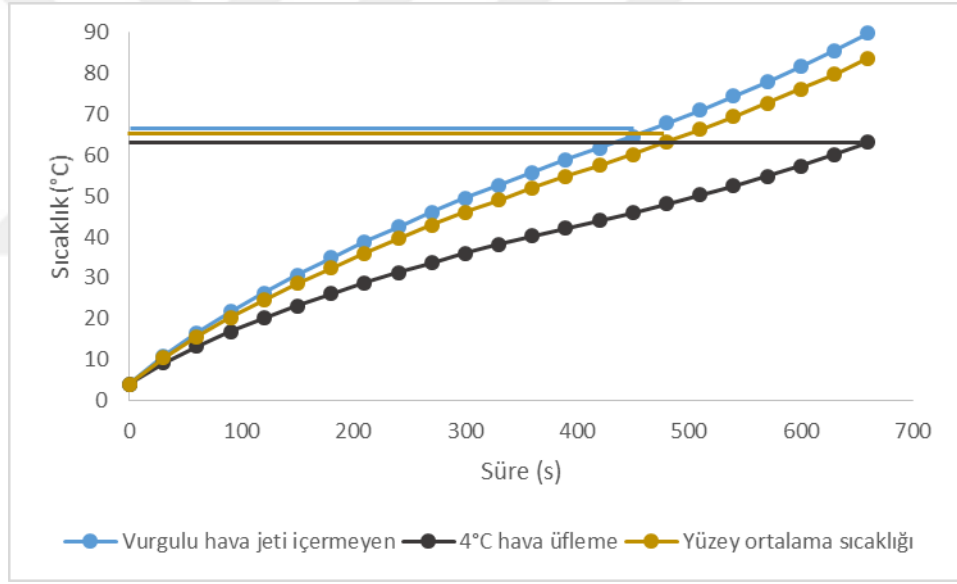
Bu çalışma kapsamında ürünün sistem içerisindeki konumunun sıcaklık profiline önemli bir etkisinin olduğu da ürün yüzeyinde elde edilen mikrobiyal azalma kapsamında tekrar belirlenmiştir. 4 °C hava üflenen modelde lokal ısınmaların önüne geçilmesine rağmen gerekli kontaminasyon değerine ulaşılması için uzun proses sürelerinin gerekliliği göze çarpmaktadır. Fakat ürün yüzey ortalama sıcaklığının üflendiği sistemde ise referans model olan butsuz tavuk geometrisinin sistem içerisine yatay olarak yerleştirildiği model ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. Her iki modelde de lokal ısınmaların önüne geçilememiştir. Buradan 4 °C kadar radikal olmayan fakat yüzey ortalama sıcaklığı gibi de yüksek sıcaklıklara ulaşılmayan daha ılımlı bir sıcaklıkta hava üflemenin daha etkin bir prosese öncülük edebileceği belirlenmiştir. Çizelge 4.3'te de görüldüğü gibi 2450 MHz frekans ile çalışan sistemlerde istenilen mikrobiyal azalmaya daha kısa sürede ulaşılmıştır. Bu da sistemlerin daha etkin olduğunu göstermektedir. Çizelgede verilen ve 5 logaritmik birim azalma için gerekli süreler de her sistemde tavuk karkası dış yüzey sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamaaya ait sıcaklık değişimi ve buna bağlı olarak hesaplanan proses süresi ise şekil 4.34'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 Oluşturulan modellerde 3 ve 5 logaritmik azalma için gerekli süre

Model	Sıcaklık Verisi	Dekontaminasyon Değeri	
		3	5
Butsuz yatay	Şekil 4.13.a	425 s	440 s
Butsuz dikey		540 s	550 s
Butlu yatay		490 s	500 s
Butlu dikey		330 s	340 s
Su akışı ilave edilen sistem	Şekil 4.22.a	315 s	325 s
Dış katmana tavuk derisinin dielektrik özellikleri tanımlandığı	Şekil 4.25.a	530 s	540 s
Dış katmana daldırma uygulanan tavuk derisinin dielektrik özellikleri tanımlandığı		520 s	530 s
4 °C’de hava üflenilen sistem	Şekil 4.16.a	645 s	660 s
915 MHz sistemde ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenilen sistem		470 s	485 s
Silindirik kavite 2450 MHz frekans ile çalışan sistem	Şekil 4.27.a	180 s	190 s
Dikdörtgensel kavite	Şekil 4.31.a	225 s	230 s



