

RADYO FREKANS YÖNTEMİ İLE ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

RAHMİ UYAR

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GIDA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**Danışman
Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU**

**MERSİN
ARALIK – 2014**

Rahmi UYAR tarafından Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU danışmanlığında hazırlanan "Radyo Frekans Yöntemi İle Çözdürme İşleminin Matematiksel Modellenmesi" başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

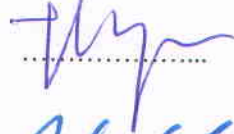
Prof. Dr. H. İbrahim EKİZ

İmza


Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU



Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU



Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTI



Yrd. Doç. Dr. Özge ŞAKIYAN DEMİRKOL



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 16./12./2014 tarih ve 2014.28/879 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü


Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

RADYO FREKANS YÖNTEMİ İLE ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Rahmi UYAR

ÖZ

Dondurma prosesi gıda endüstrisinde, gıda ürünlerinin raf ömürlerinin artırılması ve kalitelerinin muhafaza edilebilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Dondurulmuş ürünlerin tüketilebilmesi veya bir proseste kullanılabilmesi amacıyla sıcaklıklarının donma noktasının üzerinde bir sıcaklığa çıkartılarak çözdürülmesi gerekmektedir. Endüstriyel anlamda, en yaygın olarak kullanılan çözdürme sistemleri konveksiyonla ısı transferi temelinde çalışan sistemlerdir. Yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemlerde prosesin uzun sürmesi ve kalite kayıplarının ekonomik anlamda işletme maliyetlerini etkilemesi nedeniyle bu sistemlerin yerini alacak hızlı ve güvenli bir çözdürme metoduna ihtiyaç duyulmaktadır.

Dielektrik ısıtma yöntemlerinden birisi olan radyo frekans (RF) uygulaması, mikrodalga uygulamaya göre penetrasyon derinliğinin fazla olması ve ürün içerisinde hacimsel ısı enerjisi oluşturma özelliği ile, konvansiyonel sistemlere göre uygulama potansiyeli yüksek olan bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Literatürde, farklı geleneksel sistemler ve mikrodalga uygulamaları kapsamında çözdürme işleminin matematiksel modellenmesi konusunda çok sayıda çalışma bulunurken, RF çözdürme işleminin modellenmesi konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu temelde, bu çalışmanın amacı RF çözdürme işlemi sırasında ürün içi sıcaklık dağılımının ve RF sistem içerisinde meydana gelen elektriksel alan dağılımının belirlenmesi amacıyla bir matematiksel modelin geliştirilmesi ve bu modelin farklı RF sistemlerde elde edilen deneysel veriler kullanılarak doğrulanmasıdır.

Bu kapsamda, RF çözdürme işleminin modellenmesi amacıyla COMSOL (Comsol V. 3.5 ve V. 4.4, Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik programı kullanılarak bir çözdürme modeli geliştirilmiş, bu model kapsamında ağ bağımsızlık çalışmaları yapılmış ve model sonuçları 50 Ω 'luk RF sistemler ile serbest salımlı RF sistem geometrilerinde deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Belirtilen içeriği ile, bu çalışmanın, gıda endüstrisinde kullanılabilecek RF çözdürme sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu açısından önemli bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Radyo frekans, Çözdürme, Matematiksel modelleme.

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU, Ankara Üniversitesi, Gıda Müh. Ana Bilim Dalı

MATHEMATICAL MODELLING OF RADIO FREQUENCY THAWING

Rahmi UYAR

ABSTRACT

Freezing processes in food industry are applied to increase shelf-life of food products and preserve their quality during storage time and transport. Frozen food commodities, on the other hand, must be thawed at a certain temperature above their freezing point for consumption and further processing. Industrially used traditional thawing systems are based on the principle of convection heat transfer, and due to the longer thawing times experienced in these processes and quality losses, a faster and economically feasible thawing process is required.

In this concept, radio-frequency (RF) application, a dielectric heating methodology, is accepted to have a certain potential compared to traditional systems with its longer penetration depth and ability to form volumetric heat generation inside the food products during processing. In the literature, there have been various mathematical modeling studies for traditional thawing systems and microwave processes while modeling studies about the application of RF thawing systems were not encountered. Therefore, the objective of this study was to develop a mathematical model to determine temperature distribution inside a frozen food product during thawing and electric field distribution inside the RF system and to validate this model with experimental data obtained from various RF systems.

Based on this concept, an RF thawing model was developed using the COMSOL (Comsol V. 3.5 ve V. 4.4, Comsol AB, Stockholm, Sweden) multi-physics program, mesh independency studies were carried out, and the model was validated using the experimental data for 50 Ω and free running oscillator RF systems. With the given concept, this study was assumed to be significant for design and optimization of industrial RF thawing systems.

Key Words: Radio frequency, Thawing , Mathematical Modelling

Advisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU, Department of Food Engineering, University of Ankara

TEŞEKKÜR

Öncelikle bana tezimin her aşamasında yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya ve tez komitesindeki değerli hocalarıma teşekkür ederim.

İtalya'da bana tez konumda yardımcı olan Dr. Francesco Marra'ya teşekkür ederim.

Ayrıca bölümdeki değerli hocalarımla ve araştırma görevlisi arkadaşlarımla yardımlarından dolayı teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	5
2.1. GIDALARDA DONDURMA VE ÇÖZDÜRME.....	5
2.2. GIDALARDA GELENEKSEL ÇÖZDÜRME YÖNTEMLERİ.....	6
2.2.1. Akışkan Ortam Olarak Havanın Kullanıldığı Sistemler.....	6
2.2.2. Akışkan Ortam Olarak Suyun Kullanıldığı Sistemler.....	8
2.2.3. Doğrudan Temas Yöntemi ile Çözdürme.....	9
2.3. GIDALARIN ÇÖZDÜRÜLMESİNDE PROBLEMLER.....	10
2.3.1. Mikrobiyal Gelişim.....	10
2.3.2. Sızma Kayıpları.....	11
2.4. GIDALARDA YENİLİKÇİ ÇÖZDÜRME YÖNTEMLERİ.....	12
2.4.1. Buhar Uygulaması ile Çözdürme.....	12
2.4.2. Ohmik Isıtma ile Çözdürme.....	13
2.4.3. Akustik Çözdürme.....	14
2.4.4. Yüksek Basınç Altında Çözdürme.....	15
2.4.5. Kızılötesi Çözdürme.....	16
2.4.6. Dielektrik Çözdürme.....	17

2.5. DİELEKTRİK SİSTEMLERDE (MİKRODALGA VE RADYO FREKANS) ISITMA MEKANİZMASI.....	19
2.5.1. Radyo Frekans (RF) Isıtma Mekanizması.....	20
2.5.1.2. İyonik polarizasyon.....	21
2.5.2. Radyo Frekans (RF) Isıtmayı Etkileyen Faktörler.....	21
2.5.2.1. Dielektrik özellikler.....	21
2.5.2.2. Radyo frekans (RF) ısıtmada penetrasyon derinliği.....	22
2.5.3. Radyo Frekans (RF) Sistemler.....	24
2.5.3.1. Serbest salınımlı radyo frekans (RF) sistemler.....	24
2.5.3.2. 50 Ω radyo frekans (RF) sistemler.....	25
2.6. RADYO FREKANSI (RF) UYGULAMANIN GIDA PROSESLERİNDE KULLANIMI.....	25
2.6.1. Kurutma.....	25
2.6.2. Pastörizasyon ve Sterilizasyon.....	26
2.6.3. Tarım Ürünlerinin Hasat Sonrası Zararlı Kontrolünde.....	28
2.6.4. Çözdürme.....	29
2.6.5. Diğer Çalışmalar.....	31
2.7. RADYO FREKANS (RF) ISITMANIN MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	32
2.8. RADYO FREKANS (RF) UYGULAMADA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER.....	36
2.8.1. Elektrik Ark oluşumları.....	36
2.8.2. Yerel Isınma Problemleri.....	37
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1. FAZ DEĞİŞİMİNİ İÇERMEYEN 2-BOYUTLU AKSİ-SİMETRİK YAKLAŞIMLA YAPILAN MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	38
3.1.1. Matematiksel Model.....	40
3.1.2. Temel Denklikler.....	40
3.1.3. Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	42
3.1.4. Termofiziksel ve Dielektrik Özellikler.....	43

3.2. FAZ DEĞİŞİMİNİ İÇEREN 3 BOYUTLU MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	44
3.2.1. Matematiksel Model.....	44
3.2.2. Temel denklemler.....	44
3.2.3. Başlangıç ve sınır koşulları.....	46
3.2.4. Termofiziksel ve dielektrik özellikler.....	46
3.2.5. Faz Değişiminin Modellenmesi.....	50
3.3. SERBEST SALINIMLI RF SİSTEMDE ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN MODELLENMESİ.....	53
3.4. MODELLEME KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALARLA BİR BAKIŞ.....	55
3.4.1. Voltaj Belirleme Simülasyonları.....	56
3.4.2. Ağ Bağımsızlık Çalışmaları.....	56
3.4.3. Serbest Salımlı RF sisteminin Geometrisinin Basitleştirilerek Yapılan Simülasyon Çalışmaları.....	57
3.5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	58
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	62
4.1. FAZ DEĞİŞİMİ OLMAYAN KOŞULLARDA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BELİRLENMESİ.....	62
4.2. RF SİSTEMLERDE ÜRÜN BOYUTLARININ ÜRÜN SICAKLIK DAĞILIMINA VE GÜÇ VERİMLİLİĞİNE OLAN ETKİSİ.....	65
4.3. FAZ DEĞİŞİMİ İÇEREN 3 BOYUTLU MODELLEME ÇALIŞMASININ SONUÇLARI.....	69
4.4. SERBEST SALINIMLI RF SİSTEMDE ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN MODELLENMESİ.....	75
4.4.1. Ağ Bağımsızlık çalışmaları.....	75
4.4.2. Deneylerde Kullanılan Radyo Frekans Sistem Üst Elektrot Voltaj Değerinin Belirlenmesi.....	81
4.4.3. Bütün ve Basitleştirilmiş Sistem İçin En Yoğun (Extreme Fine) Ağ Yapısı Kullanılarak Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	82

4.5. SERBEST SALINIMLI SİSTEM İÇİN GELİŞTİRİLEN MODEL SONUÇLARININ DENEYSEL VERİLERLE DOĞRULANMASI.....	87
4.6. RADYO FREKANS ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN GELENEKSEL ÇÖZDÜRME YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	90
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	92
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	106



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Peyniraltı suyu jelinin çeşitli frekanslardaki penetrasyon derinliği.....	23
Çizelge 3.1. Modelleme çalışmasında kullanılan termofiziksel ve dielektrik özellikler	43
Çizelge 3.2. Modellemede kullanılan etin yüzde bileşenleri.....	47
Çizelge 3.3. Gıda bileşenlerinin sıcaklığa bağlı özgül ısı denklilikleri	47
Çizelge 3.4. Faz değişimini de içeren 3-boyutlu modelleme alışmalarında kullanılan termofiziksel ve dielektrik özellikler	48
Çizelge 4.1. Farklı boyutlardaki ürünlerin sabit elektrot uzaklığında RF sistemindeki (78.56 mm) hacimleri.....	66
Çizelge 4.2. Simülasyonlarda kullanılan tam boyutlu ve basitleştirilmiş sistemlerde kullanılan eleman sayıları.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Hava üflelemeli tünel çözdürme sisteminin şematik çizimi.....	7
Şekil 2.2. Tipik bir suya daldırma yöntemi le yapılan yağın çözdürme sistemi	9
Şekil 2.3. Gıdalarda geleneksel çözdürme işleminde merkez noktasında , köşelerde ve ortalama tipik sıcaklık-zaman değişimi.....	11
Şekil 2.4. Ohmik ısıtmanın çalışma prensibi.....	13
Şekil 2.5. Kızılötesi dalgalarının ait olduğu bölge.....	16
Şekil 2.6. Mikrodalga (a) ve RF (b) ısıtma sistemlerinin şematik görünüm.....	19
Şekil 2.7. Bir matematiksel modelin hazırlanma aşamaları.....	33
Şekil 3.1. Radyo frekansı sistem içerisinde (a) elektrotlar arasına yerleştirilmiş örnek; (b) bu sistem için hazırlanan 2 boyutlu aksi-simetrik geometrik model.....	39
Şekil 3.2. Farag vd. (2008) tarafından kullanılan deneysel kurulum ve sistemin şematik görünümü (uzaklıklar cm olarak verilmiştir).....	45
Şekil 3.3. Simülasyonlarda kullanılan sıcaklığa bağlı . (a) ısı iletim katsayısı; (b) dielektrik sabiti değeri; (c) dielektrik kayıp faktörü değeri	49
Şekil 3.4. Görünür özgül ısı kapasitesi (a) dar bir aralıkta gerçekleşen faz değişimi (b) geniş bir aralıkta gerçekleşen bir faz değişimi.....	51
Şekil 3.5. Sıcaklığın fonksiyonu olarak kullanılan görünür özgül ısı kapasitesi değeri.....	52
Şekil 3.6. (a) Modelleme çalışmalarında kullanılan serbest salımlı radyo frekans sistemi (2 kW - 27.12 MHz); (b) bu sistemin şematik gösterimi (uzaklıklar cm olarak verilmiştir).....	54
Şekil 3.7. Deneysel çalışmaların yapıldığı serbest salımlı radyo frekans sistemin (a) bütün olarak hazırlanan geometrik modeli; (b) basitleştirilmiş geometrik modeli.....	57

Şekil 3.8.	Polipropilen bir kutu içerisine yerleştirilerek dondurulmuş örnek ve içerisine yerleştirilmiş fiber-optik problemler.....	59
Şekil 3.9.	Dondurulmuş et örneği içerisine yerleştirilen fiber optik problemlerin geometrik yerleri ve et örnekleri boyutları (a) blok A; (b) blok B.....	60
Şekil 4.1.	Şekil 4.1. (a) Radyo frekans ısıtma sırasında örnek sıcaklık dağılımı; (a) 300 saniye (b) 600 saniye (c) 900 saniye.....	63
Şekil 4.2.	Literatürden alınan radyo frekans uygulama sırasında elde edilen sıcaklık verilerine göre 900 s uygulaması sonrası elde edilen sıcaklık dağılımı.....	64
Şekil 4.3.	Radyo frekans uygulamada ürünün farklı konfigürasyonlardaki gösterimi.....	66
Şekil 4.4.	Radyo frekans proses sırasında ürün boyutunun ürün içi ortalama sıcaklık değişimine etkisi.....	68
Şekil 4.5.	(a) Radyo frekans proses sırasında ürün boyutunun güç verimliliği değişimine etkisi; (b) dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimi.....	69
Şekil 4.6.	a) Literatürden alınan verilerle Comsol yazılımında oluşturulan model; (b) Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.7.	Radyo frekans uygulama sırasında elde edilen (a) elektriksel potansiyel; (b)elektriksel alan dağılımı.....	71
Şekil 4.8.	Radyofrekans çözdürme simülasyonunda et örneğinde (a) 300 s; (b) 600 s; (c) 3000 s proses süresi sonunda elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı.....	72
Şekil 4.9.	Radyofrekans çözdürme simülasyonunda et örneğinde (a) 300 s;(b) 600 s; (c) 3000 s proses süresi sonunda elde edilen ürün içi güç emilim dağılımı.....	74
Şekil 4.10.	Simülasyonlarda kullanılan radyo frekans sistemi geometrisi.....	77
Şekil 4.11.	Simülasyonlarda kullanılan basitleştirilmiş radyo frekans sistem geometrisi.....	76

Şekil 4.12. Bütün sistemde farklı ağ yoğunluğuna göre yapılan simülasyon sonuçlarına göre (a) ürün merkez sıcaklık; (b) ürün ortalama sıcaklık; (c) ürün tarafından absorbe edilen ortalama güç miktarı değişimi.....	78
Şekil 4.13. . Basitleştirilmiş sistemde farklı ağ yoğunluğuna göre yapılan simülasyon sonuçlarına göre (a) ürün merkez sıcaklık; (b) ürün ortalama sıcaklık; (c) ürün tarafından absorbe edilen ortalama güç miktarı değişimi.....	79
Şekil 4.14. Radyo frekans çözdürme çalışmasında farklı voltaj değerleri kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	81
Şekil 4.15. Deneylerde kullanılan radyo frekans sisteminin (a) bütün geometrisi; (b) basitleştirilmiş geometrisi kullanılarak yapılan simülasyonlarda elde edilen elektriksel alan dağılımı.....	82
Şekil 4.16. RF ısıtma sisteminin tüm olarak ve basitleştirilmiş geometrilerinin en yoğun (extreme fine) ağ yapısı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları (a) ürün geometrik merkez sıcaklık değişimi; (b) ürün ortalama sıcaklık değişimi; (c) ürünün absorbe ettiği ortalama güç değişimi (d) ürünün sıcaklık değerlerine bağlı olarak değişen kayıp tanjant değerleri	84
Şekil 4.17. RF ısıtma sisteminin tüm olarak ve basitleştirilmiş geometrileri kullanılarak yapılan simülasyonlarda elde edilen (a)ürün geometrik merkez sıcaklık; (b) ürün ortalama sıcaklık değişimi; (c) ürünün absorbe ettiği ortalama güç değişiminin karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.18. 2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan serbest salımlı radyo frekans sisteminde elde edilen deney sonuçları ve model sonuçlarının (a) 1. probun bulunduğu konum için karşılaştırılması (blok-A - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 12 cm); (b) 2. probun olduğu konum için karşılaştırılması (blok-A - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 12 cm).....	88
Şekil 4.19. 2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan serbest salımlı radyo frekans sisteminde elde edilen deney sonuçları ve model sonuçlarının (a) 1. probun bulunduğu konum için karşılaştırılması (blok-B - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 13 cm); (b) 2. probun bulunduğu konum için karşılaştırılması (blok-B - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 13 cm).....	89

Şekil 4.20. Geleneksel çözdürme işlemi ile iki farklı probdan elde edilen sıcaklık değişimi.....	91
Şekil 4.21. Radyo frekans (2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan serbest salımlı radyo frekans sisteminde - elektrotlar arası uzaklık 12 cm)çözdürme işlemi ile 2 farklı probdan elde edilen sıcaklık değişimi.....	91



SİMGELER

c	Işığın vakumdaki hızı	$m s^{-1}$
c_p	Özgül ısı	$J kg^{-1} K^{-1}$
c_{pfro}	Donmuş örneğin özgül ısısı	$J kg^{-1} K^{-1}$
c_{punfr}	Örneğin donma sıcaklığının üzerindeki özgül ısısı	$J kg^{-1} K^{-1}$
d_p	Penetrasyon derinliği	m
dT	Faz değişimi sıcaklık aralığı	K
E	Elektriksel alan	Vm^{-1}
f	Frekans	Hz
H	Entalpi	J/kg
k	Isıl iletim katsayısı	$Wm^{-1}K^{-1}$
L_m	Gizli ısı	$kJkg^{-1}$
P	Güç	W
Q_{abs}	Güç yoğunluğu	$W m^{-3}$
R	Direnç	Ω
t	Zaman	s
T	Sıcaklık	K
T_{m1}	Erimenin başladığı sıcaklık	K
T_{m2}	Erimenin bittiği sıcaklık	K
T_{air}	Ortam sıcaklığı	K
T_0	Başlangıç sıcaklığı	K
$\tan\delta$	Dielektrik kayıp tanjantı	-
V	Elektriksel potansiyel	V
X_i	Bileşen yüzde oranı	-
α	Termal difüzyivite (Isıl yayılım katsayısı)	$m^2 s^{-1}$
δ	Dielektrik kayıp açısı	rad
ϵ_0	Serbest uzay geçirgenlik sabiti	$F m^{-1}$
ϵ	Geçirgenlik	-
ϵ'	Dielektrik sabit	$F m^{-1}$
ϵ''	Dielektrik kayıp faktörü	$F m^{-1}$
μ'	Relatif geçirgenlik	-
ρ	Yoğunluk	$kg m^{-3}$
ρ_{fro}	Ürünün donma sıcaklığı altındaki yoğunluğu	$kg m^{-3}$
ρ_{unfr}	Ürünün donma sıcaklığı üstündeki yoğunluğu	$kg m^{-3}$
$\nabla \cdot$	Diverjans operatörü	m^{-1}

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisinde dondurma işlemi, gıda ürünlerinde bulunan serbest suyun buza çevrilerek mikroorganizmalar ve enzimlerce kullanımının sınırlandırılması ve düşük sıcaklıkta mikroorganizma gelişiminin yavaşlatılarak, uzun süreli muhafaza amacıyla kullanılmaktadır. Dondurma işleminin uygulandığı sıcaklık aralığında mikroorganizma gelişimi minimize edilirken, kimyasal ve metabolik reaksiyonların hızı düşmekte böylece gıda ürünlerinin raf ömürleri depolama ve taşıma sürecinde uzatılabilmektedir [Delgado ve Sun, 2008]. Dondurulmuş ürünlerin tüketilebilmesi veya bir proseste kullanılabilmesi amacıyla sıcaklıklarının donma noktası sıcaklığı üzerinde bir sıcaklığa çıkartılarak çözdürülmesi gerekmektedir. Çözdürme işlemi sırasında ürün kalitesinde ortaya çıkacak problemlerin ve mikrobiyal gelişimin minimal düzeyde tutulabilmesi için bu işlemin mümkün olduğu kadar hızlı yapılması ve ürün sıcaklığının riskli olarak kabul edilen 4 °C'nin üzerine çıkmaması proses güvenliği açısından önemli kriterlerdir. Ayrıca çözdürme işlemi sırasında, sızma kayıplarının (drip loss) kontrol altında tutulması ekonomik gerekçeler ve ürün kalitesi kapsamında öncemli proses kontrol parametreleridir. Çözdürme işlemi dışında, ürün sıcaklığının donma noktası ya da donma noktası sıcaklığına yakın bir noktaya getirilen ürünler faz değişimi geçiş bölgesi tamamlanmadan da takip eden proses işlemlerine alınabilmektedir. Temperleme olarak adlandırılan bu işlem özellikle donmuş et ve balıkların, konserve prosesi için boyut küçültülmesi aşamasından önce kullanılmaktadır. Bu kapsamda, sıcaklığı halen donma noktası sıcaklığında olan ürün, tamamen çözünmüş olan ürüne göre daha rahat işlenebilmekte ve boyut küçültme işlemi sırasında ürün sıcaklığının yükselerek kalite kaybı, mikrobiyal gelişim ve enzimatik aktivite artışına sebep veren durumlar engellenebilmektedir.