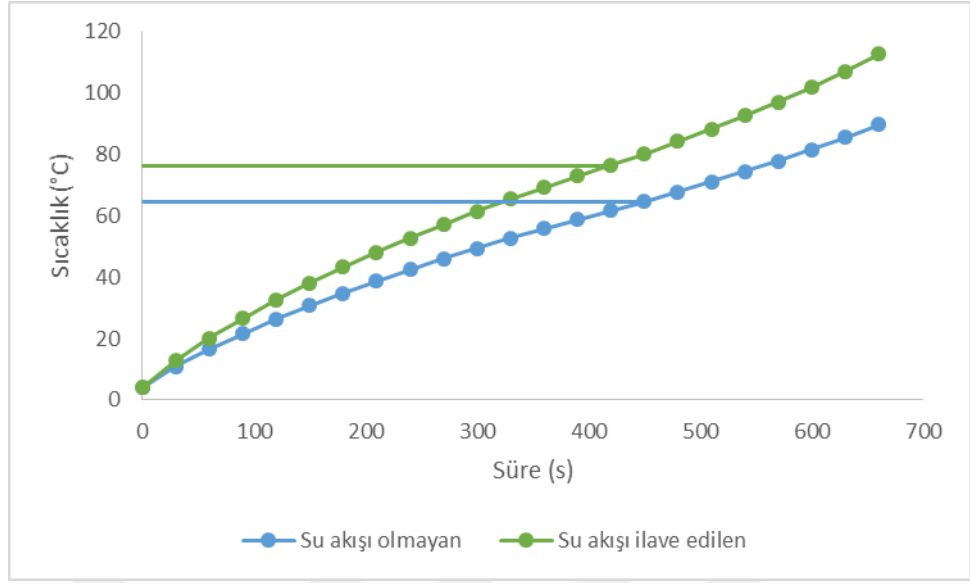
(a)



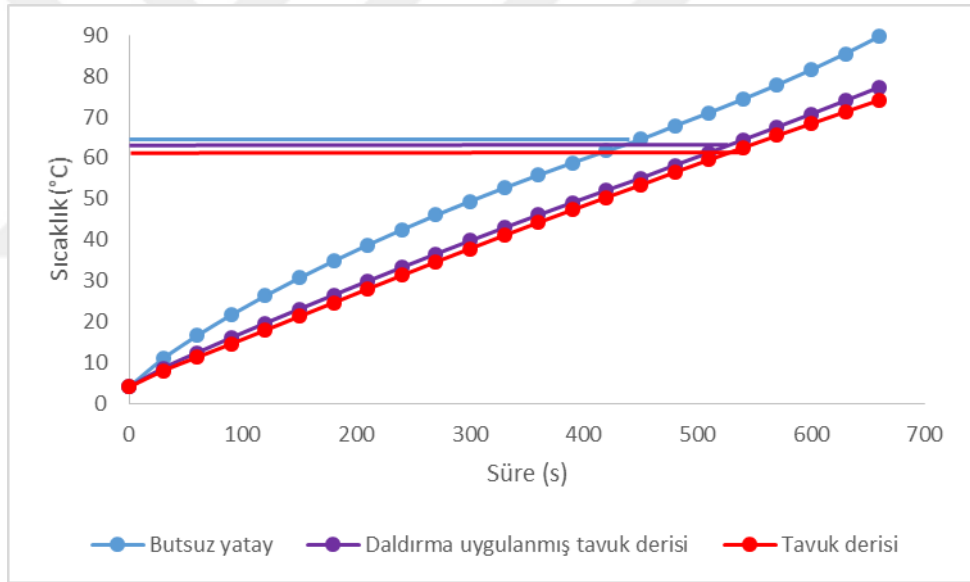
(b)

Şekil 4.34 Mikrobiyal yükte 5 logaritmik evre azalma görülebilmesi için çeşitli sistemlerde proses süresi

a. sistem içerisinde tavuk geometrisinin konumunun ve but geometrisinin etkisinin, b. sisteme ilave edilen vurgulu hava jetinin etkisinin, c. sisteme su akışı eklenmesinin etkisinin, d. NaCl çözeltisi uygulamasının etkisinin incelendiği sistemler ve d. 2450 MHz frekansla çalışan sistemler