Endüstriyel anlamda, en yaygın olarak kullanılan sistemler, konveksiyonla ısı transferi temelinde çalışan ve akışkan ortam olarak havanın kullanıldığı sistemlerdir. Bu tasarımların yaygın olarak kullanılmasının sebebi nispeten düşük işletim giderleri ve yatırım maliyetleridir. Bu sistemlerde çözdürme işlemi sırasında kondüksiyon ile gerçekleşen ısı transfer mekanizmasından dolayı, ürün dış yüzeyi iç

kısmına göre daha hızlı çözünürken; iç kısmına göre ısı iletim katsayısı daha düşük olan (1.5 W/m-K'den 0.5 W/m-K'e) bir katmanla çevrilmekte ve buna bağlı olarak ısı transfer hızı da yavaşlamaktadır. Çözünme süresinin artmasıyla üründe, meydana gelen mikrobiyal bozulma ve/veya enzimatik aktivite artışı ile ortaya çıkan kalite kayıpları konvansiyonel sistemlerin önemli bir dezavantajı olarak görülmektedir. Bu sistemlerde, sızma kayıpları da fazla olmakta ve bu durum ekonomik anlamda problemlere yol açmaktadır. Sıcaklık kontrollü hava sistemleri dışında, çözdürme işlemi için suyun kullanıldığı sistemler de bulunmaktadır [Hoke vd., 2002]. Akışkan ortam olarak suyun kullanıldığı sistemlerde, çözdürme süresi ısı transfer katsayısında sağlanan artışa bağlı olarak kısalsa da (mikrobiyal kontaminasyonun engellenmesi amacıyla) akışkan ortamın kısa aralıklarla yenilenmesi gerekmekte, bu da proses ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemlerde prosesin uzun sürmesi ve sızma kayıplarının ekonomik anlamda işletme maliyetlerini etkilemesi nedeniyle bu sistemlerin yerini alacak hızlı bir çözdürme metoduna ihtiyaç duyulmaktadır [Farag vd., 2011]. Bu kapsamda, ürün yüzeyine vakum altında buhar uygulaması, yüksek basınç proses uygulamaları, ohmik ısıtma ve infrared sistemlerin kullanımı, akustik uygulamalar ve mikrodalga, radyo frekans gibi elektromanyetik uygulamalar son yıllarda öne çıkan çözdürme yöntemleri olarak göze çarpmaktadır.

Dielektrik ısıtma olarak da adlandırılabilen radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) uygulamaları, çözdürme prosesi olarak, konvansiyonel sistemlere göre, endüstriyel proseslerde uygulama potansiyeli olan yöntemler olarak kabul edilmektedir. Dielektrik ısıtma sırasında, ısı gıdanın içerisinde dipol dönme ve iyonik depolarizasyon mekanizması etkisiyle oluşmaktadır. Bunun sonucunda ürün içerisinde, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, hacimsel ve homojen olarak kabul edilebilecek bir ısı dağılımına bağlı olarak homojen bir sıcaklık profili elde etme potansiyeli sağlanmaktadır [Farag vd., 2008]. Elektromanyetik spektrumda RF bölge 1-300 MHz, MW bölge ise 300-3000 MHz frekansı arasında tanımlanmaktadır. RF uygulamalarda, endüstriyel proseslerde kullanılan frekans aralığı 10-50 MHz aralığında belirlenmiştir. Bu frekans aralığında, bilimsel, endüstriyel ve tıbbi amaçlarla kullanılmasına izin verilen frekanslar 13.56 ± 0.00678 ,

27.12 ± 0.16272 ve 40.68 ± 0.02034 MHz'dir [Marra vd., 2009]. MW uygulamalarda ise 915 MHz endüstriyel uygulamalar için, 2450 MHz frekans ise ev tipi MW sistemlerde kullanılmaktadır. Dielektrik uygulamalarda ısınma elektromanyetik alanın gıda ürünü içerisindeki dipolar ve iyonik moleküllerle etkileşimi ile ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerde, elektrik alanın etkisiyle dipol rotasyon ve iyonik unsurların hareketi sonucu oluşan sürtünmeyle gıda ürününün içerisinde ısı enerjisi oluşmaktadır. Genel olarak iyonik depolarizasyon, düşük frekanslı RF bölgesinde dominant ısınma mekanizması olarak kabul edilmektedir [Tang, 2005]. MW uygulamada dalga boyunun, RF bölgeye göre daha kısa olmasından dolayı penetrasyon derinliğinin az olması nedeniyle ortaya çıkan sınırlamalar radyo frekansı bölgesinde geçerli değildir [Marra vd., 2007]. Dalga boyunun kısa olmasının yanı sıra MW frekansının da yüksek olması nedeniyle, MW ile proses edilen ürünlerde, ürünün sistem içerisindeki konumuna ve proses süresine bağlı olarak, aşırı ısınmış ya da yanmış bölgelerin oluşması RF ile proses edilen ürünlere göre daha belirgin olarak gözlenmektedir. RF uygulama, dalga boyuna bağlı olarak, MW uygulama ile karşılaştırıldığında, ürün içerisinde daha derine nüfuz edebilme düşük frekanslarda gerçekleşmekte ve bu kapsamda ürün sıcaklık değişimi kontrolü daha kolay olmaktadır. Yani, RF uygulamasının düşük frekanslarda gerçekleşmesine bağlı olarak, ürün içerisinde oluşan ısı enerjisinin daha düşük seviyelerde olmasından dolayı, proses edilen ürünlerde MW sistemlere göre aşırı ısınmış bölgelerin oluşması daha sınırlı olmakta, daha fazla nüfuz derinliğine sahip olması sayesinde de hem ürün içerisinde hacimsel ısınma daha homojen olarak gerçekleşmekte hem de büyük boyuttaki gıda ürünlerine uygulanabilme potansiyelinin daha fazla olduğu belirtilmektedir. Ayrıca çözdürme işlemi hızlı gerçekleştirildiği için ürünün renk, besin değeri ve duyu kalitesi daha iyi korunabilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi, özellikle geleneksel yöntemlerle yapılan çözdürme prosesinde ürünün çözülmeye başlayan bölgelerinde ısıl iletim katsayısı düşerken bu bölge ürün içerisine göre yalıtım özelliği göstermeye başlamakta ve işlem süresi de kondüksiyonla ısı transferine bağlı olarak uzamaktadır. RF ya da MW uygulamada ürün içerisinde ısı enerjisi oluşumu hacimsel olarak gerçekleştiği için bu dezavantaj da ortadan kalkmaktadır. RF ısıtma sistemlerinin tasarımında kullanılan elektromanyetik dalga üretim jeneratörüne bağlı olarak iki farklı sistem

kullanılmaktadır: 50 Ω 'luk RF sistemler ve serbest salımlı RF sistemler. 50 Ω 'luk RF sistemlerde frekans ve güç kontrolü daha etkin olarak uygulanabilmekte ve sistem içerisinde bulunan paralel elektrotlar arasında sabit bir voltaj farkı proses süresince sağlanabilmektedir. Başlangıç maliyetleri kapsamında, endüstriyel olarak kullanımı daha çok tercih edilen serbest salımlı RF sistemler de elektrotlar arası voltaj farkı proses süresince sistem içi akımına, elektrotlar arası uzaklığa ve sistem içerisinde bulunan ürün boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Ancak, proses verimi kapsamında, düşük maliyetleri ve esnek kullanımlarından dolayı bu sistemler halen en çok tercih edilen RF sistemlerdir [Rowley, 2001]. Etkin bir RF çözdürme sisteminin tasarımında deneysel olarak yapılan çalışmalarda, çözdürme işlemi için optimum şartlarının belirlenmesi uzun zaman almakta ve maliyeti arttırmaktadır. Çözdürme sırasında ürün sıcaklık dağılımının ve sistem içi elektromanyetik dalga dağılımının geliştirilecek olan bir matematiksel model yardımı ile belirlenmesi ile tasarım ve optimizasyon çalışmaları (örneğin plakaların arasındaki uzaklığın belirlenmesi, uygulanan güç miktarı, proses zamanı, elektrotlar arasında yerleştirilmesi gereken ürün boyutları - miktarı v.b.) daha etkin olarak yapılabilecek ve proses kontrol için gerekli değişkenler kolaylıkla elde edilebilecektir [Hoke vd., 2002]. Bu nedenle geliştirilecek olan bir matematiksel model, sistem tasarımı ve çözdürme işlemi için gerekli optimum şartların belirlenmesinde kullanılabilir.

Literatürde, geleneksel sistemler ve MW sistemler kullanılarak çözdürme işleminin modellenmesi konusunda farklı çalışmalar bulunurken, RF çözdürme işleminin modellenmesi konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı:

- öncelikle RF çözdürme işlemi sırasında ürün içi sıcaklık dağılımının ve RF sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik dalga dağılımının belirlenmesi amacıyla bir matematiksel modelin geliştirilmesi,
- bu model kapsamında farklı RF sistem geometrileri kullanılarak (50 Ω 'luk RF sistemler ile geleneksel serbest salımlı RF sistemler) ağ bağımsızlık çalışmaları yapılması ve
- bu sistemlerden elde edilen deneysel verilerin kullanılarak geliştirilmiş olan matematiksel modellerin doğrulanması olarak belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. GIDALARDA DONDURMA VE ÇÖZDÜRME

Dondurma prosesi gıda endüstrisinde yaygın olarak uygulanan bir koruma yöntemidir. Uzun süreli depolama metotları içerisinde, gıda ürünlerinin besin değeri ve duyu özelliklerinin korunması göz önünde bulundurulduğunda konserve işleme ve kurutmaya göre belirli avantajları olan bir yöntem olarak da kabul edilebilmektedir [Fennema, 1977]. Dondurma işlemi sonucunda, ürüne uygulanan -10°C 'den daha düşük sıcaklıklarda, mikroorganizma ve enzimlerin ürünün yapısında bulunan serbest suyu kullanımları kısıtlandığından kimyasal, mikrobiyal ve enzimatik reaksiyonlar büyük oranda azalmakta böylece ürün kalite parametreleri uzun süre depolama işleminde korunurken ürün raf ömrünün de artması sağlanmaktadır [Delgado ve Sun, 2008].

Dondurma ürünü hariç dondurulmuş gıdaların, tüketilebilmesi veya dondurma işlemini izleyen proseslerde kullanılabilmesi amacıyla çözdürülmeleri gerekmektedir. Örneğin dondurulmuş et ve balıklara bir sonraki proses aşamasında kullanılabilmesi için (örneğin konserve prosesinde kullanılabilmesi amacıyla) çözdürme işleminin uygulanması gerekmektedir. Bu işlem, bazen sadece ürün sıcaklığının donma noktası ya da donma noktasına yakın bir sıcaklığa çıkartılarak ürünün işlenmeye daha elverişli hale getirilmesiyle yapılabilmekte (tempering) bazen de ürün sıcaklığının donma sıcaklığının üstüne çıkartılması yoluyla uygulanmaktadır [Pham, 2012].

Farklı sıcaklıklardaki donmuş gıda ürünlerinde buz ve donmamış su oranı değişmektedir. Donmuş üründe buz miktarının serbest suya oranı düştükçe mekanik özellikleri de değişmekte; ürün daha yumuşak ve gevrek bir yapıya kavuşmakta böylelikle de daha kolay işlenebilir bir hale gelmektedir [James ve James, 2002]. Et endüstrisinde genellikle dondurulmuş etlerin kıyma haline getirilmesi, dilimleme ve bölme işlemi gibi yeniden boyut küçültme işlemlerinden önce temperleme işlemi uygulanırken [Farag vd., 2008] konserve balık endüstrisinde ürünün ısıl işlem öncesi

konservelere yerleştirilme işleminin kolaylaşması amacıyla da temperleme işlemine başvurulmaktadır. Bu şekilde, tam olarak çözdürülmeden kullanılan ürünlerin boyut küçültme işlemi sırasında sıcaklıklarının fazla yükselmesi engellenerek ürün kalitesinin korunması da sağlanabilmektedir.

Çözdürme ya da temperleme işleminin dondurma işleminden daha uzun sürmesi sebebiyle mikrobiyal gelişim ve kalitenin korunumu açısından güvenli olarak gerçekleştirilmesi ise dondurma işlemine göre daha zor olmaktadır. Özellikle geleneksel yöntemler (*akışkan olarak hava kullanılan sistemler, akışkan olarak suyun kullanıldığı su içine daldırma prensibi ile çalışan sistemler*) kullanılarak uygulanan çözdürme-temperleme işlemlerinde ürünün yüzeyden çözünmeye başlaması ve bu bölgenin ısı iletim katsayısı düşerken (yaklaşık 1.5 W/m-K değerinden 0.6 W/m-K aralığına) yalıtım özelliği göstermeye başlaması nedeni ile işlem süresi uzamaktadır. Çözdürme işlemi sırasında, ürün yüzeyinin, çözdürme işleminde kullanılan ortam sıcaklığının yüksek olması nedeniyle, karşılaşılan yüksek sıcaklık ve nemden dolayı, mikroorganizma gelişimine de uygun hale gelerek tehlike oluşturması çok sık rastlanan bir durum olarak göze çarpmaktadır.

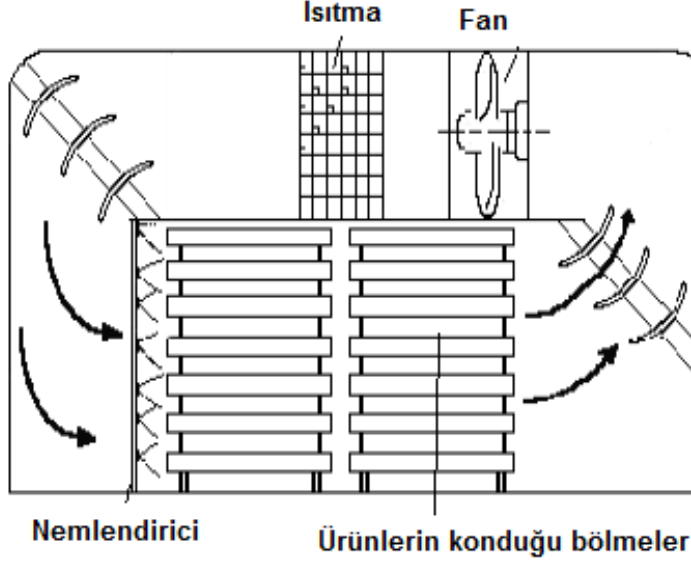
Bu nedenle, gıda endüstrisinde, dondurulmuş ürünlerin çözdürülmeleri amacıyla uygulanan geleneksel yöntemlerin yanısıra son yıllarda farklı yenilikçi yöntemler de (ohmik ısıtma, kızıl ötesi uygulama, akustik yöntemler, yüksek basınç uygulaması ve dielektrik ısıtma yöntemleri) kullanılmaya başlanmıştır.

2.2. GIDALARDA GELENEKSEL ÇÖZDÜRME YÖNTEMLERİ

2.2.1. Akışkan Ortam Olarak Havanın Kullanıldığı Sistemler

Gıda endüstrisinde en yaygın şekilde kullanılan metot akışkan olarak havanın kullanıldığı sistemlerde yapılan çözdürme işlemidir ve Şekil 2.1'de endüstride kullanılan hava ile çözdürme sistemlerinin şematik bir çizimi gösterilmektedir. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasının nedeni düşük maliyet

ve işletme bedelidir. Bunun yanında çözdürme işlemi daha önce de belirtildiği gibi uzun sürmektedir [Hoke vd., 2002].



Şekil 2.1. Hava üflemeli tünel çözdürme sisteminin şematik çizimi [Haugland, 2002].

Akışkan ortam olarak havanın kullanıldığı sistemlerde yapılan çözdürme işleminde özellikle zorlamalı bir hava dönüşümü ya da vurgulu hava jetlerinin kullanımı söz konusu değilse uygulanan hava hızının düşük olmasına bağlı olarak ortam ısı transfer katsayısı da oldukça düşük olmaktadır ($<10-20 \text{ W/m}^2\text{-K}$). Bu nedenle, ürün yüzeyinde oluşan düşük ısı transfer katsayısı sonucu ürüne uygulanan ısı transfer hızı da düşük olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca, ürün yüzeyinde çözülmeye başlayan bölgenin ürün içerisindeki halen donma sıcaklığında bulunan bölgeye göre daha düşük ısı iletim katsayısına da sahip olması (yaklaşık 1.5 W/m-K değerinden $<0.6 \text{ W/m-K}$ aralığına) ürün yüzeyinde yalıtkan olarak tanımlanabilecek bir bölge oluşumuna sebep vermektedir. Proses süresi ilerledikçe ürün iç yüzeylerine doğru hareket eden çözülmüş bölge, düşük ısı iletim katsayısına bağlı olarak, ısı transfer hızını düşürmekte ve bu da çözdürme süresinin uzamasına sebep olmaktadır.

Endüstriyel çözdürme işlemlerinde kullanılan hava sıcaklığının $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den daha yüksek olduğu durumlarda ise ürün yüzeyinde mikrobiyal gelişme yaşanabildiği gibi, ürün sızma kayıpları (drip losses) artarak hem kalite hem de ekonomik anlamda

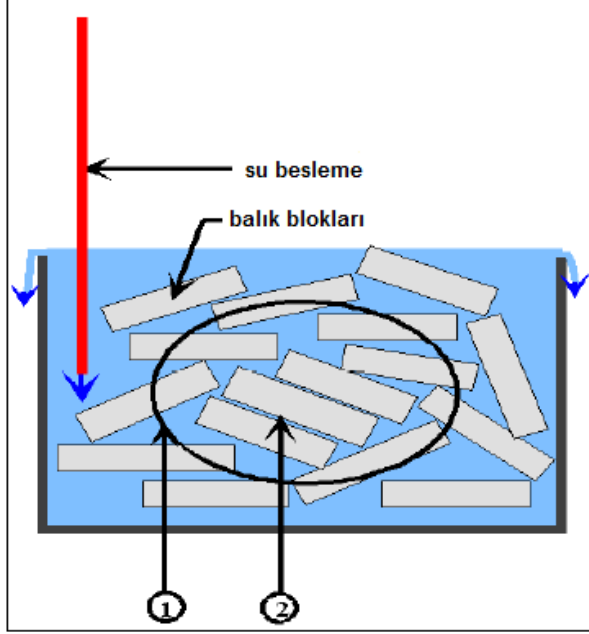
uygun olmayan koşullar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, hem düşük hava hızına bağlı olarak elde edilen düşük ısı transfer katsayısı hem de düşük hava sıcaklığının uygulama zorunluluğu çözünme zamanının uzamasına neden olmaktadır.

Bu kapsamda, mikrobiyal gelişme problemlerinin azaltılması ve çözdürme işleminin hızlandırılması amacıyla iki aşamalı bir çözdürme işleminin kullanıldığı durumlar da mevcuttur. Bu sistemlerde, ilk aşamada yüksek sıcaklıkta (örneğin 20 °C) ve daha hızlı bir hava akışı kullanarak ürüne ısı girişinin artırılması sağlandıktan sonra düşük bir sıcaklıkta (<5 °C) çözdürme işlemine devam edilebilmektedir [Pham, 2012].

2.2.2. Akışkan Ortam Olarak Suyun Kullanıldığı Sistemler

Akışkan ortam olarak suyun kullanıldığı çözdürme sistemlerinde, hava kullanılan sistemlere göre daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilebildiğinden çözdürme işlemi daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, çözünme ortamından ürüne zaman içerisinde olacak kontaminasyonun engellenmesi amacıyla akışkan ortamın sürekli yenilenme gerekliliği proses ekonomisini olumsuz etkileyebileceği gibi ürünün su ile direkt teması da farklı kalite kaybı problemlerine yol açabilmektedir [Pham, 2012]. Dondurulmuş deniz ürünlerinin çözdürülmesinde bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin, yukarıda belirtilen, proses kapsamında ortaya çıkan dezavantajları yanında kullanımını sınırlayan başka parametreler de bulunmaktadır. Örneğin, üründe çözdürme işlemi sırasında meydana gelen suda çözünen protein kayıpları hem ürün kalitesini hem de proses ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca çözdürme işlemi için fazla miktarda su kullanımının gerekmesi, atık suyun çevre problemlerine yol açması ve atık suyun arıtılması gerekliliği de bu yöntemin tercih edilmesinde önemli kriterler arasındadır [Roberts vd., 1998]. Şekil 2.2'de tipik bir suya daldırma ile balıkların yığın olarak çözdürülme işlemi şematik olarak gösterilmektedir. 1 nolu bölgenin su ile teması 2 nolu bölgedekinden daha fazla olacağı için 2 nolu bölgede ki balık örnekleri daha geç çözünmesi ve buna bağlı olarak 1 nolu bölgedeki blokların suda daha fazla kalması

gibi sorunlar da çözdürme işleminde akışkan ortam olarak suyun kullanıldığı sistemlerde gözlenen problemlerdendir [Haugland, 2002].



Şekil 2.2. Tipik bir suya daldırma yöntemi ile yapılan yığın çözdürme sistemi [Haugland, 2002]

2.2.3. Doğrudan Temas Yöntemi ile Çözdürme

Bu yöntemde, özellikle paketlenmiş ve düzlemsel geometriye sahip olan dondurulmuş ürünler, iki metal plaka arasında konarak, sıcaklıkları ürün donma noktasının üzerinde olan bu plakalara doğrudan temas ettirilerek çözdürme işlemi yapılmaktadır. Çözdürme işlemi sırasında metal plakaların sıcaklığının sabit tutulabilmesi amacıyla, gerekli sıcaklıktaki bir akışkan plakalar içerisinde geçirmektedir. Bu kapsamda yeni geliştirilen sistemlerde elektrik akımı kullanılarak da daha kontrollü bir ısıtma sağlanabilmektedir. Sistem maliyetinin yüksek olması ve sadece paketlenmiş düzlemsel geometriye sahip ürünlere uygulanabilmesi nedeniyle bu yöntemin çözdürme amacıyla kullanımı sınırlıdır [Pham, 2012].

Dondurulmuş gıda ürünlerinin geleneksel yöntemlerle çözdürülmesi sırasında karşılaşılan problemler mikrobiyal gelişim, enzimatik aktivite, ürünün çözdürme işlemi sırasında kontaminasyonu, üründe oluşan sızma kayıpları, ürün görünümünde ve duyuşal – kalite parametrelerinde meydana gelen olumsuz değişimler (*renk değişiklikleri, besin değeri ve tekstürel özelliklerde meydana gelen değişimler*) olarak sıralanabilir.