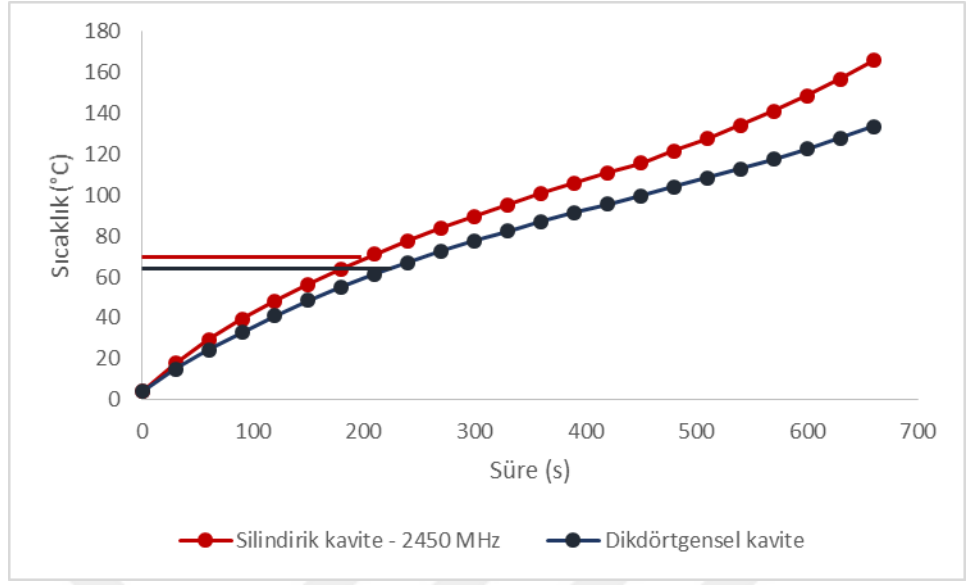
(c)



(d)

Şekil 4.34 Mikrobiyal yükte 5 logaritmik evre azalma görülebilmesi için çeşitli sistemlerde proses süresi (devam)

a. sistem içerisinde tavuk geometrisinin konumunun ve but geometrisinin etkisinin, b. sisteme ilave edilen vurgulu hava jetinin etkisinin, c. sisteme su akışı eklenmesinin etkisinin, d. NaCl çözeltisi uygulamasının etkisinin incelendiği sistemler ve d. 2450 MHz frekansla çalışan sistemler



(e)

Şekil 4.34 Mikrobiyal yükte 5 logaritmik evre azalma görülebilmesi için çeşitli sistemlerde proses süresi (devam)

a. sistem içerisinde tavuk geometrisinin konumunun ve but geometrisinin etkisinin, b. sisteme ilave edilen vurgulu hava jetinin etkisinin, c. sisteme su akışı eklenmesinin etkisinin, d. NaCl çözeltisi uygulamasının etkisinin incelendiği sistemler ve e. 2450 MHz frekansla çalışan sistemler

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında tavuklarda gıda güvenliği problemi teşkil eden *Campylobacter jejuni*'yi ürün yüzeyinden elimine etmek amacıyla mikrodalga (MW) uygulama ile yüzey dekontaminasyon işleminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, matematiksel model geliştirmeye çalışmaları yapılmış, laboratuvar ölçekli bir MW sistem kullanılarak elipsoid – tavuk karkası benzeri bir geometri kullanılarak matematiksel model deneysel doğrulama çalışmaları yapılmış ve ardından bu modeller kullanılarak farklı sistemlerde proses tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında izlenen adımlar ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmektedir:

- Laboratuvar ölçekli sistemde MW ile proses sırasında sistem içi elektrik alan ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi amacıyla matematiksel model çalışmaları COMSOL çoklu fizik programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu modeller deneysel olarak doğrulanmıştır. Deneysel doğrulama çalışmalarında ürün olarak % 2'lik agar kullanılmıştır. Modellerde kullanılmak üzere % 2 agarın sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri ölçülmüştür.
- Deneysel verilerle doğrulanan matematiksel modeller kullanılarak, MW sistemlerde agarın NaCl çözelti katmanı ile kaplanması ve burada kullanılan NaCl çözeltisinin konsantrasyonunun sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Çözeltinin konsantrasyonuna bağlı olarak agarın sıcaklığındaki ve yüzey sıcaklıklarındaki değişimler belirlenmiştir. % 1, 2 ve 4 NaCl çözeltisinin özelliklerinin kullanıldığı simülasyon çalışmalarında agar yüzeyi en yüksek sıcaklığa ulaşmış ve ürün iç kısım hacimsel ortalama sıcaklık artışı sınırlanabilmiştir. En iyi sonuçlar % 4 konsantrasyonda elde edilmesine rağmen, gıdalarda % 4 NaCl çözeltisi kullanmanın olumsuz etkilere yol açabileceği düşünülerek çalışmalara % 2 NaCl çözeltisi ile devam edilmiştir.
- NaCl çözeltisinin gerçek tavuk örneklerine uygulanmasının etkisini incelemek amacıyla % 2 (w/w) NaCl çözeltisi tavuk but örneklerine püskürtme ve daldırma

yapılarak uygulanmıştır. Uygulama sonucunda örneklerdeki tuz konsantrasyonunu belirlemek amacıyla tuz analizi yapılmış ve daldırma işlemi uygulanmış örneklerdeki tuz konsantrasyonunun daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra % 2 NaCl çözeltisi uygulanmış tavuk butlarının deri kısımları alınarak sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Burada tuz konsantrasyonuna bağlı olarak daldırma işlemi uygulanmış örneklerin dielektrik özelliklerinin % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özelliklerine daha yakın olduğu saptanmıştır.

- Tavuk karkas geometrisi kullanılarak geliştirilen modeller silindirik ve dikdörtgensel olmak üzere 2 farklı MW kavite sistem geometrisinde hazırlanmıştır. Silindirik kavitede 915 ve 2450 MHz, dörtgensel geometride ise 2450 MHz frekans değeri kullanılmıştır.
- Tavuk karkas geometrisinin yüzeyinde 0,5 cm kalınlığında % 2 NaCl çözeltisinin dielektrik özelliklerine sahip deri bölgesinin bulunduğu varsayımı ile gerçekleştirilen matematiksel model çalışmaları ile bu katmanın, dielektrik özelliklerindeki değişime bağlı olarak, elektromanyetik alan absorpsiyonunu arttırarak ürün iç yüzeyinin ısınmasını engellediği belirlenmiştir.
- Tavuk karkasının but geometrisini içerip içermemesi durumu ve kavite içerisindeki konumunun elektromanyetik alan ve sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiş ve but içeren örneklerde but geometrisinde aşırı ısınma meydana geldiği gözlenmiştir. Bu amaçla endüstriyel sistemlerde kullanılmak üzere but kısımlarının mikrodalgaları yansıtıcı bir madde ile kaplanması önerilmiş, ancak bu kapsamdaki model çalışmaları gerçekleştirilememiştir.
- Tavuk karkası kavite içerisine yatay ve dikey pozisyonda yerleştirilmiştir. Her 2 konum için de tekdüze olmayan bir ısınma meydana geldiği görülmüş ancak sadece belirli bölgelerde aşırı ısınma olduğu tespit edilmiştir.