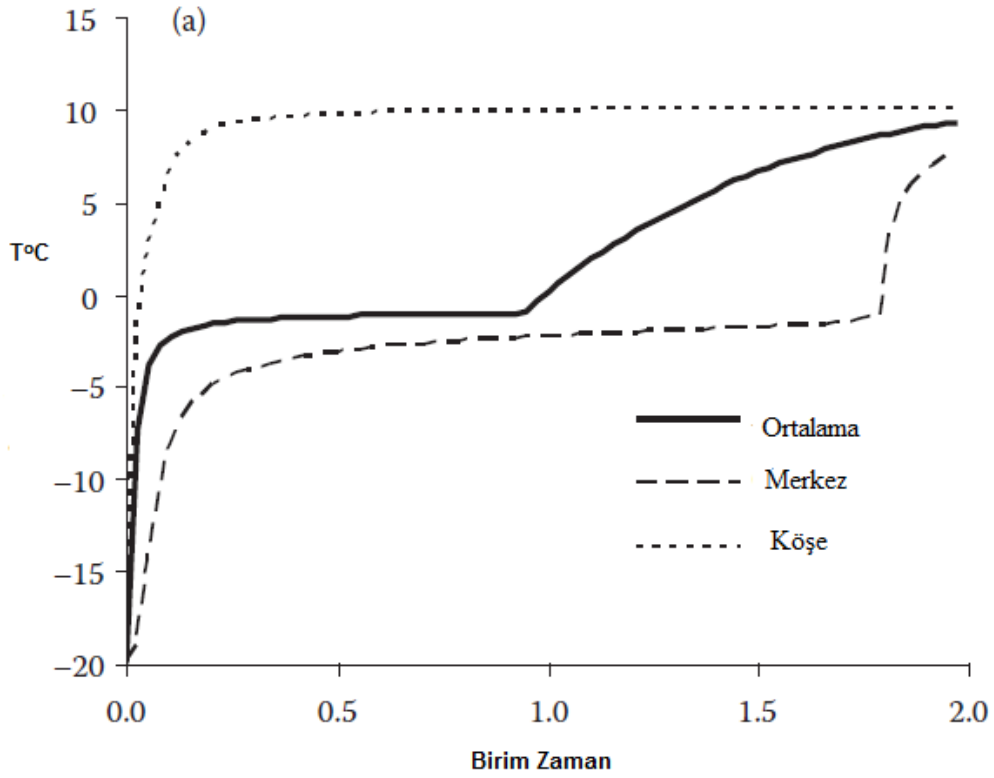
2.3. GIDALARIN ÇÖZDÜRÜLMESİNDE KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

2.3.1. Mikrobiyal Gelişim

Özellikle et ve balık ürünlerinde, dondurma işlemi öncesi enzimatik inaktivasyon amacıyla haşlama gibi bir ön işlem uygulanmadığından, çözdürme işlemi sırasında meydana gelebilen mikrobiyal gelişim ve enzimatik aktivite artışı önemli bir problemdir. Dondurma işleminde ürünün sıcak noktası (bir çok proses için geometrik merkez noktası) sıcaklık değişimi proses sonlandırma parametresi iken çözdürme işleminde yüzey ve özellikle köşelerde oluşan sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklara maruz kalma kapsamında, önem kazanmaktadır. Geleneksel yöntemlerle yapılan bir çözdürme işleminde, proses sonunda ürün merkez sıcaklığı hemen donma noktasının üzerine çıkarken köşe noktası sıcaklık değişimi ortam sıcaklık değişimine yakın olmaktadır. Şekil 2.3’de geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan bir çözdürme işlemi sırasında ürün merkez ve köşe noktaları yanı sıra ürün ortalama sıcaklığında meydana gelen değişim gösterilmiştir.

Mikrobiyal gelişimin, ürünün su aktivitesi, pH değeri ve kompozisyonuna ve ortam sıcaklığına bağlı olduğu kabul edilebilmektedir. Donmuş et ve balıkların çözdürülmesi esnasında yüzeyde çözünmeyle birlikte kullanılabilir su miktarı ve su aktivitesi değerindeki artış ile pH değerinin nötral değerlere yaklaşması mikrobiyal gelişim için uygun koşulları sağlamaktadır. Bu nedenle, bu tür ürünlerde, çözdürme işlemi sırasında, mikrobiyal gelişimi kontrol edebilmek amacıyla ürün sıcaklık değişiminin kontrol edilmesi gerekmektedir. Norveç’te balık işleyen 155 şirket arasında yapılan bir araştırmaya göre şirketlerde donmuş balıkların çözdürülmesi %

94 oranında sıcaklık kontrolü olmadan su kullanılarak yapılmaktadır [Haugland, 2002]. Bunun gibi uygulamalar hala gıda endüstrisinde gıda güvenliği açısından büyük risk taşımakta ve farklı yenilikçi yöntemler kapsamında endüstriyel amaçlı geliştirilecek çözdürme uygulamalarının geliştirilmesinin gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 2.3 Gıdalarda geleneksel çözdürme işleminde merkez noktasında , köşelerde ve ortalama tipik sıcaklık-zaman değişimi [Pham, 2012].

2.3.2. Sızma Kayıpları

Çözdürme işlemi süresince, çözdürülen üründe meydana gelen sızma kayıpları (drip loss) –hem ürün kalitesi açısından hem de ekonomik anlamda önemli bir problemdir. Özellikle et ve balık ürünlerinde, sızma kayıpları içeriğinde ortaya çıkan suda çözünür protein kayıpları, devam eden proses aşamalarında ürün kalite özelliklerini de etkilemektedir. Bu konuda yapılan araştırmalarda çözdürme süresince meydana gelen su kaybının çözdürme işleminden önce yapılan işlemlere (ürün pH değeri, ürüne uygulanan boyut küçültme işlemleri sırasında yüzey alanı hacim oranı,

dondurma hızı, ürün depolama sıcaklığı ve bu sürede gerçekleşen sıcaklık dalgalanmaları, vb.) de bağlı olduğu belirtilmektedir [Pham, 2012]. Dondurulmuş et ürünlerine uygulanan farklı yenilikçi uygulamaların, örneğin radyo frekans uygulamalarının, çözdürme kayıplarını azalttığı bir çok çalışmada belirtilmektedir [Jason ve Sanders, 1962; Sanders, 1966; Bengtsson, 1963; von Heeren, 1964].

Belirtildiği şekilde geleneksel çözdürme işleminde, uzun çözdürme süresinden kaynaklanan nedenlerden dolayı gıda ürünlerinde istenmeyen bozulmalar ve kalite kayıpları oluşmaktadır. Bu kapsamda endüstriyel anlamda kullanılabilen daha etkin bir çözdürme metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilikçi metodlardan dielektrik çözdürme yöntemleri bu kapsamda umut vaadeden ve üzerinde çalışılan yöntemler olarak ortaya çıkmıştır.

2.4.GIDALARDA YENİLİKÇİ ÇÖZDÜRME YÖNTEMLERİ

2.4.1. Buhar Uygulaması ile Çözdürme

Ürün yüzeyine buhar veya vakumlu buhar uygulaması, uygulanan buharın ürün yüzeyinde aniden yoğunlaşması prensibine dayanmaktadır [Pham, 2012]. Bu yöntemle, ani yoğunlaşmadan dolayı, yüksek bir ısı transfer hızına ulaşılabilmektedir. Vakumlu buhar uygulaması ile yoğunlaşma sıcaklığı düşürülerek ürün yüzeyinin yüksek sıcaklığa ulaşması engellenirken hava molekülleri de sistemden uzaklaştırılarak havanın ısı iletim katsayısına bağlı olarak ürün yüzeyinde sebep olabileceği izolasyon etkisi de azaltılmaktadır. Bu sistemlerde yapılan çözdürme işlemlerinde, akışkan ortam olarak suyun kullanıldığı sistemlere göre, daha yüksek bir ısı transfer hızı elde edilebilmekte, ürünün su emilimi azaltılmakta, üründen kaybolacak suda çözünür protein kayıpları azaltılmakta ve ürünün çözdürme ortamı kaynaklı kontaminasyon olasılığı da düşürülmektedir. Akışkan ortam olarak su ve hava ile yapılan çözdürmeye göre ekonomik olarak daha maliyetli olan bu sistemler kullanılarak çözdürülen, örneğin et ürünlerinin, kalitesi daha yüksek olmakta ve üründen çözdürme prosesi sırasında meydana gelen sızma kaybı da azaltılabilmektedir [Pham, 2012].

ürün su kaybında azalma ve su tutma kapasitesinde artışlar tespit edilirken frekans değişiminin çözdürme süresinde belirgin bir değişime sebep olmadığı belirtilmiştir [Yun vd., 1998]. İçier vd. [2010], 2.5×2.5×5 cm boyutlarındaki et bloklarını ohmik ısıtma uygulaması ile çözdürerek sonuçları tekstürel ve histolojik olarak konvansiyonel çözdürme (sabit sıcaklıkta 25 °C, %95 bağıl nemde) yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, ohmik ısıtma yöntemi kullanılarak çözdürülen et örneklerinin konvansiyonel yöntemle çözdürülen örneklerle göre daha sert ve daha az esnek oldukları belirtilmiştir. Başka bir çalışmada [Roberts vd., 1998] bilgisayar kontrollü ohmik çözdürme ünitesi tasarlayıp karides bloklarıyla sistemi test etmişlerdir. Uygulanan çözdürme yönteminde, çözme süresinin suya daldırarak elde edilen sonuçları ile benzer olduğu, sistem tasarımına bağlı olarak ürün içerisinde aşırı ısınmış bölgelerin olmadığı ve ürün kalite parametreleri arasında da bir fark olmadığı gösterilmiş ve ohmik ısıtma yönteminin atık su problemini ortadan kaldıracağı için konvansiyonel yöntemlere bir alternatif olabileceği belirtilmiştir.

Ohmik ısıtma yönteminde diğer elektriksel ısıtma yöntemlerinde de sıklıkla karşılaşılan en büyük sorun yerel ısınmalardır. Bunun nedeni donmuş gıdaların elektriksel iletkenliğinin ortalama 2 kat daha az olmasından kaynaklanmakta olup, çözünen bölgelerde iletkenliğin artmasıyla ısınmanın ivmelenmesidir [Roberts vd., 1998]. Bu yöntemin diğer önemli bir dezavantajı da sistem maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

2.4.3. Akustik Çözdürme

Akustik enerjinin donmuş gıdaları çözdürmek için uygulanması 50 yıl öncesine dayanmasına rağmen düşük penetrasyon derinliği, ürün yüzeyinde meydana gelen lokal ısınmalar ve yüksek enerji ihtiyacı bu sistemlerin gelişmesini engellediği belirtilmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar akustik enerjinin daha verimli olarak kullanımını sağlayacak bir frekans aralığında, bu sistemlerin donmuş gıdaların çözdürülmesi amacıyla kullanılabilmesi konusunda bilgi vermektedir [Li ve Sun, 2002].

Gambuteanu ve Alexe, [2013] tarafından yapılan bir çalışmada $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında, $120\times 60\times 35$ mm boyutunda ve 160 g ağırlığında domuz etinin suya daldırılarak 25 kHz frekansında, düşük akustik şiddetinde merkez sıcaklığı $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa gelene kadar çözdürülerek (0.2 W/cm^2 ve 0.4 W/cm^2) fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve teknolojik özellikleri suya daldırma yöntemi ile yapılan çözdürme ile karşılaştırılmıştır. Akustik uygulama eşliğinde yapılan çözdürmenin 0.2 W/cm^2 şiddetinde 2.5 kat ve 0.4 W/cm^2 şiddetinde ise 3.3 kat daha kısa sürede çözdürüldüğü rapor edilmektedir. Suya daldırılarak akustik yöntem eşliğinde yapılan çözdürmenin ise sadece suya daldırma yöntemi ile yapılan çözdürmeye göre önemli bir farkı olmadığı yapılan bu çalışmada belirtilmiştir.

Li ve Sun, [2002] tarafından yapılan bir araştırmada ise morina balığı bloklarının suya daldırılarak akustik olarak çözdürülmesi için gerekli sürenin sadece suya daldırılarak çözdürme prosesine göre %71 daha kısa olduğu belirlenmiştir. Yüksek enerji uygulamasıyla dondurulmuş et ve balık ürünlerinin çözdürülmesi için ise 500 kHz frekans uygulamasında kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir [Miles vd., 1999]. Bu nedenle uygun frekans ve güçte olmak şartıyla akustik çözdürme yöntemi gıda endüstrisinde umut verici bir teknoloji olmaya devam etmektedir [Li ve Sun, 2002].

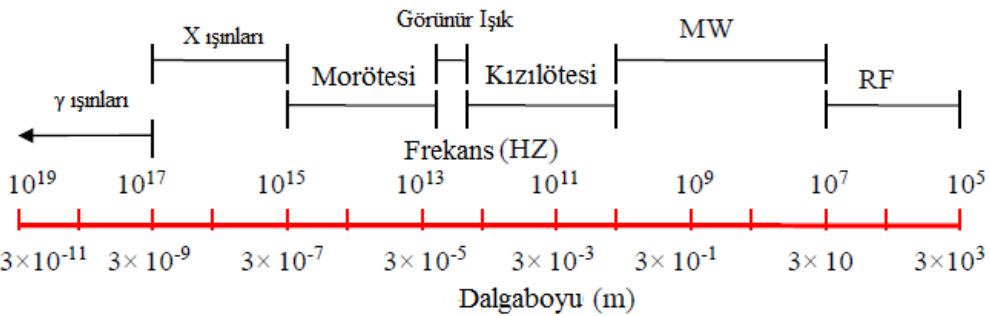
2.4.4. Yüksek Basınç Altında Çözdürme

Su, donma esnasında genişlemekte ve basınç altında donma noktası düşmektedir. Basınç altında minimum elde edilen donma noktası $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (210 MPa)'dir [Pham vd., 2012]. Basınç uygulanması işlemiyle, donmuş gıda ürünlerinin çözdürme işleminin atmosferik basınçta uygulanan çözdürme işlemine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi sağlanabilmekte ve mikrobiyal gelişim – enzimatik aktivite riskleri düşürülebilmektedir. Basınç altında çözdürme işleminin geleneksel çözdürme işlemine göre üçte bir daha kısa bir sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir [Makita, 1992].

Yüksek basınç altında çözdürme işlemi dondurulmuş et ve balık ürünlerine de uygulanmıştır [Chourot 1997]. Yüksek basınç altında yapılan çözdürme ile *Listeria innocua* inoküle edilen çiftlik somonunda gelişen *Listeria innocua* sayısını 1.5 log (100 Mpa uygulamada) ve 3 log (200 Mpa uygulamada) azalttığını belirlemiştir [Mussa ve LeBail, 2000]. Yüksek basınç altında çözdürülen etin duyuşal özellikleri geleneksel olarak çözdürülmüş örneklerle karşılaştırılabilecek seviyede bulunurken [Makita, 1992] üründe çözdürme sırasında meydana gelen sızma kayıplarının da yüksek basınç uygulaması ile azaltılabildiği belirtilmiştir [Chevalier vd., 1999]. Ancak, 150 Mpa ve üzerinde uygulanan basınç değerlerinin üründe denatürasyon ve meydana gelen çözdürme kayıpları ile protein kaybına sebep olabileceği de belirtilmektedir. Örneğin, donmuş somon balıklarının 150 MPa üzeri bir basınç uygulaması ile çözdürülmeleri sonucunda, son üründe farkedilebilir renk değişiklikleri gözlenirken; 200 MPa basınç değerinde ürünün tekstürel özelliklerinde değişikliklerin meydana geldiği gözlenmiştir [Zhu et al. 2004].

2.4.5. Kızılötesi Çözdürme

Kızılötesi enerji elektromanyetik enerjinin bir formu olup havayı geçip ürünün yüzeyinden absorbe edilerek moleküllerle etkileşimi sonucu ısıya dönüşmekte ve ürünün yüzeyinden de kondüksiyonla ürün içerisinde yayılmaktadır. Kızılötesi dalgaların ait olduğu spektrum mikrodalga ve görünür ışığın arasındaki bölgede yer almakta ve şekil 2.5’de görülmektedir. Kızılötesi ısıtma radyasyonla ısıtma prensibine göre ürünün emisivite değerine bağlı olarak ısıyı absorbe etmektedir.



Şekil 2.5. Kızılötesi dalgalarının ait olduğu bölge [Marra vd., 2009].

Dielektrik ısıtma prosesinde, donmuş ve donmamış bölgelerin farklı dielektrik kayıp faktörüne sahip olması bu bölgelerin farklı hızda ısınmasına sebep olmakta bunun sonucunda da yerel aşırı ısınma problemi ile karşılaşılabilir. Ancak kızılötesi ısıtmada emilim sabiti değerinin buz ve su için yaklaşık olarak aynı olması yerel ısınma problemlerinin meydana gelmesini engellemektedir. Kızılötesi ısıtma işleminin diğer bir avantajı da bu ısıtma yöntemi ortamın sıcaklığına bağlı olmadığı için gıda ürünün yüzeyi bir yandan soğutulurken de uygulanabilmektedir. Böylece ürün yüzeyinde olabilecek aşırı ısınmaların önüne de geçilebilmektedir. Yapılan bir deneysel çalışmada, tuna balığının kızılötesi ısıtma yöntemi ile çözdürme işlemini, bir yandan soğuk havayla soğutma sürerken, renk değişimi ve sızma kayıpları olmadan 30 dakikada tamamlandığı belirtilmiştir [Kimura, 1989]. Fakat büyük boyutlarda olan donmuş gıda ürünlerinde kızılötesi uygulama, penetrasyon derinliğinin az olmasından dolayı daha uzun sürmekte olup homojen bir ısınma gerçekleşmesi zorlaşmaktadır [Sakai ve Mao, 2006] .

2.4.6. Dielektrik Çözdürme

Dielektrik çözdürme uygulamaları kapsamında radyo frekansı (RF) ve mikrodalga (MW) prosesleri yer almaktadır. MW ve RF bölgenin ait olduğu spektrum Şekil 2.5’de gösterilmiştir. RF uygulamalarında ısınma elektromanyetik alanın gıda içerisindeki dipolar ve iyonik moleküllerle etkileşimi ile ortaya çıkmaktadır. Elektrik alanın etkisiyle dipol rotasyon ve iyonik unsurların hareketi sonucu oluşan sürtünmeyle gıdanın içerisinde ısı oluşmaktadır. Genel olarak iyonik depolarizasyonun düşük frekanslı RF bölgesinde (1 - 300 MHz) dominant ısınma mekanizması olduğu kabul edilmektedir [Tang, 2005]. RF uygulamada ürün iki plaka şeklindeki elektrotlar arasına yerleştirilmekte ve kapasitör işlevi görerek elektrik enerjisini absorbe etmektedir. MW uygulama işleminde ise magnetron veya klystron denilen özel oscillator tüplerinden yayılan mikrodalga bir dalga yönlendirme bölgesi (waveguide) aracılığı ile ürünün bulunduğu bölüme yönlendirilmektedir.

RF bölge frekans aralığı 1 - 300 MHz arası MW frekans aralığı ise 300 MHz - 300 GHz aralığında olup, endüstriyel, tıbbi ve bilimsel alanlarda kullanımlar için RF bölgede 13.56, 27.12, 40.68 MHz frekansları; MW bölgede ise 915 MHz, 2450 MHz, 5.8 GHz, ve 24.124 GHz aralıkları izin verilen frekans değerleridir [Piyasena vd., 2003]. Evlerde kullanılan mutfak tipi MW fırınlar 2450 MHz frekans da çalışırken endüstriyel MW uygulamaları ise daha uzun bir dalga boyu ve penetrasyon derinliği elde edebilmek amacıyla 915 MHz frekansında uygulanmaktadır.

RF'nin daha uzun dalga boyuna sahip olması MW'ya göre daha fazla etki derinliği anlamına gelmekte; bu nedenle büyük boyutlardaki gıda ürünleri için daha uygun olarak kullanılabilmesi kabul edilmektedir. MW ise yüksek frekans değerinden dolayı üründe, ürünün o frekansdaki dielektrik özelliklerine de bağlı olarak, hızlı ısıtma sağlamaktadır. Donmuş et ve balık ürünlerinin RF sistemler kullanılarak çözdürülmesi işleminin akışkan ortam olarak havanın kullanıldığı geleneksel çözdürme sistemlerine göre daha hızlı olduğu ve bu uygulama sonucu üründe daha az sızma kaybının gözlemlendiği de literatürde belirtilmektedir [Pham, 2012].

RF ve MW sistemlerin en önemli özelliği elektromanyetik dalga uygulaması ve kabul edilebilir penetrasyon derinlikleri ile, proses sırasında geleneksel sistemlere göre hacimsel olarak ısıtma sağlamalarıdır. Bu avantajları, dielektrik uygulama sistemlerinin dondurulmuş ürünlerin çözdürülmesi amacıyla kullanım potansiyelleri olan yöntemler olarak kabul edilmelerini sağlamaktadır. Mikrodalga ile çözdürmenin avantajları daha kısa çözdürme süresi, üründe meydana gelen sızma kayıplarının az olması ve kimyasal ve mikrobiyal bozulmaların azaltılmasıdır. Ancak bu avantajların yanı sıra, ürünün bazı bölgelerinin su içeriğine bağlı - seçici olarak aşırı ısınma (run-away heating) oluşması bu yöntemin donmuş gıda ürünlerinin çözdürülmesi amacıyla kullanımını sınırlamaktadır [Li ve Sun, 2002]. RF ısıtma işleminin, MW ısıtmaya göre daha homojen bir ısıtma sağladığı ve penetrasyon derinliğinin fazla olmasından dolayı büyük boyuttaki gıdalarda çözdürme için daha avantajlı olduğu bilinmektedir.

frekansında dalga boyu ≈ 11 m). Elektromanyetik spektrumda MW bölgede kullanılan frekansa bağlı olarak elde edilen dalga boyunun (2.45 GHz frekansında ≈ 12 cm) daha kısa ve enerjisinin daha fazla olduğu bilinmektedir.

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

2.5.1. Radyo Frekans (RF) Isıtma Mekanizması

2.5.1.1. Dipol dönmesi

Gıda ürünleri başta su olmak üzere çeşitli polar moleküller içermekte ve bu moleküller gıda içerisinde gelişigüzel bir şekilde bulunmaktadır. Elektrik alanı uygulaması sırasında ürün içerisindeki asimetric ve polar moleküller, uygulama frekansına bağlı olarak elektrik alanının yön değiştirmesiyle elektrik alanın etkisi altında dönmektedir (dipol dönmesi). Örneğin, 27.12 MHz de çalışan bir RF sistemde elektrik alanın yönü saniyede 27.12 milyon kez değişmektedir. Hızla değişen elektrik alanının polaritesine uyum sağlamak için dönen polar moleküllerin, birbirleri ile ve ortamdaki diğer moleküllerle sürtünmelerinden dolayı ise ısı enerjisi oluşmaktadır. Su molekülleri, polar moleküller olup bu özelliği sayesinde elektriksel enerjiyi pek çok molekülden daha iyi ısıya dönüştürebilmektedir [Uslu ve Certel, 2006]. 1 GHz üstü frekanslarda bu ısıtma mekanizmasının daha önemli hale geldiği belirtilmekte olup, endüstriyel uygulama frekansına sahip (2450 MHz) MW sistemlerde, dipol dönmenin ürünlerin ısınmasındaki etkin mekanizma olduğu da düşünülebilir.