- Aşırı ısınmayı engellemek amacıyla sisteme vurgulu hava jeti ve su akışı ilave edilmiştir. Vurgulu hava jeti uygulaması eklenen modellerde hava sıcaklığının etkisini belirleyebilmek amacıyla 4 °C'de ve anlık hesaplanan ürün yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenmiştir. 4 °C hava üflenmesi ile tavuk karkasının bazı bölgelerinde önemli sıcaklık düşüşleri meydana geldiği, yüzey ortalama sıcaklığında hava üflenmesi ile vurgulu hava jeti eklenmemiş modellerden elde edilen sonuçlarda ise önemli bir fark bulunmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra su akışının sağlandığı simülasyon çalışmasında ise bu uygulamanın önemli bir etkisi olmadığı hatta suyun ısınarak ortamı ısıtmaya başladığı ve yine aynı bölgelerde aşırı ısınma olduğu görülmüştür.
- Silindirik kavitede 2450 MHz frekans ile çalışıldığında, sistem içerisinde elektromanyetik dalgaların rezonansına bağlı olarak 915 MHz frekans ile çalışılmasına oranla ürün yüzeyinde daha tekdüze ısınma profili elde edilmiştir. Bunun yanı sıra daha kısa proses süresi sonunda hedef sıcaklığa ulaşıldığı tespit edilmiştir.
- Dörtgensel kavitede hazırlanan modellerde aynı anda daha fazla ürünün proses edilmesi hedeflenmiş ve oluşturulan kavite içerisine 3 adet tavuk karkası yerleştirilmiştir. Bu sistemde kavite geometrisine bağlı olarak diğer sisteme oranla daha tekdüze bir ısınma profili oluşmuştur. Buna ek olarak, tavuk karkaslarına dönme uygulanabileceği düşünülmüş fakat hesaplama gücü yetersizliği nedeni ile bu kapsamda matematiksel model çalışması gerçekleştirilememiştir.
- Modelleme çalışmaları sırasında elde edilen sıcaklık verileri ve *Campylobacter jejuni*'ye ait z değerleri kullanılarak letalite değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlere bakılacak olursa en verimli prosesin 2450 MHz frekans kullanılan sistemlerle sağlandığı göze çarpmaktadır. Benzer şekilde daha tekdüze ısınma da bu modellerde görülmektedir. Buradan hareketle gelecek çalışmalarda 2450 MHz frekans üzerine yoğunlaşılması planlanmaktadır.

Bu tez çalışmasının endüstriyel projelere öncülük etmesi planlanmış olup, çalışmanın endüstriyel olarak daha iyi uygulanabilmesi için MW sistem gücü, üründe daha iyi bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi için verilebilecek fiziksel hareket (dönme veya sürekli prosesler için ilerleme vb.) ve hava jeti uygulaması ile sisteme verilen havanın hızı ve sıcaklığı kapsamında proses tasarım çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte gelecekteki çalışmalarda ürüne farklı yöntemlerle uygulanan tuzlu suya maruz bırakma işleminin ürün yüzeyinde tutunması, son ürünlerdeki tuz miktarı üzerine etkisi ve uygulanan ısıl prosesler de göz önünde bulundurarak tekstür üzerine etkisinin incelenmesi de önemli bir proses parametresi olacaktır.



KAYNAKLAR

- Allos, B. M. 2001. Campylobacter jejuni infections: update on emerging issues and trends. Clin. Infect. Dis. 32:1201–6.
- Alter, T. 2017. Prevention and mitigation strategies for Campylobacter with focus on poultry production. In G. Klein (Ed.), Campylobacter: Features, detection, and prevention of foodborne disease, 111–129, Amsterdam, the Netherlands.
- Altun, S. K., Kalkan, Y., Seyitoğlu, Ş., Küçükale, Ö. F. ve Dinler, U. 2014. Yenidoğan Bir Buzağında Zoonotik Campylobacter jejuni'nin İzolasyonu ve İdentifikasyonu. Harran Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 3(2), 98-100.
- Anonim. 2012.
[https://www.fsis.usda.gov/shared/PDF/Campylobacter Questions and Answers.pdf](https://www.fsis.usda.gov/shared/PDF/Campylobacter_Questions_and_Answers.pdf). Erişim Tarihi: 29.11.2020.
- Anonim. 2020a.
https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/77842/mod_resource/content/0/Besiyerleri%20ve%20hareket%20muayenesi.pdf. Erişim Tarihi: 11.11.2020.
- Anonim. 2020b.
http://www.besd-bir.org/assets/documents/TR_KiAi_BaA_Kanatli_eti_tyketimi-dynyAtyryldy_1.pdf. Erişim Tarihi: 08.07.2020.
- 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(8), 932-944.
- Blankenship, L.C. ve Craven, S.E. 1982. Campylobacter jejuni Survival in Chicken Meat as a Function of Temperature. Applied and Environmental Microbiology, 44: 88-92.
- Carrillo, C.L., Atterbury, R. J., El-Shibiny, A., Connerton, P. L., Dillon, E., Scott, A., ve Connerton, I. F. 2005. Bacteriophage therapy to reduce Campylobacter jejuni colonization of broiler chickens. Applied Environmental Microbiology, 71(11), 6554–6563.
- CDC. 2017. Surveillance for Foodborne Disease Outbreaks United States, 2017: Annual Report, 6.
- CDC. 2019a. <https://www.cdc.gov/campylobacter/prevention.html>. Erişim Tarihi: 29.11.2020.
- CDC. 2019b. <https://www.cdc.gov/campylobacter/outbreaks/outbreaks.html>. Erişim Tarihi: 08.07.2020.

- Chaine, A., Arnaud, E., Kondjoyan, A., Collignan, A., ve Sarter, S. 2013. Effect of steam and lactic acid treatments on the survival of *Salmonella Enteritidis* and *Campylobacter jejuni* inoculated on chicken skin. *International journal of food microbiology*, 162(3), 276-282.
- Chintoan-Uta, C., Cassady-Cain, R. L., ve Stevens, M. P. 2016. Evaluation of flagellum-related proteins FliD and FspA as subunit vaccines against *Campylobacter jejuni* colonisation in chickens. *Vaccine*, 34(15), 1739–1743.
- Choi, Y. and M.R. Okos. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of food. *Food engineering and process applications*, 1, 93-101.
- Cooper, N. 2009. Microwave ovens. *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens*, 105-128.
- Çakmak, Ö. ve Erol, İ. 2010. *Campylobacter jejuni*'nin Gıda Güvenliği ve Halk Sağlığı Yönünden Önemi. *TAF Prev Med Bull*, 9: 157-166.
- Darka, Ö. ve Yılmaz, Y. A. 2004. Piliç eti ve campylobacteriosis. *Hacettepe Tıp Dergisi*, 35: 100-102.
- Dirks, B. P., Dobrynin, D., Fridman, G., Mukhin, Y., Fridman, A., ve Quinlan, J. J. 2012. Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*. *Journal of food protection*, 75(1), 22-28.
- Erdoğan, F., Uyar, R., ve Palazoğlu, T. K. 2010. Experimental comparison of natural convection and conduction heat transfer. *Journal of Food Process Engineering*, 33, 85-100.
- Erkmen, O. 2010. Gıda kaynaklı tehlikeler ve güvenli gıda üretimi. *Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi*, 53(3), 220-235.
- Federighi, M. 2017. How to Control *Campylobacter* in Poultry Farms. An overview of the main strategies. In M. Manafi (Ed.), *Poultry science*, 115–132, London, UK.
- Frei, W. 2013. <https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/>. Erişim Tarihi: 13.11.2020.
- Friedman, C.R., Neimann, J., Wegener, H.C. ve Tauxe, R.V. 2000. Epidemiology of *Campylobacter jejuni* infections in the United States and other industrialized nations. In: Nachamkin I, Blaser MJ, editors. *Campylobacter*. 2nd ed. Washington, D.C.: American Society for Microbiology Press, 121–38.
- Georgiev, M., Beauvais, W. ve Guitian, J. 2016. Effect of enhanced biosecurity and selected on-farm factors on *Campylobacter* colonization of chicken broilers. *Epidemiology & Infection*, 145(3), 553–567.