2.5.1.2. İyonik polarizasyon

Ürün içerisindeki çözülmüş tuzların iyonik bileşenleri, üzerlerinde taşıdıkları elektriksel yük nedeniyle, uygulanan elektrik alanının polaritesine zıt istikamette hızlanarak hareket etmeye başlamaktadır. Bu kapsamda, RF sistemlerde elektrotlara uygulanan değişken elektrik alanı (+) yüklerin negatif elektrik alanına, (-) yüklerin ise pozitif elektrik alanına doğru hareket etmesine sebep olmaktadır. İyonların hareketleri ve bu hareketlerin sonucu aralarında oluşan sürtünme ve birbirleriyle çarpışmaları kinetik enerjilerinin artarak ısı enerjisine dönüşmesine neden olmaktadır. Elektromanyetik dalgaların frekansı arttıkça elektromanyetik dalgaya maruz kalan gıda içerisindeki dipol dönmesi ve iyonların hareketlerin hızı da artmaktadır [Uslu ve Certel, 2006].

Genel olarak iyonik polarizasyonun daha düşük frekanslarda çalışan RF frekans aralığında baskın ısıtma mekanizması olduğu kabul edilir. MW için kullanılan daha yüksek frekanslarda ise (915 ve 2450 MHz) her iki (iyonik polarizasyon ve dipol dönme etkisi) mekanizma da ürünün su ve iyon içeriğine bağlı olarak baskın olabilmektedir [Tang, 2005]. Su, MW ile ısıtmada en önemli bileşen olup gıdalarda protein ve yağ MW enerji ile daha az etkileşime girmekte ve bu kapsamda ürün sıcaklığının artışında ürün ısı kapasitesi değeri de etkili olabilmektedir [Ryynanen, 1994]. Buna karşın su miktarı azaltılmış ürünlerde, örneğin bisküvilerin ve ya cipslerin son kurutma aşamalarında, RF ısıtma sistemleri daha seçici ve etkin olarak davranabilmektedir.

2.5.2. RF Isıtmayı Etkileyen Faktörler

2.5.2.1. Dielektrik özellikler

Etkin bir RF ısıtma sistemi tasarımı için gıdanın ısıtılmasında rol oynayan faktörlerin de belirlenmesi gerekmektedir. Gıdaların dielektrik özellikleri elektromanyetik enerjinin gıda içerisindeki dağılımını belirleyen önemli parametrelerdendir. [Wang 2003].

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

Dielektrik özellikler kapsamında, permitivite (ε) kompleks bir sayı olup, reel kısmına dielektrik sabiti (ε') ve sanal kısmına ise dielektrik kayıp faktörü (ε'') denmektedir. Dielektrik sabiti (ε'), materyalin uygulanan elektrik alanında elektrik enerjisinin ne kadarını absorbe edip ne kadarını iletip ne kadarını yansıtacağını belirtir. Dielektrik kayıp faktörü (ε'') ise uygulanan elektriksel alanda gıdada elektromanyetik enerjinin ne kadarını ısıya dönüştürebileceğini gösterir. Düşük bir dielektrik kayıp faktörü değeri elektriksel alan uygulama altında ısınmanın az gerçekleşeceği anlamına gelmektedir [Marra vd., 2009].

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

$$Q_{abs} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot |\overline{E}|^2 \quad (2.2)$$

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

2.5.2.2. Radyo frekansı (RF) ısıtmada penetrasyon derinliği

Ürünün ısınma davranışını etkileyen diğer bir özellik ise penetrasyon derinliğidir. RF uygulamanın, MW uygulamaya göre daha yüksek olan penetrasyon derinliği ile, büyük boyutlu ürünlerde kullanımı daha uygun olmaktadır.

$$d_p = \frac{C}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon'} \sqrt{\sqrt{1+(\tan \delta)^2} - 1}} \quad (2.3)$$

Çizelge 2.1 de görülen peyniraltı suyu jelinin penetrasyon derinlik değerlerine bakıldığında 27 MHz frekansındaki değerlerin diğer frekanslara göre özellikle MW frekans (2450 MHz) değerlerinin 7 katı olduğu görülmektedir. Endüstriyel gıda proseslerinde ürün boyutlarının büyük olduğu göz önüne alındığında RF 27.12 MHz frekansının bu tür gıda proseslerinde MW uygulamaya göre daha uygun olacağı kolaylıkla anlaşılabilir. RF ısıtma sistemlerinde kullanılacak örnek boyutları penetrasyon derinliği gözönüne alınarak uygun büyüklüğün modelleme çalışmalarında belirlenebileceği düşünülmektedir.

Çizelge 2.1 Peyniraltı suyu jelinin çeşitli frekanslardaki penetrasyon derinliği [Wang, 2003].

T (°C)	Penetrasyon derinliği (mm)				
	27 MHz	40 MHz	915 MHz	1800 MHz	2450 MHz
20	45.9	38.2	12	8.8	6.5
30	42	34.9	10.6	8.2	6
40	38.5	31.9	9.5	7.6	5.6
50	35.6	29.5	8.5	6.9	5.1
60	33.1	27.4	7.8	6.4	4.7
70	31	25.6	7	5.8	4.3
80	29.1	24.1	6.4	5.3	3.9
90	27.6	22.7	6	5	3.6

Ürünün yayma veya dağıtma faktörü olarak tanımlanan $\tan(\delta)$ (loss tangent) dielektrik kayıp faktörü ile dielektrik sabitinin oranıdır:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.4)$$

En yüksek penetrasyon değeri dielektrik kayıp faktörünün ve dielektrik sabitin her ikisinin de düşük değere sahip olduğunda meydana geldiği belirtilmektedir [Marra 2007].

2.5.3. Radyo Frekans Sistemler

RF uygulama sistemlerinin tasarımında kullanılan jeneratöre bağımlı olarak endüstriyel amaçlı iki farklı sistem kullanılmaktadır:

- Serbest salımlı RF sistemler ve
- 50 Ω 'luk RF sistemler.

50 Ω 'luk RF sistemlerde, frekans ve güç kontrolü sistematik olup, proses sürecinde elektrotlar arasında sabit bir voltaj uygulaması sağlanabilmektedir. Ancak, serbest salımlı RF sistemler verimli, esnek ve ucuz maliyetlerine bağlı olarak gıda endüstrisinde halen en çok kullanılan sistemler olarak göze çarpmaktadır [Rowley 2001].

2.5.3.1. Serbest salımlı RF sistemler

Serbest salımlı sistemler bir güç üretici, yüksek voltaj çeviricisi, osilatör, yüksek voltaj düzelticisi ve bir tank devresinden oluşmaktadır. Bu sistemlerde, proses edilen ürün de devrenin bir parçası olarak görev yapmakta ve gösterilen direnç ve elektrotlar arasında mesafeye göre tank devresinden güç ayarlama işlemi yapılabilmektedir. Ürünün RF sisteminin bir parçası olarak proseste yer alması, bu sistemlerin yüksek verimlilikle çalışmasını sağlamaktadır. Bu sistemlerin, ayrıca tasarımları kolay ve 50 Ω 'luk sistemlere göre ekonomik maliyetleri daha düşüktür. Bunların yanında ısınma işlemi esnasında oluşan güç - voltaj dalgalanmaları ve

ürünün sıcaklığa bağımlı olarak değişen dielektrik özellikleri sistemin çalıştığı frekansı etkileyebilmekte ve elektriksel voltaj değeri de elektrotların konumu, ürünün dielektrik özellikleri ve miktarına göre değişmektedir [Wang ve Wang, 2009].

2.5.3.2. 50 Ω RF sistemler

Bu sistemler, güç amplifikatörlü jeneratörlerle sabit bir direnç değerinde 50 Ω değerinde, çalışabilecek şekilde tasarlanmışlardır. Crystal Oscillator Source Matched Impedance Generator (COSMIG) sistemler olarak da bilinen bu sistemlerde güç üretimi için, serbest salımlı sistemlere göre, farklı bir yaklaşım kullanmakta olup kullanılması istenen sabit bir frekansın üretilmesi için gerekli gücü üretmeye dayanmaktadır. Böylece çalışma frekansı daha iyi kontrol edilebilmekte ve uluslararası elektromanyetik spektruma uyumlu olarak tasarlanabilmektedir. Bu sistemlerde elektrotlar arasında sabit bir voltaj farkı elde edilebilmekte ve proses serbest salımlı sistemlere göre daha verimli olarak kontrol edilebilmektedir. Ancak yüksek maliyet ve güç çıkışının sınırlanmış olması bu sistemlerin yaygın kullanımını engellemiştir [Wang ve Wang 2009].

2.6. RADYO FREKANSI (RF) UYGULAMANIN GIDA PROSESLERİNDE KULLANIMI

RF ile ısıtma gıda endüstrisinde bisküvi, kraker, çerez ve cips prosesinde son kurutma amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ticari uygulamaların yanında RF sistemlerin meyve ve kuruyemişlerin hasat sonrası parazitlerin kontrolü, et ve balıkların çözdürülmesi, sterilizasyon ve pastörizasyon işlemlerinde kullanımları konusunda literatürde çok sayıda araştırmalar bulunmaktadır.

2.6.1. Kurutma

RF sistemler, suyu seçici olarak ısıtma özelliklerine bağlı olarak, bisküvi ve kraker üretiminde pişirme işleminden sonra son kurutucu olarak yaklaşık 30 yıldır kullanılmaktadır. ABD’de en büyük aperitif gıda üreten şirketlerinden Tom’s Food

bisküvi ve kurabiyelerde pişirme sonrası kalan nemi uzaklaştırmak için 27 MHz'de çalışan RF ısıtma fırını kullanmaktadır. RF ısıtma kitlesel üretimde, örneğin bisküvilerde, son pişirme işlemi sonrası kalan nemi verimli ve uniform olarak uzaklaştırılabilmekte ayrıca üründe renk ve tat değişimi de engellenmektedir [Rice 1993].

Pişirme işlemi sırasında, konveksiyon ve radyasyon ısı transferi mekanizmaları ile ürünlerin dış yüzeyindeki su hızlıca üründen uzaklaştırılabilmektedir. Ancak ürünün yüzeyinde gerçekleşen hızlı kurumaya rağmen ürün içerisindeki ısı iletim mekanizmasının daha yavaş gerçekleşmesi nedeniyle ürün iç kısmının kuruması uzun sürmekte ve ürünün içerisinde kalan nem nedeniyle veya proses süresinin uzamasına bağlı olarak son üründe kalite problemleri yaşanabilmektedir. RF uygulama, suyu, ürün içerisindeki konumundan bağımsız olarak ısıtabildiği için son kurutma işlemi uygun bir proses olarak kabul edilmektedir. Bu amaçla bisküvi ve kraker üretim prosesinde pişirme sonrası RF sistemlerin kullanılması ürünün raf ömrünü artırdığı gibi proses verimine de % 30 oranında katkı sağlamaktadır [Clark, 1997].

Bu başarılı ticari kurutma uygulamalarının yanında kahve, kakao, mısır, tahıl, kuru yemiş gibi taneli gıdaların kurutulmasında kullanımı için araştırmaları ve uygulamaları da artmaktadır. Kakao tanelerinin 6.5-7.8 kW gücünde ve 60 MHz frekansında çalışan RF sisteminde 130° C'de kavrulmasında kullanılmış ve % 6 oranındaki nem % 1'e azaltılmıştır [Piyasena vd., 2003].

2.6.2. Pastörizasyon ve Sterilizasyon

Düşük asitli bir gıda ($pH > 4.5$) konvansiyonel yöntemlerle sterilize edildiğinde renk, aroma, tekstür, ve besin değerinde değişim kaçınılmaz olur. Kovansiyonel yöntemle ısı transferinin kondüksiyonla ürünün yüzeyinden soğuk noktasına yavaş gerçekleştiğinden gereken sterilizasyon değerine ulaşıncaya kadar ürünün yüzeye yakın bölgeleri daha fazla ısı ileme maruz kalmaktadır. RF ile ısıtma da ürün hacimsel olarak ısıtıldığından bu alanda kullanılmasının büyük bir

potansiyeli vardır. RF ısıtma ile ürünün kalitesinde artış sağlanabilmekte ve proses süresi kısaltılabilmektedir [Wang vd., 2003].

6 kW gücünde ve 27 MHz frekansında çalışan bir pilot ölçekli RF Sterilizasyon sisteminde gıda modeli olarak peynir altı suyu jeli (2.7 kg ağırlığında) $24.5 \times 23.5 \times 4.5$ cm boyutlarında kaplar kullanılarak sterilizasyon süresindeki azalma ve gıda kalitesindeki değişimler araştırılmıştır. İstenilen letalite değerine 30 dakikalık bir işlem sonucunda ulaşılırken aynı letalite değerine konvansiyonel ısıtma ile 90 dk ulaşıldığı belirtilmiştir [Wang vd., 2003].

Başka bir çalışmada uzun raf ömrüne sahip olması planlanan Amerikan ordu rasyonu için hazırlanan çırpılmış yumurta 27.12 MHz frekansında çalışan pilot ölçekli RF ünitesinde gerekli letalite değerlerine göre sterilize edilip konvansiyonel olarak sterilize edilmiş örneklerle kalite parametreleri karşılaştırılmıştır. Aynı letalite değerlerine RF ısıtma ile konvansiyonel sterilizasyon süresinin 1/3'ü kadar zamanda ulaşabilmekte olduğu belirtilmektedir. RF ile sterilize edilmiş örnekler konvansiyonel olarak sterilize edilmiş örneklere göre daha az kahverengi olduğu, daha az sert, daha az esnek ve daha yapışkan olduğu rapor edilmiştir [Luechapattanaporn vd., 2005].

Diğer bir çalışmada [Orsat vd., 2004] vakumla paketlenmiş jambon dilimlerini 600 W gücünde ve 27.12 MHz frekansta çalışan bir RF sistemde pastörize ederek (ürün sıcaklığı 75 – 85 °C), örnekleri nem kaybı, renk değişimi ve duyu özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada RF uygulamanın jambonların mikrobiyal yükünü azaltarak raf ömürlerini artırdığını, ambalaj içerisinde prosesin avantajı ile nem kayıplarının önlenerek diğer duyu ve kalite özelliklerinin korunabileceği de belirtilmiştir.

Sürekli akış halindeki süte (*Listeria innocua* ve *Escherichia coli* inoküle edilmiş) 2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan RF sisteminde ısıtma işlemi uygulanmış ve kullanılan RF sistemin etkinliği araştırılmıştır. RF uygulamada 29.5 s ve tutma tüpünde 26 saniye olmak üzere toplam 55.5 saniyede kalan süt

örneğinde mikrobiyal yükte 5 ve 7 log azalma sağlanabilmiştir. Bu çalışmada sütün RF sistemi kullanılarak güç ve akış ayarlanarak pastörize edilebileceği rapor edilmiştir [Awuah vd., 2005].

2.6.3. Tarım Ürünlerinin Hasat Sonrası Zararlı Kontrolünde

Son zamanlarda RF ısıtma, kuru yemiş ve bakliyat gibi ürünlerde depo zararlılarını önlenmesinde kimyasal fumigasyona alternatif bir yöntem olarak göz önüne alınmaktadır [Marra vd., 2009]. Bunun nedeni, kimyasal fumigasyon amacıyla kullanılan, metil bromür gibi geleneksel fumigantların çevreye ve sağlığa olan zararlarından dolayı alternatif yöntemlerin aranmasıdır.

Meyve ve böcek zararlılarının dielektrik özellikleri elektromanyetik uygulamalar için araştırılmış [Wang vd., 2003] ve RF ısıtmada uygulanan frekanslarda yaygın olan böcek zararlıların dielektrik kayıp faktörünün kuruyemişlerin değerlerinden daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Bu kapsamda, RF uygulamada böcek zararlıları ürüne göre daha fazla ısınacağından, RF sistemlerin geleneksel yöntemlere alternatif bir potansiyel taşıdığı belirtilmiştir.

Örneğin, cevizde su oranı daha yüksek olan larvaların RF uygulamada seçici olarak ısıtılabilirdiği ve bu işlemin cevizin kalite özelliklerine zarar vermediği gösterilmiştir. Ceviz örnekleri bir RF ünitesinde (27 MHz – 12 kW) 55 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda ısıtılmış ve en dayanıklı böcek zararlılarından olan *Navel orangeworm* (*Amyelois transitella*)’da % 100 ölüm oranı elde edilmiştir [Wang vd., 2002].

Son yıllardaki çalışmalarda RF ısıtma ve sıcak hava ile beraber yapılan ısıtma işlemi bezelye, nohut ve mercimek zararlılarına kontrol için uygulanmış kalite parametrelerinde bir değişim olmadığı belirtilmiştir [Wang vd., 2010].

Portakallarda meyve sineği zararlısını önlemek için RF ısıtma uygulanmış ve 4°C ‘de 10 gün depolanma sonrasında uygulanan işlemin kalite üzerine etkisi

(ağırlık kaybı, sertlik kaybı, renk kaybı toplam çözünür katı madde ve uçucu bileşen) ve konvansiyonel uygulamayla olan farkı araştırılmıştır. Uçucu bileşenler işlem süresinin azalması nedeniyle RF uygulamada konvansiyonel sıcak su uygulamasına göre daha fazla korunduğu rapor edilmiştir [Birla vd., 2005].

RF uygulamalarında taze meyvelerin birbirine veya konulduğu kapla temas ettiği kısımlarda elektrik alanının bu temas noktalarında yoğunlaşması nedeniyle aşırı ısınmalar sonucu yanmalar meydana gelebilmektedir. Bunu önlemek ve daha homojen bir ısınma oluşturmak için bazı araştırmacılar ürünleri (kiraz) su içerisinde koyarak RF uygulamayı gerçekleştirmişlerdir [Ikediala vd., 2002]. Daha büyük boyutlardaki meyveler (elma, portakal) için ise su içerisinde ürünleri hareket vererek, taşıyarak daha homojen bir ısınma (2.8°C ve 3.1°C standart sapma ile) sağlanmıştır [Birla vd., 2004].

2.6.4. Çözdürme

RF uygulama ile çözdürme işlemleri kapsamında ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda başlamıştır. 14 - 17 MHz, 3 kW RF sistem kullanarak yapılan bir çalışmada [Cathcart vd.,1947], 450 g – 13.6 kg ağırlığında olan dondurulmuş meyve-sebze ve balık örneklerine 2 - 15 dk aralığında uygulanan çözdürme işleminin geleneksel çözdürme akışkan ortam olarak havanın kullanıldığı yöntemlerine göre çok daha kısa sürede tamamlandığı ve ürünlerin renk ve kalite özelliklerinde minimal düzeyde değişiklik meydana geldiği belirtilmiştir. Bengtsson [1963], 1 kW gücünde 35 MHz frekansında çalışan bir RF sistemde 4 cm kalınlığında olan donmuş et örneklerini 34 dk'da çözdürmüştü; diğer bir çalışmada ise 30-60 kg ağırlığındaki et blokları 25 kW'lık bir RF sistemde 1.5 saatte çözdürülmüşlerdir [von Heeren, 1964]. Daha sonra bir grup araştırmacı alabalık ve ringa balığını (3.18 kg bloklar halinde -29 °C'de) 6 kW gücünde 36-40 MHz frekansında çalışan bir RF sistemde çözdürmüşlerdir [Jason ve Sanders, 1962]. Bu çalışmada, durgun havada çözdürme işleminin 16 saat, su içerisinde çözdürme işleminin ise 3 saat sürdüğü proseslere göre RF çözdürme işleminin 12.5 dk'da tamamlandığı belirtilmiştir. Ayrıca, RF sistem kullanılarak yapılan çözdürme işleminde proses edilen ürünlerde meydana gelen sızma kaybının

daha az olduğu ve çözünmüş ürünlerin daha iyi tat ve koku özelliklerine sahip olduğu da gözlenmiştir. Aynı sistemle maksimum 8 cm kalınlığındaki sosis ve domuz eti bloklarına Sanders [1966] tarafından da çözdürme işlemi uygulanmış ve 10 -50 dakikada tamamlanan çözdürme işlemi sonucunda çözünen ürünlerde geleneksel yöntemlere göre daha az sızma kaybının olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde, uzun süre RF çözdürme sistemleri ile ilgili bir çalışma yapılmazken, dondurulmuş ürünlerin çözdürülmesi amacıyla dielektrik ısıtma yöntemlerinin kullanılması için MW uygulama çalışmalarında ağırlık verilmiştir [Bialod vd., 1978; Coleman, 1990; 1991; Basak ve Ayappa, 1997; Taoukis vd., 1987; Zeng ve Faghri, 1994; Veirtanen vd., 1996; Chamchong ve Datta, 1999; Taher ve Farid, 2001; Watanebe vd., 2006].

RF çözdürme konusunda çalışmalar 1990'lu yıllarda tekrar başlamıştır. Pizza vd. [1997], jambon ürünlerine 27.12 MHz frekansında -20 °C'den -4 °C'ye temperleme işlemi başarıyla uygulanmıştır. RF uygulama ile yapılan farklı çalışmalarda çözme ve temperleme işlemlerinin RF uygulama ile başarıyla gerçekleştirilebileceği belirtilirken, James ve James [2002] üründe meydana gelen yerel ısınmalar nedeniyle bu yöntemin donmuş ürünlerin çözdürülmesinde problemler yaratabileceğini belirtmiştir.

RF ısıtma ile çözdürme araştırmaları son yıllarda özellikle et ürünleri üzerinde yoğunlaşmıştır [Faray vd., 2008; Faray vd., 2010; Faray vd., 2011]. İşlenmiş etin -18 °C ve 5 °C sıcaklık aralığında dielektrik özellikleri araştırılmıştır. Aynı sıcaklık aralığında ürünün spesifik ısı, termal difüzyivite ve ısı iletim katsayısı sıcaklığa bağlı olarak tespit edilmiştir [Faray vd., 2008]. Bu özelliklerin tespiti daha sonra yapılacak olan modelleme çalışmaları için bir ön çalışma olmuştur. Aynı düzende farklı güçlerde (600, 500 W ve 400 W) çalışan RF sisteminde farklı oranlarda yağ içeren (%50 % 100 ve % 0) donmuş et ürününün temperlenmesi için ısıtılmış ve işlem boyunca ürünün absorbe ettiği güç değerleri verimlilik açısından incelenmiştir. Ayrıca sıcaklık dağılımı temperleme sonunda analiz edilmiş ve yağsız et örneğinin en hızlı ve en homojen ısıtılan ürün olduğu belirtilmiştir [Faray vd.,

2010]. Kıyılmış et çeşitli yağ oranlarıyla (%100 %50 ve yağsız et) 4kg bloklar halinde çözdürülmüş ve konvansiyonel çözdürme ile karşılaştırılmıştır. RF çözdürmenin 35 dk sürmesine karşılık konvansiyonel çözdürmenin 50 saat 20 dakikada tamamlandığı belirtilmiştir. RF uygulamayla ürünün çözdürme sonrası ortalama sıcaklığı 0.2°C (1.8°C standart sapma) olarak belirtilmiş ve göreceli olarak homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiği belirtilmektedir. Ancak % 100 yağ ve % 50 yağlı et ürünlerinde yerel ısınma problemlerinden dolayı homojen bir ısınma sağlanamadığı belirtilmiştir [Farag vd., 2011]. Llave vd., [2014] tarafından yapılan bir çalışmada ise 13.56 ve 27.12 MHz frekanslarda uygulanan RF ısıtmanın dondurulmuş ton balıklarının çözdürülme işlemine uygunluğu incelenmiş ve farklı deneysel koşullarda çözünen ürünlerde homojen sıcaklık dağılımının elde edildiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, uygun RF sistemlerinin tasarlanabilmesi amacıyla çözdürme işleminin matematiksel modelinin geliştirilmesi gereği üzerine yoğunlaşmıştır.