- Georgsson, F., Thornorkelsson, A. E., Geirsdottir, M., Reiersen, J. ve Stern, N. J. 2006. The influence of freezing and duration of storage on *Campylobacter* and indicator bacteria in broiler carcasses. *Food Microbiology*, 23(7), 677–683.
- Gillespie, I. A., O'Brien, S. J., Frost, J. A., Adak, G. K., Horby, P., Swan, A. V., Painter, M.J., Neal, K.R. ve *Campylobacter* Sentinel Surveillance System Collaborators. 2002. A case-case comparison of *Campylobacter coli* and *Campylobacter jejuni* infection: a tool for generating hypotheses. *Emerging infectious diseases*, 8(9), 937.
- Göksoy, E. O., James, C. ve Corry, J. E. L. 2000. The effect of short-time microwave exposures on inoculated pathogens on chicken and the shelf-life of uninoculated chicken meat. *Journal of Food Engineering*, 45(3), 153-160.
- Grant, A., Hashem, F., ve Parveen, S. 2016. *Salmonella* and *Campylobacter*: antimicrobial resistance and bacteriophage control in poultry. *Food Microbiology*, 53, 104–109.
- Henry, S. G., Darwish, S. M., Saleh, A. ve Khalifa, A. 2019. Carcass Characteristics and Nutritional Composition of Some Edible Chicken By-products. *Egyptian Journal of Food Science*, 47(1), 81-90.
- Huezo, R., Northcutt, J. K., Smith, D. P., Fletcher, D. L. ve Ingram, K. D. 2007. Effect of dry air or immersion chilling on recovery of bacteria from broiler carcasses. *Journal of Food Protection*, 70(8), 1829 – 1834.
- Ingmer, H. 2011. Challenges of *Campylobacter jejuni* in poultry production. *International Journal of Food Microbiology*, 145, 110.
- Jackson, D. N., Davis, B., Tirado, S. M., Duggal, M., van Frankenhuyzen, J. K., Deaville, D., Wijesinghe, M.A.K., Tessaro, M. ve Trevors, J.T. 2009. Survival mechanisms and culturability of *Campylobacter jejuni* under stress conditions. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 96(4), 377-394.
- Kassem, A., Meade, J., McGill, K., Walsh, C., Gibbons, J., Lyng, J. ve Whyte, P. 2018. An investigation of high intensity ultrasonication and chemical immersion treatments on *Campylobacter jejuni* and spoilage bacteria in chicken. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 298-305.
- Keener, K. M., Bashor, M. P., Curtis, P. A., Sheldon, B. W. ve Kathariou, S. 2004. Comprehensive review of *Campylobacter* and poultry processing. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 3(2), 105-116.
- Kobierecka, P. A., Wszyńska, A. K., Gubernator, J., Kuczkowski, M., Wiśniewski, O., Maruszewska, M., Wojtania, A., Derlatka, K.E., Adamska, I., Godlewska, R. ve Jagusztyn-Krynicka, E. K. 2016. Chicken anti-*Campylobacter* vaccine -

- Comparison of various carriers and routes of immunization. *Frontiers in Microbiology*, 7.
- Konak, Ü.İ., Certel, M. ve Helhel, S. 2009. Gıda Sanayisinde Mikrodalga Uygulamaları. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(3) 20-31.
- Marra, F., Zhang, L. ve Lyng, J.G. 2009. Radio frequency treatment of foods: review of recent advances. *Journal of Food Engineering*, 91, 497-508.
- Mekonnen, S.A. 2018. Endüstriyel amaçlı bir mikrodalga fırının tasarım optimizasyon adımlarının belirlenmesi ve analizi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 19.
- Mello, P.A., Barin, J.S. ve Guarnieri, R.A. 2014. Chapter 2 - Microwave Heating. *Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Analysis*, 59-75.
- Metcalf, J. H., Donoghue, A. M., Venkitanarayanan, K., Reyes-Herrera, I., Aguiar, V. F., Blore, P. J. ve Donoghue, D. J. 2011. Water administration of the medium-chain fatty acid caprylic acid produced variable efficacy against enteric *Campylobacter* colonization in broilers. *Poultry Science*, 90(2), 494–497.
- Monroy, A.D.G., Kataria, T.K., Cervantes, J.L.O., Chavez, A.L., Ozuna, C., Hernandez, G.R. ve Morales, M.E.S. 2018. Dielectric Properties of Beverages (Tamarind and Green) Relevant to Microwave-Assisted Pasteurization. *Journal of Food Science*.
- Moore, J.E., Corcoran, D., Dooley, J.S., Fanning, S., Lucey, B., Matsude, M., McDowell, D.A., Megraud, F., Millar, B.C., O'Mahony, R., O'Riordan, L., O'Rourke, M., Rao, J.R., Rooney, P.J., Sails, A. ve Whyte, P. 2005. *Campylobacter*. *Veterinary Research*, 36(3), 351-382.
- Nelson, S. O., Trabelsi, S. ve Zhuang, H. 2007. Dielectric spectroscopy of fresh chicken breast meat. In 2007 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Ngadi, M. O. ve Ikediala, J. N. 1998. Heat transfer properties of chicken-drum muscle. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78(1), 12-18.
- Nguyen, H. T., Corry, J. E., & Miles, C. A. 2006. Heat resistance and mechanism of heat inactivation in thermophilic *campylobacters*. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(1), 908-913.
- Omrak, H. 2020. <http://www.turktarim.gov.tr/Haber/401/turkiyede-kanatli-sektoru-her-yil-yuzde-8-buyuyor>. Erişim tarihi: 12.07.2020.