Dondurulmuş ürünlerin çözdürülmesi üzerine yapılan farklı çalışmalarda, Bu alanda en büyük problemlerden birinin yerel ısınma sorunu olduğu, endüstriyel anlamda hızlı bir çözdürme sistemine ihtiyaç bulunduğu ve bu sistemlerin geliştirilebilmesi amacıyla sistem ve ürün içi sıcaklık dağılımını belirleyebilen matematiksel modellere ihtiyaç olduğu belirtilmektedir. RF sistemler gibi, dielektriksel ısıtma yönteminin uygulayan ve endüstriyel uygulamalar için geliştirilecek sistemlerde ise, sıcaklık dağılımına ilave olarak sistem içi elektriksel alan dağılımının da bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden bu alanda yapılacak modelleme çalışmalarının proses analiz, tasarım ve kontrolü konusunda yardımcı olacağı düşünülmektedir.

2.6.5. Diğer Çalışmalar

Sebzelerde ön haşlama işlemi yerine 750 W ve 15 MHz frekansında çalışan bir RF sistemde, 77°C 'ye kadar ısıtılıp -23°C 'de bir kaç gün bekletilen örneklerde katalaz enziminin inaktive edildiği; 88°C 'ye kadar ısıtılan örneklerde ise kontrol grubuna göre daha az askorbik asit kayıplarının olduğu; ancak bu örneklerin tat ve

renk açısından geleneksel su ve buhar ile haşlanan örnekler göre daha düşük kalite de olduğu Moyer ve Stotz [1947] tarafından belirtilmiştir.

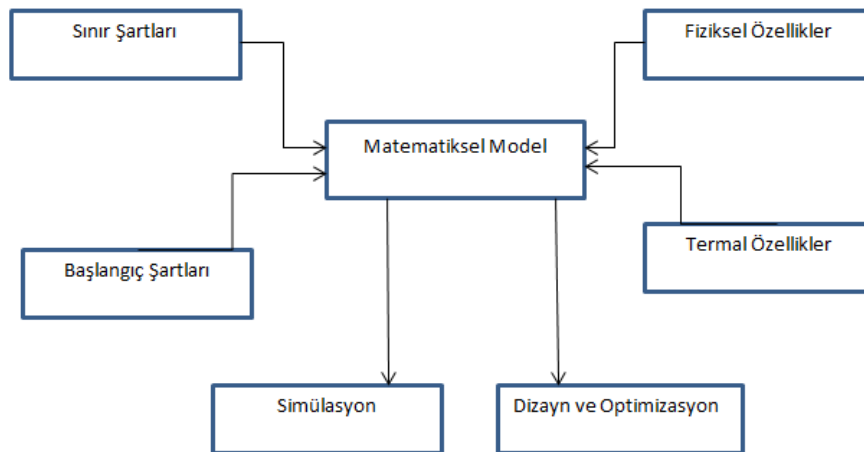
Tüketime hazır vakumlanmış ve paketlenmiş havuç dilimlerinin depolama ömrünü artırmak için 2 dakikalık RF ısıtma uygulanmış ve sıcak su veya klorlu su uygulamasıyla kalite özellikleri karşılaştırılmıştır. RF uygulanan örneklerin sıcak su veya klorlu su uygulamasına göre daha iyi tat, renk kalite özelliklerine sahip olduğu belirtilmiştir [Orsat vd., 2001]. Küçük boyutta tam havuçlar, parça küp şeklinde havuç ve patatesler sıvı % 1 'lik karboksimetilselüloz çözeltisi içerisinde sürekli akışkan tüp (14.6 cm çapında ve 2.1 m yüksekliğinde) içerisinde 40.68-MHz frekansında çalışan ve 30 kW gücünde RF ısıtma uygulanmış ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir [Zhong vd., 2004]. 3 kW ve 14-17 MHz frekansında çalışan RF sisteminde dilimli paketlenmiş somun ekmeği ve tüm Boston kahverengi ekmeği 20-59 saniye 52-66 °C sıcaklığına ulaşmaya kadar ısıtılmış ve 10 günlük depolamadan sonra herhangi bir küf gelişimi olmamıştır [Zhao, 2000]. Yapılan bir başka çalışmada [Laycock vd., 2003] üç farklı et ürününü (kıyılmış, işlenmiş ve işlenmemiş kaslı et) 1.5 kW RF sistemde ve su içerisinde pişirilmiştir. RF ısıtma sisteminin, su içerisinde yapılan pişirmeye göre süreyi 1/25 oranında azalttığı belirtilmiştir. RF sistemde proses edilen ürünlerde daha az su kaybı, daha kabul edilebilir renk ve su tutma kapasitesi olduğu da rapor edilmiştir. Benzer bir RF düzeneğini kullanan bir grup araştırmacı [Guo vd., 2006] kıyılmış sığır etinde *E. coli* inaktivasyonunu sıcak su banyosunda yapılan işlemlerle karşılaştırarak incelemiştir. RF uygulamanın, proses zamanını su içerisindeki prosese göre 1/30 oranında azalttığı belirtilerek *E. coli* sayısında önemli bir azalma sağlanarak ürün raf ömrünün arttırıldığı ayrıca not edilmiştir. Bu çalışma RF uygulamanın mikrobiyal inaktivasyon kapsamında alternatif bir potansiyele sahip olduğuna da değinmektedir.

2.7. RADYO FREKANSI (RF) UYGULAMA MODELLEME ÇALIŞMALARI

Simülasyon, kısaca matematiksel modellerin kullanılarak tasarım ve optimizasyon çalışmalarına imkan veren bir yöntem olarak tanımlanabilmektedir. Diğer bir deyişle hesaplamalı matematiksel modellerle fiziksel olayları veya davranışları tahmin etmeye ve incelemeye yarayan bir metottur. Amaç taşınım

olaylarının gerçekleştiği bir sistemde proses sonuçlarının tahmin edilmesi ve bu proseslerin iyileştirilmesidir.

Matematiksel modeller gözleme dayalı veya fiziksel temelli olabilmektedir. Ancak, gözleme dayalı modellerin tahmin güçleri fizik temelli modellere göre düşük olup, fizik temelli modellerde taşınım olaylarını belirleyen momentum, enerji ve süreklilik eşitliklerinin başlangıç sınır koşulları ve ısıl fiziksel özelliklerle tamamlanarak çözülmesi gerekmektedir (Şekil 2.7). Bu nedenle fizik temelli matematiksel modellerle prosesler hakkında daha fazla bilgi edinilebildiğinden deney yapmaya gerek kalmadan, doğruluğu gösterilmiş modeller kullanılarak, farklı senaryolarla proses sonuçlarının tahmininde, proses tasarım ve optimizasyonunda ve kontrolünde kullanılabilir. Gıda proseslerinin matematiksel modellenmesi prosesin temel fiziksel mekanizmasına dayanmakta olup, bu fiziksel temeller kısmi diferansiyel denklemlerle tanımlanabilmektedir. Bu kapsamda, ısı transferi denklemlerinin çözümü ile sıcaklık dağılımı, kütle transferi denklemlerinin çözümü ile belirli bir bileşenin derişim dağılımı, momentum transferi denklemlerinin çözümü ile bir akışkanın içerisindeki hız ve momentum dağılımı belirlenerek bu sonuçlara dayalı mikrobiyal değişim kalite özelliklerinin değişimi gibi hesaplamalar da yapılabilmektedir [Erdoğan, 2013].



Şekil 2.7. Bir matematiksel modelin hazırlanma aşamaları [Erdoğan, 2013].

Sınır Koşulları:

Denkliklerin çözümü için sınır ve başlangıç koşulları tanımlanması gerekmektedir. Isı transfer problemlerinde sınır koşulları yüzey sıcaklığı, ısı akısı ve ısı transfer katsayısıdır. Elektromanyetik etkileşim olduğunda uygulanan voltaj değerlerinin ve gerekli elektriksel yalıtım durumlarının da ayrıca tanımlanması gerekmektedir.

Termal ve fiziksel özellikler:

Matematiksel modellemede kullanılacak olan ısısal ve fiziksel özellikler literatürden bulunabilir veya deneysel olarak elde edilebilir. Isı transfer katsayısı (k), özgül ısı kapasitesi (c_p) ve yoğunluk (ρ) gibi özellikler kondüksiyonla olan ısı transfer problemlerinde gerekli parametrelerdir. Elektromanyetik uygulamalarda ise, yukarıda da belirtildiği gibi, materyalin dielektrik özellikleri önemli olmaktadır (ϵ' dielektrik sabit ve ϵ'' dielektrik kayıp faktörü).

Diğer teknolojik uygulamalar için olduğu gibi bilgisayar simülasyonları gıdaların işlenmesi için RF ısıtma sistemlerin tasarımı için güçlü araçlardır. Tamamen deneysel çalışmaların yerini alması da bilgisayar simülasyonları RF ısıtma sistemlerinin dizaynı için gerekli bilgilerin elde edilmesinde sanal bir laboratuvar olarak kullanılabilir [Marra vd., 2009]. Deneysel çalışmalarla RF ısıtma sistemlerinde ısıtmanın uniform olmasını sağlayacak parametrelerin ayarlanması verimsiz ve daha maliyetli olduğu bilinmektedir. Deney yapmaya gerek kalmadan bilgisayar simülasyonları kullanılarak, RF ısıtma sistemlerinin karmaşık işleme mekanizması incelenerek, uniform bir ısıtmanın gerçekleştirilmesi için uygun bir araç olduğu belirtilmektedir.

RF sistemlerinin modellenmesi konusunda ilk çalışmalar sonlu elemanlar metoduyla dalga ve Laplace eşitlikleri çözülerek RF sistemlerinin içindeki elektriksel alanın modellenmesiyle yapılmıştır [Neophytu ve Metaxas, 1998; Neophytu ve Metaxas, 1999]. Diğer bir çalışmada alfalfa ve turp tohumları polistren kutuların

içine konularak RF ısıtma sistemiyle ısıtılıp sıcaklık dağılımları ticari bir yazılımla (TLM-FOOD HEATING) incelenmiştir. Geliştirilen model deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp modelin çalıştığı gösterilmiştir. [Yang vd., 2003]. Başka bir çalışmada sonlu eleman metoduna göre dalga eşitliklerini çözülerek RF ısıtma sistemi etkili bir şekilde modellenmiştir [Chan vd., 2004]. % 1'lik karboksimetil selülöz çözeltisi farklı boyutlarda ve pozisyonlarda RF ısıtma sisteminde deneysel olarak ısıtılıp modellerle karşılaştırıldığında iyi bir uyumun olduğu belirtilmiştir.

2 boyutlu bir modelleme çalışmasında silindirik bir et hamurları 27.12 MHz frekansında farklı güç değerleriyle RF sisteminde ticari bir yazılımda (FEMLAB) modellenip incelenmiştir [Marra vd., 2007]. RF sistemin gücü arttıkça üründeki sıcaklık dağılımında da farklılıkların arttığı belirtilmiştir. Diğer bir çalışmada 12 kW , 27.12 MHz RF sisteminde taze meyveler ısıtılıp FEMLAB ticari yazılımında sıcaklık dağılımı incelenmiş, dielektrik özelliklerin, ürünlerin şekli, ve konumu gibi özelliklerin üründeki sıcaklık dağılımını etkilediği görülmüştür [Birla vd. 2008].

RF sistemlerinde gıdaların ısıtılmasına ürün şeklinin (silindir, küre ve küp) ve ürünün pozisyonunun ısıtma hızına etkisi ve sıcaklık dağılımına olan etkisi RF uygulamanın 3 boyutlu bilgisayar modeli hazırlanarak teorik olarak analiz edilmiş ürün olarak et hamurunun dielektrik ve termal özellikleri kullanılmıştır [Romano ve Marra, 2010]. Çalışmada ürünün elektrotlara göre konumu ürünün güç absorpsiyonunun ve sıcaklık dağılımını etkilediği belirtilmiştir. Elektrotlara göre dikey konumdaki silindir örneğindeki sıcaklık dağılımının yatay konumdakine göre daha homojen olduğu rapor edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada ticari COMSOL yazılımında geliştirilen ve deneysel verilerle doğrulanan modelde 12 kW, 27.12 MHz 'te çalışan RF sisteminde buğday unu ısıtılarak, elektrotların konumunun, şeklinin ve diğer konfigürasyonların kuru gıda maddelerinin ısıtılmasında etkileri incelenmiştir. [Tiwari vd., 2011].

Heterojen özellikte 295 x 253 x 42 mm boyutlarında polimerik kutularda paketlenmiş etli lazanya 6-kW 27-MHz RF sistem kullanılarak ürünün sıcaklığını

20°C'den 121°C sıcaklığa getirilerek sterilizasyonu yapılmıştır. RF uygulamanın paketlenmiş gıdalarda kullanılabilmesini ve gıda ürününün kalite özelliklerini korunduğu belirtilmiştir. Ürünün dielektrik özelliklerinin elektriksel alana ve ısınmaya olan etkisini incelemek için bilgisayar modeli geliştirilmiştir [Wang vd., 2012].

Son yıllarda yapılan diğer bir çalışmada RF sisteminde ısıtılan ürünün büyüklüğünün çeşitli elektrot konfigürasyonlarındaki sıcaklık profili ve ısınma hızı, güç verimliliği COMSOL yazılımında 3 boyutlu model geliştirilerek incelenmiştir [Uyar vd., 2013]. Yapılan simülasyon çalışmalarında ürün boyutlarının ve miktarının yanı sıra elektrotlarla olan uzaklıklarının da önemli olduğu ve elektriksel alanın dağılımının buna göre değişiklik gösterdiği belirtilmiştir.

2.8. RADYO FREKANS (RF) UYGULAMADA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

RF uygulamaları gıda endüstrisinde bir çok alanda halen kullanılmasına rağmen önemli teknik problemleri de vardır. Bunlardan en önemlileri elektrotla ürün arasında oluşabilen ark ve dielektrik özelliklerden kaynaklanan lokal ısınmalardır. Her iki problemde gıda ürün kalitesine ve gıda güvenliğine yönelik önemli problemler olup çözdürme işleminde endüstriyel ve ticari kullanımlarını sınırlamaktadır. RF uygulamaların etkinliği gıda ürünün dielektrik özellikleri yanında sistemde oluşan elektriksel alan şiddeti, kullanılan frekans, elektrotların konumu gıda ürünün boyutları ve şekli gibi çok sayıda parametrelere bağlıdır.

2.8.1. Elektrik Ark oluşumları

Paketlenmiş ekmeklerin RF uygulamasıyla ısıtılması esnasında silindirik şekilde olan somun ekmeğinin yüzeyiyle üst elektrot arasında arklar oluştuğu [Cathcer vd., 1947] belirtilmektedir. Bunun üzerine ekmeğin yüzeyi köşelerin düzleştirilmesiyle giderilmiştir. Yüksek voltaj uygulaması nedeniyle 7,10, ve 30 MHz frekansında yapılan RF uygulama ile sebzelerin haşlanmasında üst elektrotla

sebzeler arasında ve ürün parçaları arasında ark oluşması sonucu üründe yanıklar oluştuğu başka bir çalışmada belirtilmektedir [Moyer ve Stotz, 1947]. Voltajın düşürülmesi ve elektriksel alan şiddetinin azaltılmasıyla ark oluşumu engellendiği yine aynı çalışmada rapor edilmektedir. Daha sonraki bir çalışmada üst elektrotla ürün arasında bırakılan boşluğun voltajı etkilediği ve ürün içerisinde elektriksel alan oluşumuna etkisi gösterilmiştir [Sanders 1966]. Ayrıca ürünü deiyonize su veya buzla çevreleyerek ark oluşumunun elektriksel alanın ürün boyunca daha etkili yayılmasını sağlayarak kontrol edilebileceği belirtilmiştir. İşlenmiş ve paketlenmiş deniz ürünlerinin ticari RF sisteminde ısıtılmasında da ark oluşumu ve lokal ısınmalar oluştuğu başka bir çalışmada rapor edilmiştir [Kolbe 1996].

2.8.2. Yerel Isınma Problemleri

Gıda ürünlerinin heterojen yapısı nedeniyle bileşenlerin dielektrik özelliklerindeki farklılık nedeniyle ürünün belirli yerlerinin hızlı ısınması sonucu oluşan bir problemdir. Dielektrik özelliklerin sıcaklığa bağımlı olduğu düşünüldüğünde problem daha iyi anlaşılabilir. Özellikle çözdürme işleminde donmuş gıdanın dielektrik özellikleri ile donmamış gıdanın dielektrik özellikleri farklı olmakta gıdanın çözülen kısımlarının dielektrik özellikleri nedeniyle daha hızlı ısınmaya başlamaktadır. Bunun sonucunda çözülen kısımlar çözünmeyen bölgelere göre daha fazla ısınmaktadır.

Bu kapsamda RF sistemin elektrotlar arasında uygulanan voltajla elektriksel alan oluşumu bilgisayar modelleme çalışmalarıyla ayrıntılı olarak analiz edilip ark ve lokal ısınma sorunlarının oluşumunu engelleyecek ve homojen bir ısınmayı gerçekleştirecek çalışmalarının literatürdeki bu konudaki (RF ile gıdaların çözdürmenin modellenmesi) eksikliği gidereceği düşünülmektedir. Bilgisayarda 3 boyutlu çoklu fiziksel modelleme ile deneylerle elde edilmesi güç olan sayısal ve görsel bilgilere (ürün ve sistem içi elektriksel alan dağılımı, elektromanyetik güç emilimi, sıcaklık dağılımı) erişilmesi daha kolaylaşacak ve sonraki çalışmalar için örneğin endüstriyel RF çözdürme sistemlerinin tasarımlarının yapılmasında ve gıda ürünlerine göre özelleştirilmesinde kullanılabilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında, öncelikle faz değişimi içermeyen bir RF sistem uygulamasının 2-boyutlu aksi-simetrik modeli geliştirilmiş, ağ bağımsızlık çalışmaları yapılmış ve model sonuçları literatür verileriyle [Marra vd., 2007] karşılaştırılarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu bölümde model geliştirme çalışmaları literatür verilerine bağlı olarak 50 Ω 'luk bir RF sistem için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, RF ısıtma işlemi sırasında ürün boyutunun etkileri de incelenmiştir.

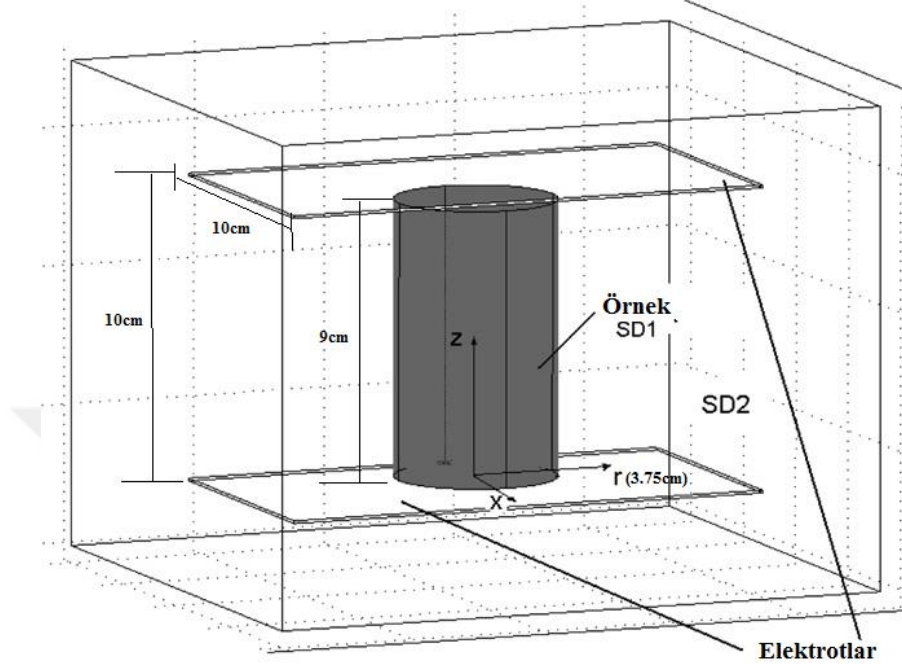
Daha sonraki aşamada, faz değişimini de içeren 3 boyutlu bir çözdürme modeli geliştirilmiş, ağ bağımsızlık çalışmaları tamamlandıktan sonra model literatür [Frag vd., 2008] verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde geliştirilen model doğrulama çalışmaları yine faz değişimi içermeyen sistem örneğinde olduğu gibi literatür verileri kullanılarak 50 Ω 'luk bir RF sisteme göre yapılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde ise geliştirilen 3 boyutlu faz değişimini içeren çözdürme modeli, serbest salınımlı bir sistem geometrisine göre modifiye edilmiş, ağ bağımsızlık çalışmaları da tamamlandıktan sonra model doğrulama çalışmalarında deneysel veriler kullanılmıştır. Model geliştirme çalışmaları COMSOL (Comsol V. 3.5 ve V. 4.4, Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik programı kullanılarak yapılmıştır.

3.1. FAZ DEĞİŞİMİ İÇERMİYEN 2-BOYUTLU AKSİ-SİMETRİK YAKLAŞIMLA YAPILAN MODELLEME ÇALIŞMALARI

Şekil 3.1a'da literatür verilerinin [Marra vd., 2007] kullanıldığı 50 Ω 'luk RF sistem ve bu verilerle oluşturulan 2 boyutlu aksi-simetrik geometrik model (Şekil 3.1b) görülmektedir. COMSOL (Comsol V. 3.5, Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik modülü kullanılarak hazırlanan bu model de literatürden alınan veriler kullanılarak model geliştirme ve doğrulama çalışmaları yapılmış, bu kapsamda RF

ısıtma işleminin modellenmesi kapsamında öngörülen farklı simülasyonlar kullanılmıştır.



Şekil 3.1 (a).



Şekil 3.1 (b)

Şekil 3.1. Radyo frekansı sistem içerisinde (a) elektrotlar arasında yerleştirilmiş örnek [Marra ve ark., 2007]; (b) bu sistem için hazırlanan 2 boyutlu aksi-simetrik geometrik model (uzunluk birimi m olarak alınmıştır).

Marra vd. [2007] tarafından yapılan bu çalışmada, çalışma frekansı 27.12 MHz olan, maksimum 600 W gücünde çalışan özel yapım bir 50 Ω (C-Tech Innovation, Chester, UK) RF sistem kullanılmıştır. Bu sistemde, Şekil 3.1a'da görüldüğü gibi elektriksel olarak izole edilmiş bölmenin içinde, RF enerjisini paralel elektrotlarla sağlayan ve elektrotlar arasında 100 mm uzaklık bulunan koşullarda bir et ürünü ısıtılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Farklı güçlerde (100, 200, 300 ve 400 W) yapılan simülasyonlarla üründe RF ısıtma prosesi sırasında oluşan sıcaklık değişimi incelenmiş ve uygulanan güç değeri arttıkça ürün içi sıcaklık dağılımının homojenliğinin azaldığı belirtilmiştir [Marra vd., 2007].

Bu çalışmada rapor edilen veriler kullanılarak hazırlanan 2 boyutlu aksisimetrik model (Şekil 3.1b) 200 W güç sınır koşulu kullanılarak Marra vd. [2007] tarafından rapor edilen verilerle, bu tez çalışması kapsamında doğrulanmış ve geliştirilen RF ısıtma modelinin problemsiz olarak çalıştığı gösterilmiş ve RF sistemlerde ürün boyutlarının ürün sıcaklık değişimi ve güç emilimine etkisi de gösterilmiştir.

3.1.1. Matematiksel Model

Yukarıda açıklanan model kapsamında, 50 Ω 'luk RF sistemde elektrotlar arasına yerleştirilen bir örneğin ısıtılması sırasında elde edilen sıcaklık değişimi, çoklu - fizik problemi olarak ele alınmış ve elektromanyetik eşitlikler quasi - statik yaklaşım kullanılarak kondüksiyonla olan ısı transferi denkleğinin birlikte çözülmesiyle elde edilmiştir. Elektromanyetik alan değişim dinamiği örnek içerisindeki ısı transfer hızından daha çabuk gerçekleştiğinden, elektrotlar arasındaki elektriksel alan değişimi quasi - statik olarak kabul edilmiştir.

3.1.2. Temel Denklikler

Sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan değişimi ile ürün sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla çözülen denklemler sırasıyla aşağıda verilmiştir:

Isı transferi denkliği:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\alpha \cdot \nabla T) + \frac{Q_{abs}}{\rho \cdot c_p} \quad (3.1)$$

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

$$Q_{abs} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot |\bar{E}|^2 \quad (3.2)$$

3.2' nolu denklikte, f radyo frekansı jeneratörünün frekansını, ϵ_0 serbest uzayın geçirgenlik sabiti değerini $\left(8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}\right)$, ϵ'' ürünün bağlı dielektrik kayıp faktörünü ve $|\bar{E}|$ ise elektriksel alan modülünü $\left(\frac{V}{m}\right)$ göstermektedir.

Absorbe edilen RF güç (Q_{abs}) değerinin bulunabilmesi için elektriksel alan modülü, dielektrik kayıp faktörü, kullanılan RF jeneratörün frekansı ve elektriksel alan dağılımının bilinmesi gerekmektedir. RF sistemlerde kullanılan elektromanyetik dalgaların dalga boyu (27.12 MHz frekansında) $\sim 11m$ $\left(\lambda = \frac{3 \times 10^8}{27.12 \times 10^6} = 11.06m\right)$ olduğundan ve RF sistem boyutuna göre çok büyük olduğundan Maxwell eşitlikleri manyetik alan etkisi ihmal edilerek sadece Laplace eşitliğine indirgenebilmektedir. Bunun sonucunda RF sistemin içerisinde statik bir elektriksel alan olduğu kabul edilmektedir. Bu noktada, sistem içerisindeki elektriksel alan dağılımı Maxwell denkliğinden quasi-statik yaklaşımı ile elde edilen Gauss denkliğinin çözülmesiyle elde edilmiştir:

$$\nabla(\varepsilon \cdot \bar{E}) = 0 \quad (3.3)$$

Bu denklikte ε ürünün geçirgenliği (permittivity) ve \bar{E} ise elektriksel alanı değerini göstermektedir. Belirtilen denkliklerin çözümünde kullanılan başlangıç ve sınır koşulları ise aşağıda verilmiştir.

Gauss ve ısı transfer eşitliğinin aynı anda çözümü amacıyla, yukarıda da belirtildiği gibi, sonlu eleman metodunu kullanan bir çoklu-fizik yazılımı olan COMSOL (Comsol V. 3.5, Comsol AB, Stockholm, Sweden) kullanılmıştır. COMSOL kullanılarak yapılan sayısal çözümü sırasıyla;

- Şekil 3.1b'de görülen sistem ve içerisindeki ürünün geometrisinin oluşturulması,
- Elektriksel alan etkisiyle oluşan ısı transferinin gerçekleştiği bölgelerin belirlenmesi,
- Sınır koşullarının uygulanması ile termofiziksel ve dielektrik özelliklerin tanımlanarak ağ yapısının oluşturulması aşamalarından oluşmuştur.

3.1.3. Başlangıç ve Sınır Koşulları

Gauss denkliği kullanılarak elektriksel alanın belirlenmesi kapsamında kullanılan sınır koşulları:

- Üst elektrot voltaj değeri, uygulanan 27.12 MHz frekansında, voltaj değeri sabit bir değer, $\left(P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{P}{R}} \Rightarrow V = \sqrt{200.50} = 100V \right)$, ($V=100V$)
- Alt elektrotun voltaj değeri ise topraklama yaklaşımı ile ($V=0$) olarak kullanılırken,
- Sistem dış yüzeyinin elektriksel olarak yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir ($\nabla \bar{E} = 0$).

Örnek içerisinde sıcaklık dağılımını belirlemek için kullanılan sınır şartları ise:

- Ürün yüzeyinde konveksiyon sınır koşulu kullanılmıştır

-

$$-k \cdot \nabla T = h \cdot (T - T_{air}) \quad (3.4)$$

Bu denklikte h ısı transfer katsayısını $\left(h = 15 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$, ve T_{air} ise sistem

içerisindeki havanın sıcaklık değerini ($T_{air} = 293.15 K$) göstermektedir.

- Başlangıç koşulu olarak ürün içi sıcaklığın homojen olduğu kabul edilmiştir ($T_0 = 282.15 K$).

3.1.4. Termofiziksel ve Dielektrik Özellikler

Faz değişimi olmadan 2-boyutlu aksi-simetrik yaklaşımla yapılan modelleme çalışmasında kullanılan diğer termofiziksel ve dielektrik özellikler Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Modelleme çalışmasında kullanılan termofiziksel ve dielektrik özellikler [Marra vd. 2007].

Isıl yayılım katsayısı - $\alpha \left(\frac{m^2}{s} \right)$	$6.3 \times 10^{-10} \cdot T + 6.6435 \times 10^{-8}$
Yoğunluk - $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	1057
Özgül ısı - $c_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	3600
Dielektrik sabiti - ϵ'	$0.0011 \cdot T^2 - 0.5531 \cdot T + 109.43$
Dielektrik kayıp faktörü- ϵ''	$-0.0058 \cdot T^3 + 5.32 \cdot T^2 - 1609.1 \cdot T + 161643$

3.2. FAZ DEĞİŞİMİNİ İÇEREN 3 BOYUTLU MODELLEME ÇALIŞMALARI

Faz değişimi içermeyen, RF ısıtma prosesi kapsamında, 2-boyutlu aksisimetrik yaklaşımla yapılan modelleme ve ağ bağımsızlık çalışmaları tamamlanıp, model sonuçları literatür verileri ile doğrulandıktan sonra, faz değişimini de içeren 3-boyutlu modelleme çalışmaları yapılmıştır. Faz değişimini de içeren 3-boyutlu modellerin doğrulama çalışmalarını içeren deneysel çalışmalar bölümü ise iki aşamada tamamlanmıştır.

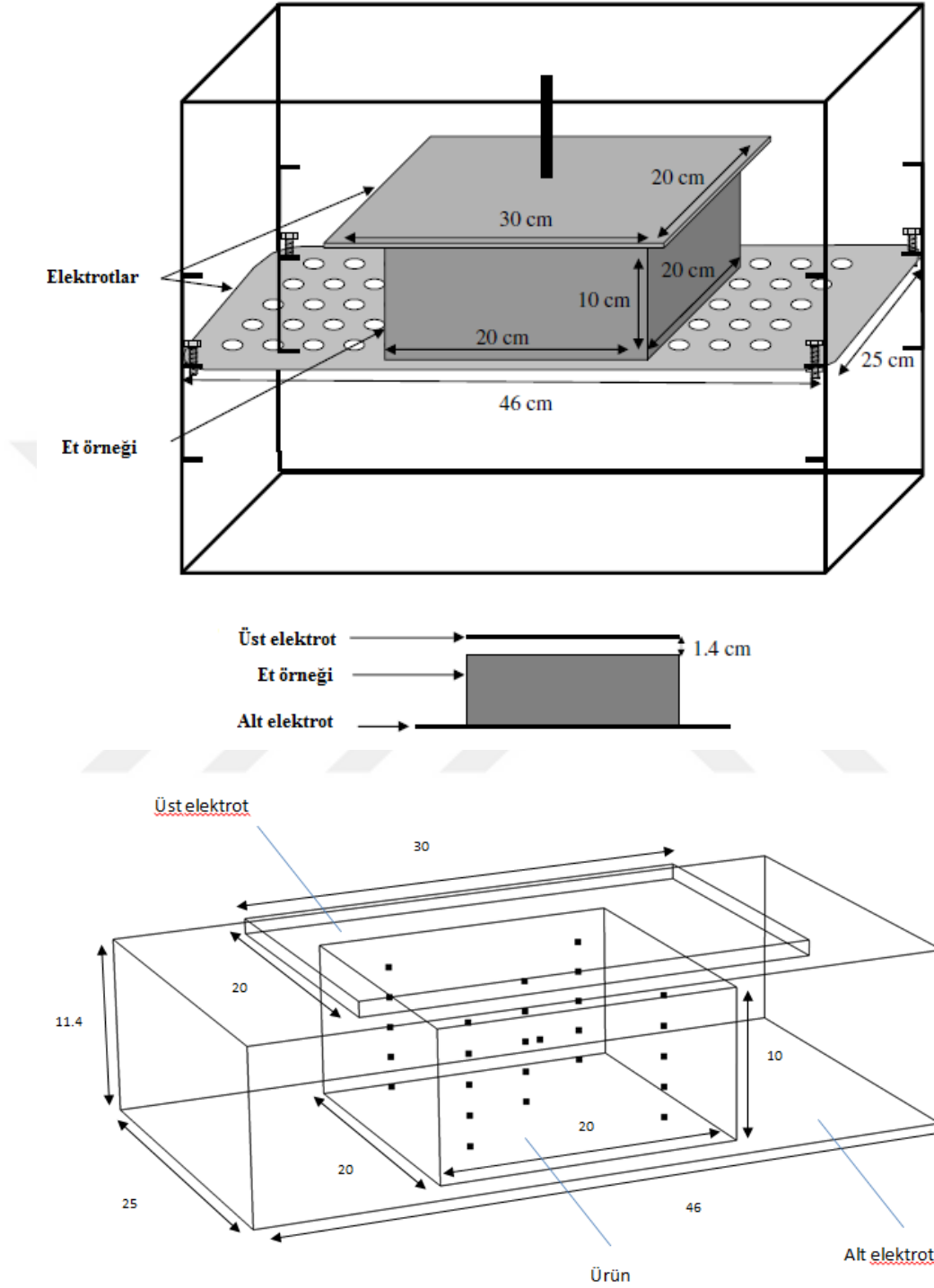
Deneysel verilerle doğrulama çalışmalarının birinci aşamasında, literatürde bulunan Farag vd. [2008, 2011] tarafından yapılan bir çalışmanın sonuçları kullanılarak model doğrulama çalışması tamamlanmıştır. Şekil 3.2’de bu çalışmada [Farag vd., 2008], dondurulmuş et ürünlerinin çözdürülmesinde kullanılan RF sisteminin (Crystal Oscillator Source Matched Impedance Generator system) geometrik çizimi görülmektedir. Bu çalışmada özel yapım 50 Ω tipinde (C-Tech Innovation, Chester, UK) 600 W gücünde ve 27.12 MHz frekansta çalışan bir RF sistem kullanılmıştır. Çalışmada çözdürme amacıyla kullanılan dondurulmuş et blokunun boyutları 20 \times 20 \times 10 cm olup ürünle üst elektrot arasındaki uzaklık 1.4 cm olarak uygulanmıştır. Model doğrulama amacıyla, ürün sıcaklık değişimi Farag vd. [2008] tarafından da uygulandığı gibi 25 farklı noktadan (Şekil 3.2b) elde edilen sıcaklıkların ortalama değeri olarak elde edilmiş ve sonuçlar model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.2.1. Matematiksel Model

Faz değişimini içeren, 3-boyutlu matematiksel model bölüm 3.1.1’de de detaylı olarak verilen yaklaşımlarla, faz değişimi sırasında özgül ısı değerinde gerçekleşen değişim eklenip, deneysel olarak belirlenen başlangıç ve sınır koşulları tanımlanarak hazırlanmıştır.

3.2.2. Temel denklemler

Belirtilen kapsamda çözülen denklemler bölüm 3.1.1.1’de verilen denklemlerle aynı olup sadece 3-boyutlu geometriye uygulanacak kapsamda kullanılmışlardır.



Şekil 3.2. Farag vd. (2008) tarafından kullanılan deneysel kurulum ve sistemin şematik görünümü (uzaklıklar cm olarak verilmiştir).

3.2.3. Başlangıç ve sınır koşulları

Faz değişimi içermeyen modelleme bölümünde de açıklandığı şekilde, Gauss denkliği kullanılarak elektriksel alanın belirlenmesi kapsamında aşağıda belirtilen sınır koşulları uygulanmıştır:

- Üst elektrot voltaj değeri: Şekil 3.2'de verilen sistem için uygulanan 27.12 MHz frekansında, $\left(P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{P}{R}} \Rightarrow V = \sqrt{400.50} = 141.42V \right)$ sabit bir değer $V=141.42$ V olarak kullanılmıştır.
- Alt elektrot voltaj değeri topraklama yaklaşımı ile ($V=0$) olarak kullanılmıştır.
- Sistem dış yüzeyinin elektriksel olarak yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir ($\nabla \bar{E} = 0$).

Et örneği sıcaklık dağılımını belirlemek için kullanılan sınır şartları:

- Ürün yüzeyinde konveksiyon sınır koşulu sınır koşulu kullanılmış ve (eşitlik 3.4) ve Şekil 3.2a'da verilen sistem için ısı transfer katsayısı değeri $\left(h = 15 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ ve ortam sıcaklık değeri ($T_{air} = 293.15 K$) olarak kullanılmıştır.
- Başlangıç koşulu olarak ürün içi sıcaklık değişiminin sabit - homojen olduğu kabul edilmiştir ($T_0 = 256.84 K$).

Gauss ve ısı transfer eşitliğinin aynı anda çözümü amacıyla, yukarıda da belirtildiği gibi sonlu eleman metodunu kullanan COMSOL (Comsol V. 4.3b, Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik yazılımı kullanılmıştır.

3.2.4. Termofiziksel ve Dielektrik Özellikler

Çizelge 3.2'de Farag vd. [2008] tarafından RF ile çözdürme çalışmasında kullanılan et örneğinin bileşenleri görülmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen matematiksel modelde kullanılan özgül ısı değeri, Çizelge 3.3'de verilen eşitlikler doğrultusunda, et örneği için belirtilen su, yağ, protein, karbonhidrat ve kül

bileşenlerinin özgül ısı değerleri kullanılarak sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanmıştır:

$$c_p = \sum_{i=1}^N (c_{pi} \cdot X_i) \quad (3.5)$$

Bu denklikte i et örneğinin bileşenlerini, X_i ise ilgili bileşenin % oranını göstermektedir. Faz değişimini de içeren 3-boyutlu modelleme çalışmalarında kullanılan diğer termofiziksel (ısı iletim katsayısı ve yoğunluk) ve dielektrik özellikler Çizelge 3.4’de verilirken, Şekil 3.3’de simülasyonlarda kullanılan sıcaklığa bağlı dielektrik ve termofiziksel özellikler (sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı; dielektrik sabiti değeri ve dielektrik kayıp faktörü değeri) gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Modellemede kullanılan etin yüzde bileşenleri [Farag vd., 2008].

Bileşen	İçerik (%)
Su	67.8
Yağ	11.8
Protein	17.9
Karbonhidrat	1.7
Kül	0.8

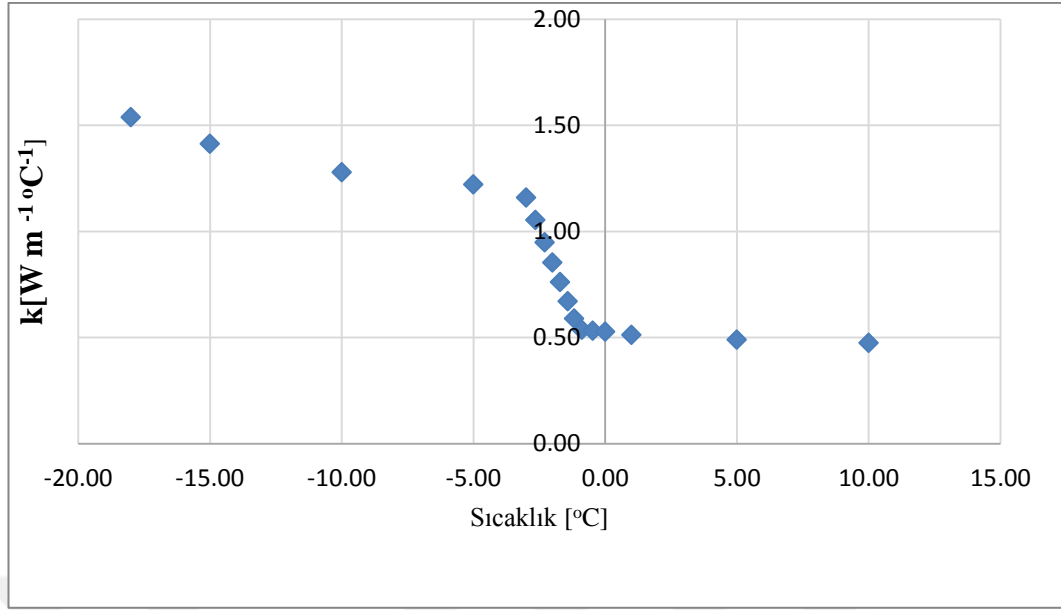
Çizelge 3.3. Gıda bileşenlerinin sıcaklığa bağlı özgül ısı denklikleri ($-40 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$) [Choi ve Okos., 1986].

Özgül ısı (J/kg-K)	Protein	$2.0082 \times 10^3 + 1.2089T - 1.3129 \times 10^{-3}T^2$
	Yağ	$1.9842 \times 10^3 + 1.4733T - 4.8008 \times 10^{-3}T^2$
	Karbonhidrat	$1.5488 \times 10^3 + 1.9625T - 5.9399 \times 10^{-3}T^2$
	Fiber	$1.8459 \times 10^3 + 1.8306T - 4.6509 \times 10^{-3}T^2$
	Kül	$1.0926 \times 10^3 + 1.8896T - 3.6817 \times 10^{-3}T^2$
	Su	$4.1762 \times 10^3 - 9.0864 \times 10^{-2}T + 5.4731 \times 10^{-3}T^2$
	Buz	$2.0623 \times 10^3 + 6.0769T$

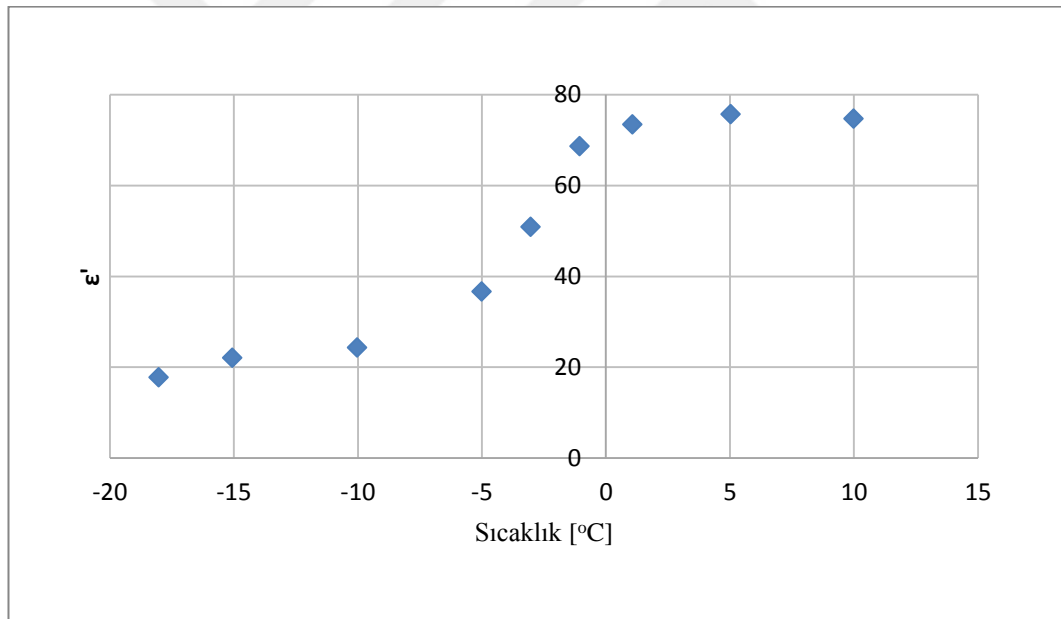
Çizelge 3.4. Faz değişimini de içeren 3-boyutlu modelleme çalışmalarında kullanılan termofiziksel ve dielektrik özellikler [Farak vd., 2008].

Özellik		Değer
Örneğin donmuş fazda yoğunluğu	ρ_{fro}	961 [kg m ⁻³]
Örneğin donmamış fazda yoğunluğu	ρ_{unfr}	1053 [kg m ⁻³]
Örneğin ısı iletim katsayısı değeri*	k	k(T)
Örneğin donmamış fazda ısı kapasitesi	cp_{unfr}	3.4974[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
Örneğin donmamış fazda ısı kapasitesi	cp_{fro}	1.9352[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
Görünür ısı kapasitesi değeri*	cp_{app}	$c_p(T)$
Geçiş aralığı sıcaklık değeri	dT	1.5[K]
Başlangıç çözünme sıcaklığı	T_{m1}	271.65[K]
Son çözünme sıcaklığı	T_{m2}	273.15[K]
Gizli ısı	Lm	334×0.675[J kg ⁻¹]
Nem içeriği	%	67.5
Dielektrik sabiti değeri*	ϵ'	$\epsilon'(T)$
Dielektrik kayıp faktörü değeri*	ϵ''	$\epsilon''(T)$
Serbest uzay geçirgenliği değeri	ϵ_0	8.85×10 ⁻¹² [F m ⁻¹]

*Sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmış ve şekil 3.3'de gösterilmiştir.