- Özdemir, H., Gücükoğlu, A. ve Koluman, A. 2006. Acidified sodium chlorite, trisodium phosphate and populations of *Campylobacter jejuni* on chicken breast skin. *Journal of food processing and preservation*, 30(5), 608-615.
- Özkaya, F. D. Ve Cömert, M. 2008. Gıda zehirlenmelerinde etken faktörler. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 65(3), 149-158.
- Park, H., Hung, Y. C. ve Brackett, R. E. 2002. Antimicrobial effect of electrolyzed water for inactivating *Campylobacter jejuni* during poultry washing. *International journal of food microbiology*, 72(1-2), 77-83.
- Pereira, T. E. D. J., Ströher, G. R., Turbiani, F. R. B. ve Nicoleti, J. F. 2013. Propriedades termofísicas da carne branca de frango: efeito da temperatura e do conteúdo de umidade. *Brazilian Journal of Food Technology*, 16(4), 278-284.
- Sakkaf, A.A. ve Jones, G. 2012. Thermal Inactivation of *Campylobacter jejuni* in Broth. *Journal of Food Protection*, 75: 1029–1035.
- Sarang, S., Sastry, S. K., ve Knipe, L. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 351-356.
- Silva, J., Leite, D., Fernandes, M., Mena, C., Gibbs, P. A. ve Teixeira, P. 2011. *Campylobacter* spp. as a foodborne pathogen: a review. *Frontiers in microbiology*, 2, 200.
- Sipahioglu, O., Barringer, S. A. ve Bircan, C. 2003. The dielectric properties of meats as a function of temperature and composition. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 38(3), 161-169.
- Skoufos, I., Tzora, A., Giannenas, I., Bonos, E., Tsinas, A., McCartney, E., Lester, H., Christaki, E., Florou-Paneri, P., Mahdavi, J. ve Soultanas, P. 2019. Evaluation of in-field efficacy of dietary ferric tyrosine on performance, intestinal health and meat quality of broiler chickens exposed to natural *Campylobacter jejuni* challenge. *Livestock Science*, 221, 44–51.
- Stern, N.J., Svetoch, E.A., Eruslanov, B.V., Kovalev, Y.N., Volodina, L.I., Perelygin, V.V., Mitsevich, E.V., Mitsevich, I.P. ve Levchuk, V.P. 2005. Paenibacillus polymyxa Purified Bacteriocin To Control *Campylobacter jejuni* in Chicken. *Journal of Food Protection*, 68(7), 1450–1453.
- Stern NJ ve Kazmi SU. 1989. *Campylobacter jejuni*. In: Doyle MP, editor. Food-borne bacterial pathogens. New York: Marcel Dekker Inc., 71–110.
- Tam, C. C., O'brien, S. J., Adak, G. K., Meakins, S. M. ve Frost, J. A. 2003. *Campylobacter coli*—an important foodborne pathogen. *Journal of Infection*, 47(1), 28-32.

- Teotia, J. S. ve Miller, B. F. 1975. Destruction of salmonellae on poultry meat with lysozyme, EDTA, X-ray, microwave and chlorine. *Poultry science*, 54(5), 1388-1394.
- Thames, H. ve Sukumaran, A. 2020. A Review of Salmonella and Campylobacter in Broiler Meat: Emerging Challenges and Food Safety Measures. *Foods*, 9(6), 776.
- Umaraw, P., Prajapati, A., Verma, A. K., Pathak, V. ve Singh, V. P. 2017. Control of campylobacter in poultry industry from farm to poultry processing unit: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(4), 659-665.
- Whyte, P., McGill, K. ve Collins, J. D. 2003. An assessment of steam pasteurization and hot water immersion treatments for the microbiological decontamination of broiler carcasses. *Food Microbiology*, 20(1), 111–117.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ezgi SON
Doğum Yeri : Altındağ / ANKARA
Doğum Tarihi : 11/04/1995
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Abdullah Mürşide Özünenek Anadolu Lisesi (2013)
Lisans : Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü (2018)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği
Anabilim Dalı (Eylül 2018 - Ocak 2021)