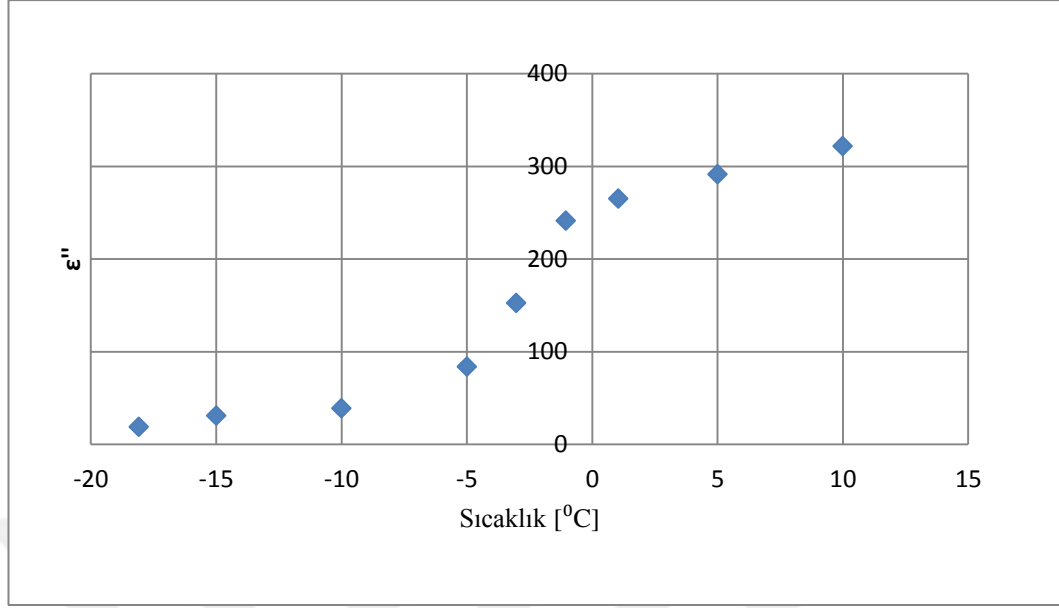


Şekil 3.3 (a)



Şekil 3.3 (b)

Şekil 3.3. devamı...



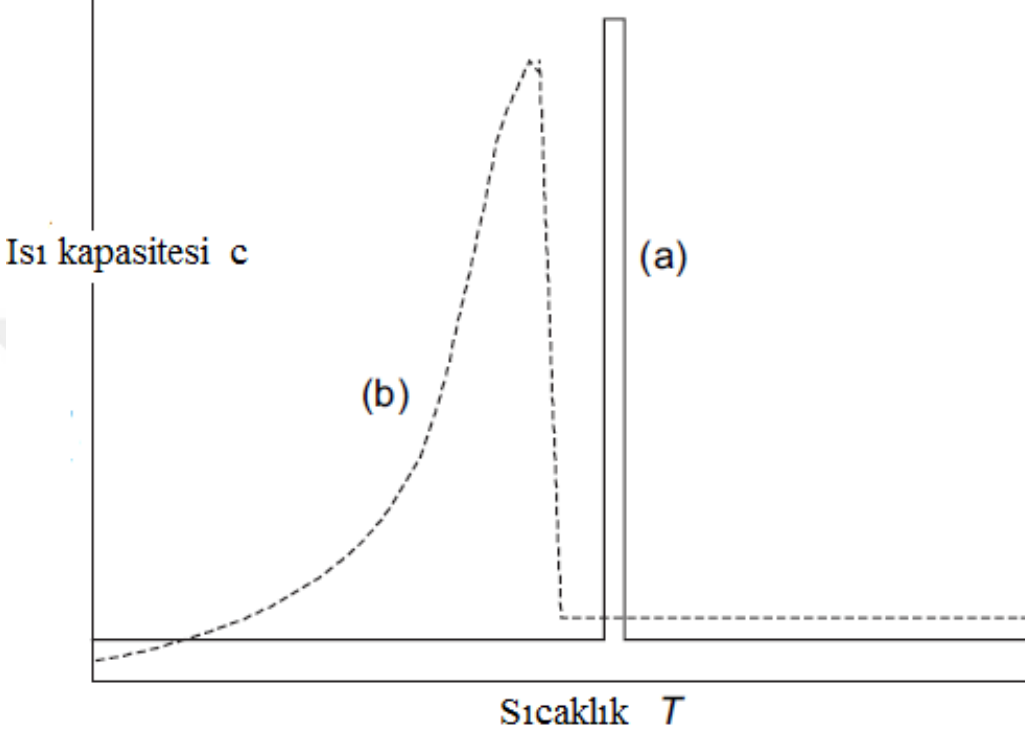
Şekil 3.3 (c)

Şekil 3.3. Simülasyonlarda kullanılan sıcaklığa bağlı (a) ısı iletim katsayısı; (b) dielektrik sabiti değeri; (c) dielektrik kayıp faktörü değeri [Farag vd., 2008].

3.2.5. Faz Değişiminin Modellenmesi

Isı transfer eşitliklerinin sayısal çözümlemesinde en büyük problemlerden birisi faz değişimi bölgesinde, dar bir sıcaklık aralığında, çok yüksek değerlerde özgül ısı ortaya çıkmasıdır. Bu nedenle, bu problemi çözebilmek amacıyla entalpi metodu kullanılmaktadır. Sayısal yöntemlerde faz değişim problemlerinin çözümü 2 şekilde ele alınmaktadır (hareketli ağ yapısı ve hareketsiz ağ yapısı) [Pham, 2006]. Hareketli ağ yapısında ürün donmuş donmamış bölgelere ayrılarak burdaki ağ elemanları, donmuş ve donmamış bölgelere hareket edebilmektedir. Hareketli ağ yapısı sayısal çözümlerde başarılı sonuçlar vermekte fakat gıda ürünlerinin karmaşık içeriğinden dolayı faz değişiminin olduğu sıcaklık aralığının kesin olarak belirlenmesi için deneysel yöntemlerin kullanımına gerek duyulmaktadır [Pham, 2006]. Bu nedenle hareketsiz ağ yapısının kullanımı tercih edilmektedir. Hareketsiz ağ yapısında yaygın olarak kullanılan 2 yöntem vardır: görünür özgül ısı kapasitesi yöntemi ve entalpi yöntemi. Ancak, COMSOL (Comsol V. 4.3b, Comsol AB, Stockholm, Sweden)

çoklu fizik yazılımı, farklı kısıtlamalarından dolayı entalpi yöntemin kullanımına olanak vermemektedir. Bu nedenle, faz değişimi modelleme çalışmalarında tercih edilen entalpi yöntemi bu çalışma kapsamında kullanılamamıştır.



Şekil 3.4. Görünür özgül ısı kapasitesi (a) dar bir aralıkta gerçekleşen faz değişimi (b) geniş bir aralıkta gerçekleşen bir faz değişimi [Pham 2006].

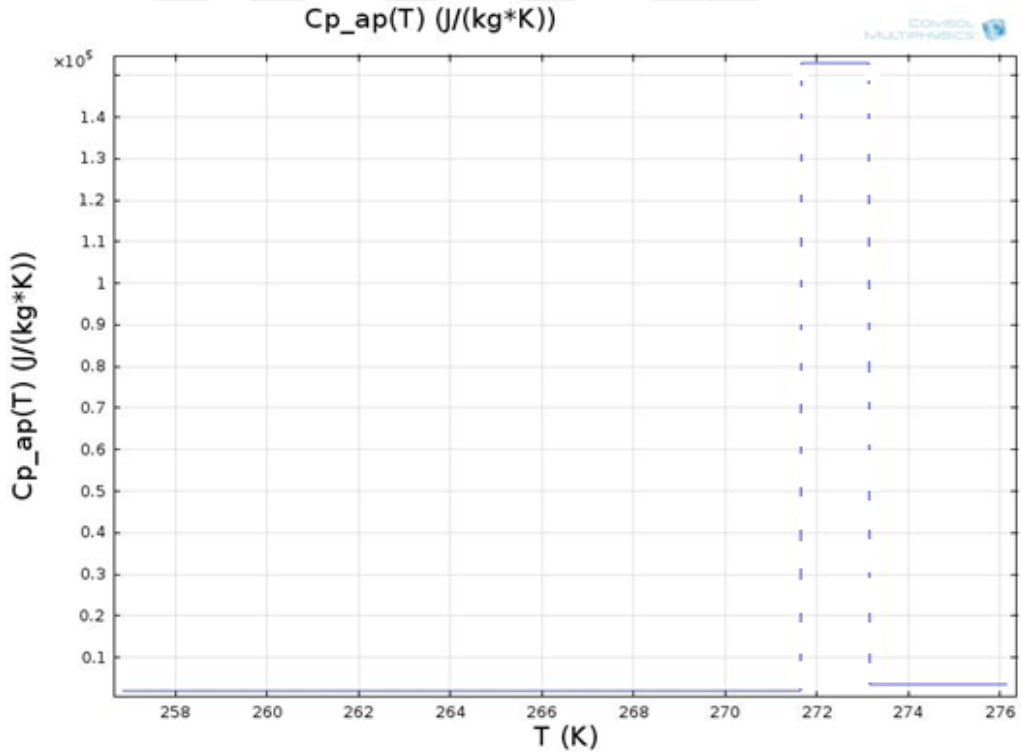
Faz değişiminin modellenmesi kapsamında tercih edilen görünür özgül ısı kapasitesi yöntemi, özgül ısı değerini sıcaklığa bağlı bir değişken olarak ifade edip faz değişiminin gerçekleştiği sıcaklık aralığında bir zirvenin oluştuğunu varsayarak matematiksel bir step fonksiyon kullanımına dayanmaktadır (Şekil 3.4). Bu yöntemin kullanımında, faz değişim bölgesinde özgül ısı değerinde çok keskin değişimlerin olmasına bağlı olarak, özgül ısı değerinin gerçek değerinden farklı kullanılabilmekte ve bu da sonuçların belli bir hata payı ile elde edilmesine sebep olmaktadır. Bu yöntemin uygulamasında, özgül ısı değerlerinin modelleme bölümünde doğru bir şekilde kullanılabilmesi için, Groulx [2009] tarafından kullanılan yöntem tercih edilmiş ve faz değişiminde gerekli olan gizli ısı da özgül ısı hesaplamasına dahil edilerek özgül ısı kapasitesi fonksiyonu eşitlik 3.6, 3.7 ve 3.8 ile tanımlanmıştır.

$$T \leq T_{m1}, C_P = C_{P_{fro}} = 1935.2 \quad (3.6)$$

$$T_{m1} < T \leq T_{m2} C_P = \frac{C_{P_{unf}} + C_{P_{fro}}}{2} + \frac{L_m}{T_{m2} - T_{m1}} = 153016.3 \quad (3.7)$$

$$T > T_{m2}, C_P = C_{P_{unfr}} = 3497.4 \quad (3.8)$$

Bu denkliklerde, T_{m1} ve T_{m2} faz değişiminin gerçekleştiği başlangıç ve son sıcaklık değerlerini, L_m örneğin gizli ısı değerini, C_{pfr} ve C_{punf} örneğin donma noktası üstünde ve altındaki sabit kabul edilen ısı kapasitesi değerini göstermekte olup ve hesaplama yöntemleri yukarıda açıklanmıştır. Şekil 3.5 bu kapsamda modelleme çalışmalarında kullanılan özgül ısı değerinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 3.5. Sıcaklığın fonksiyonu olarak kullanılan görünür özgül ısı kapasitesi değeri.

3.3. SERBEST SALINIMLI RF SİSTEMDE ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN MODELLENMESİ

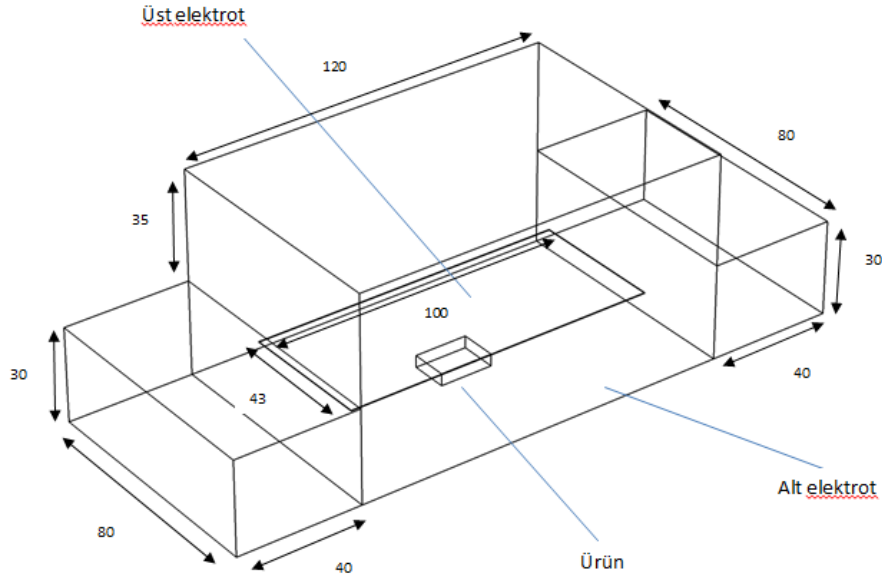
RF uygulamalarında kullanılan 50Ω ve serbest salımlı sistemler endüstriyel olarak kullanılabilen iki farklı tasarıma sahip sistemlerdir. Bu iki sistemin, frekans stabilitesi ve elektro manyetik uyumluluk kriterlerine uygun olduğundan, gıda proseslerinde kullanımları yaygındır [Orsat ve Raghavan, 2005]. Bu iki sistemden, serbest salımlı sistemler düşük maliyetleri ve basit sistem yapıları ile yaygın olarak kullanımları tercih edilen sistemlerdir. Diğer yandan 50Ω sistemler ise frekans ve güç kontrolünde daha etkin olan yöntemler kullanmaktadır [Jiao vd., 2014].

Literatür verileri kullanılarak 50Ω bir sistem için model geliştirme ve doğrulama çalışmaları tamamlandıktan sonra, Şekil 3.6'da görülen geleneksel serbest salımlı bir RF sistemde (Sonar, Izmir, Turkey) çözdürme işlemi sırasında sıcaklık değişimlerinin belirlendiği bir model geliştirilip model sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde Çizelge 3.2. ve Şekil 3.3'te sıcaklığa bağlı olarak verilen dielektrik ve termofiziksel özellikler kullanılmış, model yeni geometri ve sınır koşullarına göre oluşturulmuş ve ağ bağımsızlık çalışmaları tamamlandıktan sonra model doğrulama deneyleri yapılmıştır.

Bu bölümde geliştirilen matematiksel model bölüm 3.1.1'de özetlenen yaklaşımlar kullanılarak, bölüm 3.1.1.1'de verilen denkliklerin Şekil 3.6'da gösterilen 3-boyutlu geometrik sistemden elde edilen başlangıç ve sınır koşullarının uygulanmasıyla hazırlanmıştır. Serbest salımlı sistemlerde üst elektrot voltaj değeri, 50Ω sistemlerde olduğu gibi, direkt olarak basit bir hesaplama yolu ile belirlenemediğinden, literatürde önerildiği [Birla vd., 2008] şekilde deneysel veriler kullanılarak deneme - yanılma yöntemi kapsamında belirlenmiştir. Alt elektrotun voltaj değeri için yine topraklama yaklaşımı ($V = 0$) kullanılmış ve RF sistemin dış yüzeyinin elektriksel olarak yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir ($\nabla \bar{E} = 0$).



Şekil 3.6 (a)



Şekil 3.6 (b)

Şekil 3.6. (a) Modelleme çalışmalarında kullanılan serbest salımlı radyo frekans sistemi (2 kW - 27.12 MHz); (b) bu sistemin şematik gösterimi (uzaklıklar cm olarak verilmiştir).

Donmuş et örneği sıcaklık dağılımını belirlemek için kullanılan sınır şartları olarak ise ürün yüzeyinde konveksiyon sınır koşulu kullanılmış; ısı transfer katsayısı $\left(h = 5 \frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ ve ortam sıcaklık değeri de $(T_{air} = 301.65 K)$ olarak kullanılmıştır. Başlangıç koşulu olarak sistem içi sıcaklık değişiminin sabit - homojen olduğu $(T_0 = 259.65 K)$ kabul edilmiştir. Termofiziksel ve dielektrik özellikler Çizelge 3.2. ve Şekil 3.3'te verildiği şekilde kullanılırken faz değişiminin modellenmesi amacıyla yine görünür ısı kapasitesi değeri yöntemi uygulanmıştır.

Şekil 3.6'da gösterilen, serbest salımlı RF sistem geometrisinin bütün detaylarıyla modellenmesi kapsamında yapılan simülasyonların, yoğun ağ yapısından dolayı çok uzun hesaplama süresine ihtiyaç duyduğu, ön çalışmalarla belirlenmiştir. Bu kapsamda sistem geometri basitleştirilmiş ve sadece elektrotlar arasında kalan bölgenin geometrisi oluşturularak elde edilen sonuçlar bütün sistem sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, üst elektrot üzerinde olan açık bölgede de elektromanyetik yayınımlar olduğunu göstermiş ve bu farkın sistem tasarımı açısından önemli olabileceği de ayrıca vurgulanmıştır. Tam boyutlu sistem sonuçlarının geometrisi basitleştirilmiş sistem sonuçları ile karşılaştırılması Bulgular ve Tartışma bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.

3.4. MODELLEME KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALARA BİR BAKIŞ

Belirtildiği gibi, Gauss ve Fourier ısı transfer eşitliklerinin eş zamanlı çözülebilmesi amacıyla sonlu eleman yöntemine dayalı bir çoklu – fizik yazılımı olan COMSOL (Comsol V. 4.3b, Comsol AB, Stockholm, Sweden)'un Isı transfer (Heat Transfer) modülü ve AC/DC modülü çözüm amacıyla kullanılmıştır.

Sayısal bir çözümlenme çalışması için önemli aşamalar sistem geometrisinin tanımlanması, geçerli taşınım eşitliklerinin belirlenmesi, bu eşitliklerin çözümü için sınır koşullarının ve termofiziksel ve dielektrik özelliklerin uygulanması, geometri ağ yapısının (meshing) oluşturulması, çözücünün seçilmesi ve problemin çözümü olarak sıralanabilir. Bu kapsamda simülasyon çalışmaları, Intel Core i7 CPU Q720 @ 1.60

GHz (Intel, Santa Clara, CA, USA) işlemciye ve 24 Gb DDR3 hafızaya sahip Windows 7 Profesyonel işletim sistemiyle çalışan iş istasyonları kullanılarak yapılmıştır.

3.4.1. Voltaj Belirleme Simülasyonları

Yukarıda da belirtildiği gibi, serbest salımlı RF sistemlerinde sistem içi elektrik alanı dağılımını ve ürün sıcaklık dağılımını etkileyen en önemli parametre üst elektrot voltaj değeridir [Zhu vd., 2014]. Ancak, bu sistemlerin çalışma prensibi temelinde, bu sistemlerde üst elektrot voltaj değeri 50Ω sistemlerde olduğu gibi basit denklıklar kullanılarak belirlenmemektedir. RF Sistem çalışır durumdayken voltajın belirlenmesinin zor bir işlem olduğunda ayrıca belirtilmekte ve üst elektrot voltaj değerinin belirlenmesi için deneme yanılma yöntemi tercih edilebilmektedir. Bu kapsamda, farklı üst elektrot voltaj değerleri uygulanarak elde edilen sıcaklık profilleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak voltaj değerinin belirlenmesine çalışılmaktadır [Alfaifi vd., 2014]. Ayrıca bu sistemlerine çalışmaları ile tam çalışır duruma gelmelerine kadar geçen sürede % 7 oranında voltaj değişimi olduğu halde sabit bir voltaj değerinin uygulanabileceği varsayımı da literatürde rapor edilmektedir [Tiwari vd., 2011; Birla vd., 2008]. Bu çalışmada da, kullanılan serbest salımlı sistemde, üst elektrot voltaj değerini belirlemek amacıyla farklı voltaj değerleri kullanılarak elde edilen model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılarak üst elektrot voltaj değeri belirlenmiştir.

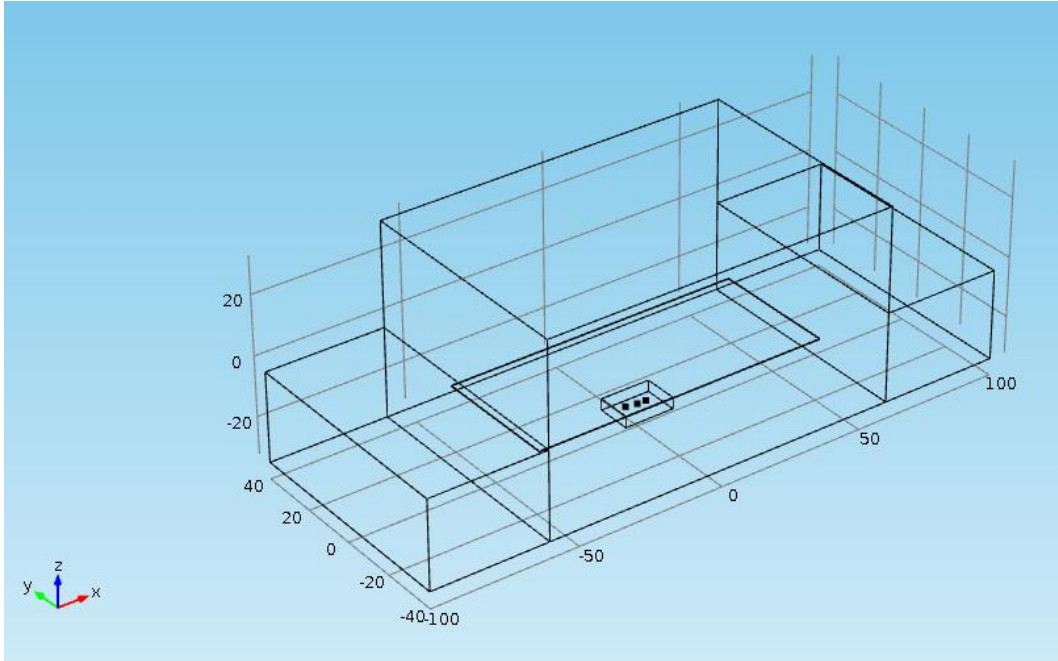
3.4.2. Ağ Bağımsızlık Çalışmaları

COMSOL çoklu fizik programı kullanılarak geliştirilen modellerin sonuçlarının kullanılan ağ yapısından bağımsız olduğunu göstermek için bütün modelleme çalışmalarında ağ bağımsızlık çalışmaları yapılmış ve farklı ağ yapıları (normal, fine, finer, extra fine, extremely fine) ile elde edilen model sonuçları ürün içi sıcaklık değişimi ve ürün içi ısı oluşumu kapsamında karşılaştırılmıştır.

3.4.3. Serbest Salımlı RF sisteminin Geometrisinin Basitleştirilerek Yapılan Simülasyon Çalışmaları

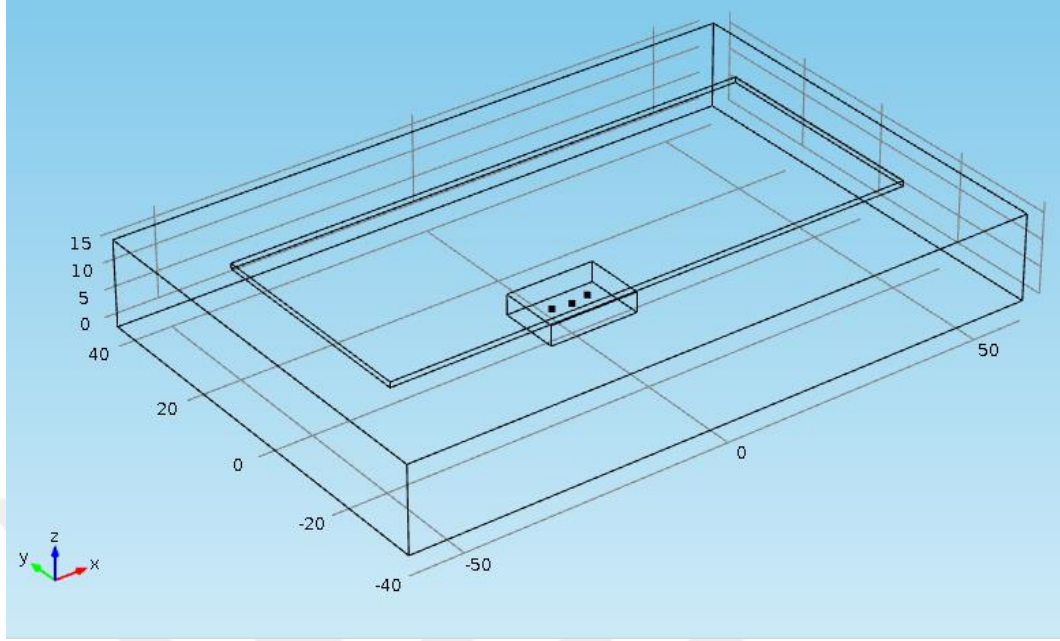
Şekil 3.6a’da gösterilen, serbest salımlı RF sistem geometrisinin tüm detaylarıyla (Şekil 3.7a) modellenmesi ile yapılan simülasyonların (yoğun ağ yapısından dolayı) çok uzun sürmesi nedeniyle geometrinin Şekil 3.7b’de gösterilen şekilde basitleştirilmesine karar verilerek sadece elektrotlar ve arasında kalan bölgenin geometrisinin oluşturularak modellenmesine karar verilmiştir. Üst elektrot üzerindeki bölgede de elektromanyetik yayınımlar olmasına rağmen bunun ürün sıcaklık değişimindeki etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu her iki geometriyle yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Şekil 3.2’de gösterilen sistemde [Farag vd., 2008], 3000 saniyelik RF çözdürme işlemi için eş zamanlı olarak denklemlerin çözümü için 10600 saniye (yaklaşık 3 saat) Şekil 3.6’da gösterilen ve deneysel çalışmaların yapıldığı RF sistemindeki 2400 saniyelik simülasyonlar içinse 240,000 saniye (yaklaşık 3 gün) süre gerekmiştir.



Şekil 3.7 (a)

Şekil 3.7 devamı...



Şekil 3.7 (b)

Şekil 3.7. Deneysel çalışmaların yapıldığı serbest salımlı radyo frekans sistemin (a) bütün olarak hazırlanan geometrik modeli; (b) basitleştirilmiş geometrik modeli.

3.5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Serbest salımlı RF sistem için geliştirilen matematiksel model sonuçlarının doğrulanması amacıyla bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde yapılan deneylerde kullanılan et örneği yağsız et olarak yerel bir marketten alınıp 2 defa kıyma işleminden geçirildikten sonra $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de dondurularak çözdürme deneylerinde kullanılmıştır (Şekil 3.8). Hazırlanan et örnekleri, dondurma işleminden önce polipropilen kutulara iki farklı boyutta (genişlik \times uzunluk \times kalınlık) yerleştirilerek RF çözdürme deneyleri için hazırlanmıştır. Bu blokların boyutları blok A (Şekil 3.9a) $12.0 \times 17.2 \times 5.5\text{ cm}$, blok B (Şekil 3.9b) ise $12.0 \times 17.2 \times 3.8\text{ cm}$ 'dir.

Ürünler dondurulmadan önce, çözdürme işlemi sırasında sıcaklık ölçümünün yapılabilmesi amacıyla, fiber optik prob birisi ürün geometrik merkez

noktasına ve diğeri ürün yüzeyine yakın olacak şekilde yerleştirilmiştir. Blok A için kullanılan RF çözdürme işleminde üst ve alt elektrot arasındaki uzaklık 12 cm olarak uygulanırken blok B için 13 cm olarak uygulanmıştır. Şekil 3.8 dondurulmuş ve 2 adet fiber-optik prob (Fiber-optic probes, Fiso Technologies, Inc., Quebec, Canada) yerleştirilmiş kıyma örneğini göstermektedir. Sıcaklık ölçümü problemlerin bağlı olduğu bir data toplama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir Kıyma örneğinin simülasyonlarda kullanılan termofiziksel ve dielektrik özellikleri ise, Farag vd. [2011] tarafından yağsız et örneği için verilen değerler alınarak kullanılmıştır (Çizelge 3.2 ve Şekil 3.3). problemlerin konumları çözdürme deneyleri tamamlandıktan sonra belirlenmiştir (Şekil 3.9).

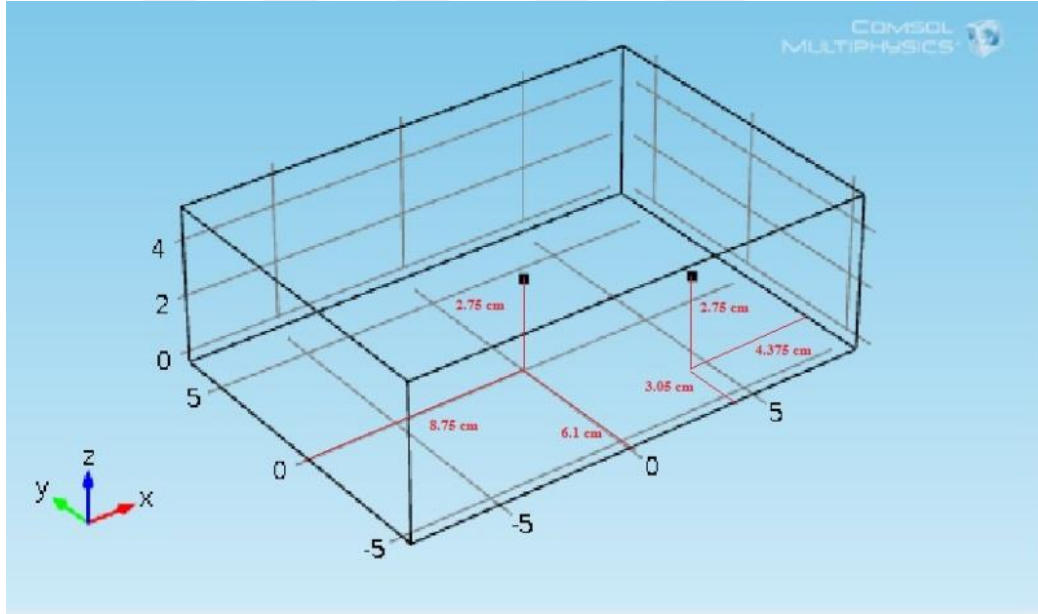


Şekil 3.8. Polipropilen bir kutu içerisine yerleştirilerek dondurulmuş örnek ve içerisine yerleştirilmiş fiber-optik problemler.

Model sonuçlarının, deneysel verilerle istatistiksel olarak karşılaştırılmasında ise RMSE (root mean square error) değeri aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmıştır:

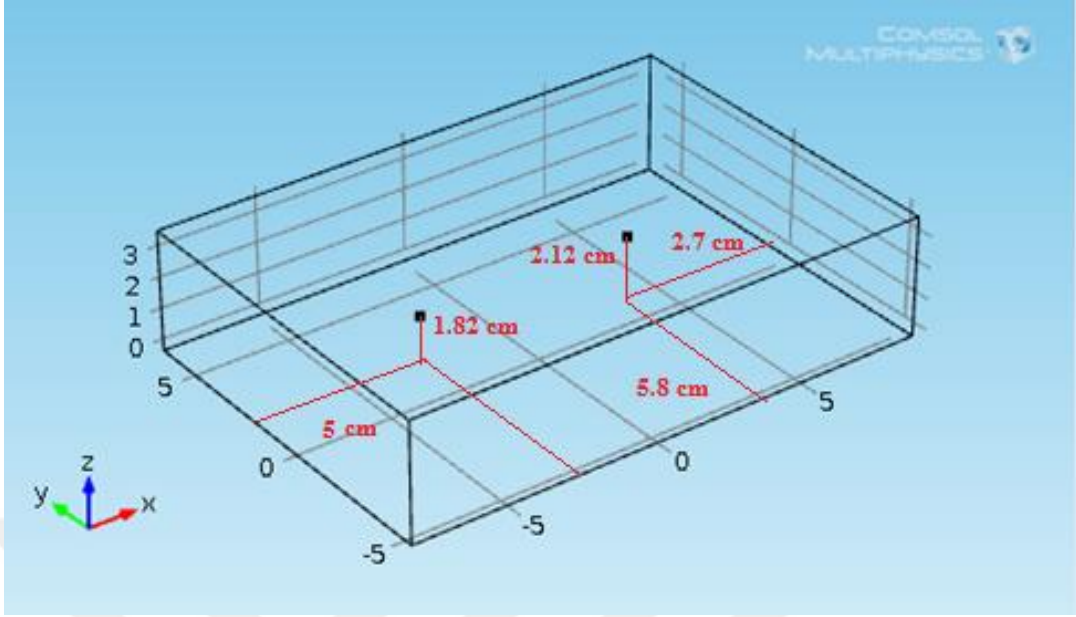
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T_{deneyset} - T_{model})^2} \quad (3.9)$$

Model doğrulama kapsamında yapılan deneysel çalışmaların yanısıra, RF çözdürme yöntemi ile geleneksel çözdürme işlemini karşılaştırmak amacıyla da bir seri deney yapılmıştır. Bu kapsamda, RF çözdürme işleminin sonradan örnekleri tekrar dondurulmuş ve bu dondurulan örnekler geleneksel çözdürme işlemi kapsamında oda sıcaklığında doğal konveksiyon koşullarında tekrar çözdürülmüşlerdir. Tekrar uygulanan dondurma ve çözdürme işleminin ürünün termofiziksel özelliklerinde bir değişikliğe sebep verebileceği düşünülse de, karşılaştırma işleminde aynı örneği kullanabilmek amacıyla bu şekilde bir deneysel yöntemin kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 3.9 (a)

Şekil 3.9 devamı...



Şekil 3.9 (b)

Şekil 3.9. Dondurulmuş et örneği içerisine yerleştirilen fiber optik problemlerin geometrik yerleri ve et örnekleri boyutları (a) blok A; (b) blok B.

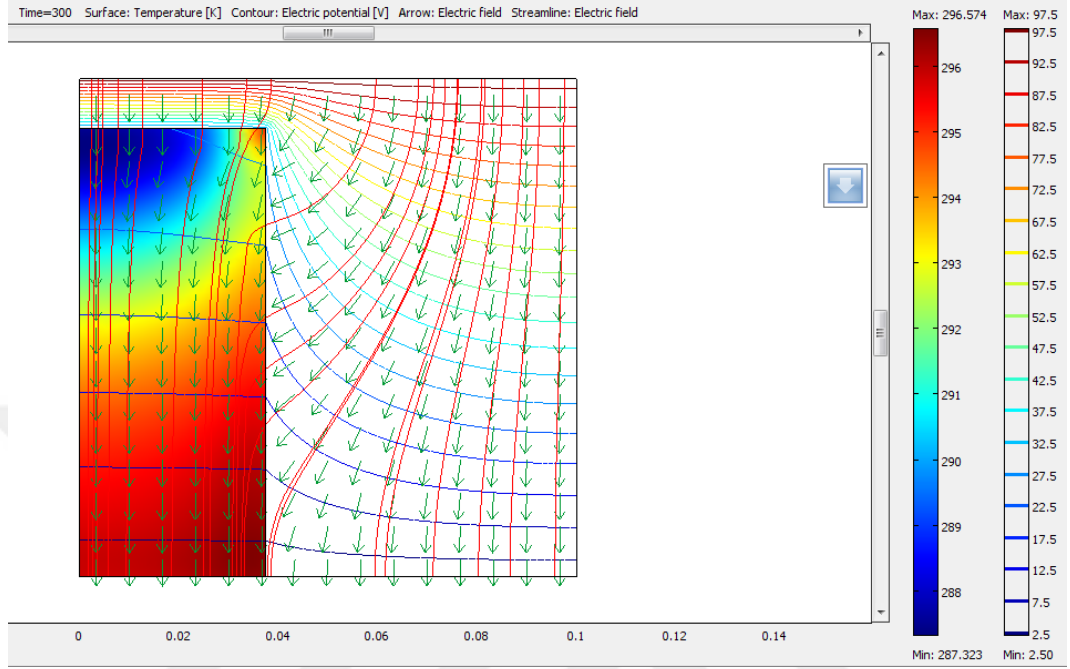
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. FAZ DEĞİŞİMİ OLMAYAN KOŞULLARDA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BELİRLENMESİ

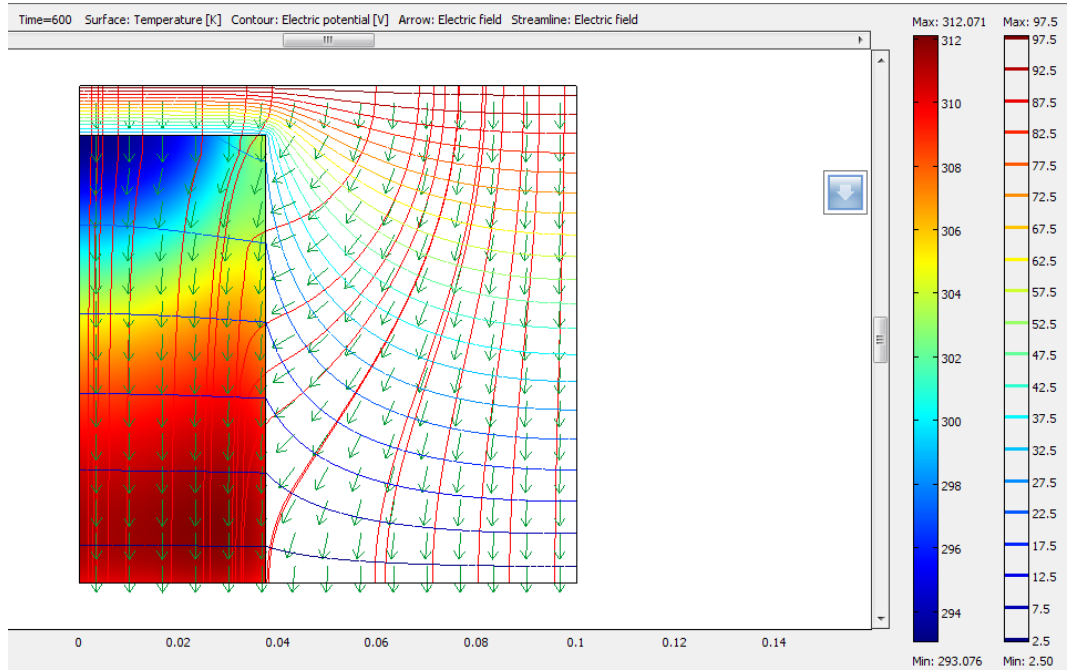
Çalışmanın ilk bölümünde, RF ısıtma prosesi için geliştirilen modelin doğrulaması literatür verileri [Marra vd., 2007] kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda, çalışma frekansı 27.12 MHz olan, maksimum 600 W gücünde çalışabilen özel yapım 50 Ω 'luk (C-Tech Innovation, Chester, UK) RF sistem için COMSOL çoklu fizik programı kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Doğrulama çalışmaları için, elektrotlar arası uzaklık 100 mm olarak belirlenmiş ve bu sistemde bir et ürününün sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Şekil 4.1'de yapılan 300, 600 ve 900 saniye sonrasında RF ısıtma sonrası elde edilen sıcaklık dağılımları, Şekil 4.2'de ise 900 saniye ısıtma sonrası literatürde [Marra vd., 2007] verilen sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 4.1c ve 4.2 görsel ve sayısal olarak karşılaştırıldığında geliştirilen model sonuçlarının literatür sonuçları ile benzer olduğu görülmüştür. Bu sonuçlarla, faz değişimi olmayan koşullarda geliştirilen modelin literatür sonuçları ile doğrulanması bölümü tamamlanmıştır.

RF sistemlerde, ürün içerisinde ısı enerjisinin oluşumu sistem içerisinde oluşan elektrik alanı dağılımına bağlıdır. Bu kapsamda, ürünün dielektrik özellikleri yanında ürünün sistem içerisindeki konumu ve boyutları da sistem içi elektrik alan dağılımı ve ürün içi sıcaklık artışını etkileyen faktörlerdir. Şekil 4.1'de de gösterildiği gibi, proses sırasında oluşan elektriksel alan yan yüzeylerden ürüne difüze olmakta ve ürünün üst elektroda yakın bölgesi soğuk bölge olarak ortaya çıkmaktadır. Üst elektroda uzak olan bölgelerde ise ısınma daha hızlı gerçekleşmektedir. Burada, kullanılan ürün boyutlarının yan yüzeyden elde edilen sıcaklık artışına etkisi net olarak görülmektedir. Bu sonuç, sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklığın, ürün üst yüzeyi ile üst elektrot arasındaki uzaklığın ve ürün boyutlarına bağlı olarak sistem içerisindeki boşluk miktarının da ürün içi sıcaklık dağılımında etkin faktörler olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle,

geliştirilen model kullanılarak, bir RF ısıtma prosesi sırasında ürün boyutunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi de ayrıca incelenmiştir.

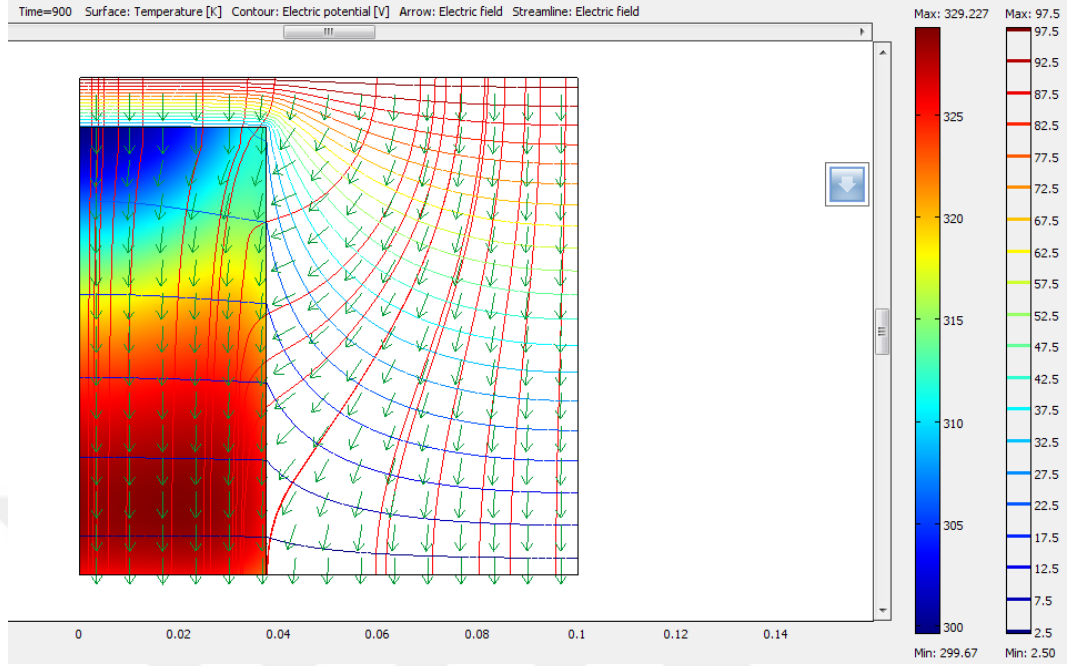


Şekil 4.1 (a)



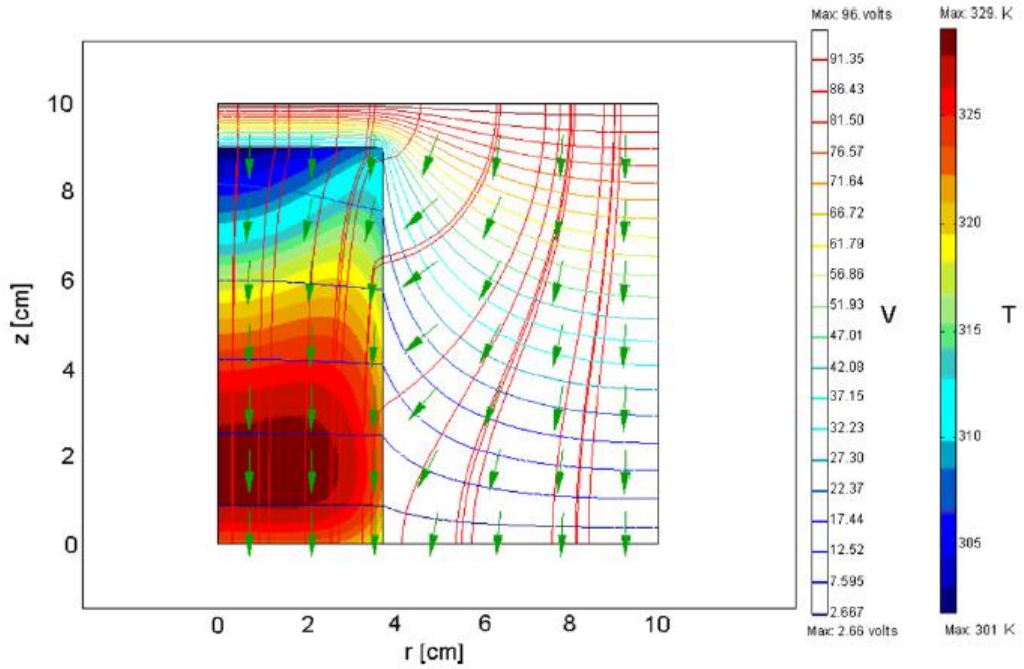
Şekil 4.1 (b)

Şekil 4.1 devamı...



Şekil 4.1 (c)

Şekil 4.1. Şekil 4.1. (a) Radyo frekans ısıtma sırasında örnek sıcaklık dağılımı; (a) 300 saniye (b) 600 saniye (c) 900 saniye.



Şekil 4.2. Literatürden [Marra vd., 2007] alınan radyo frekans uygulama sırasında elde edilen sıcaklık verilerine göre 900 s uygulaması sonrası elde edilen sıcaklık dağılımı.

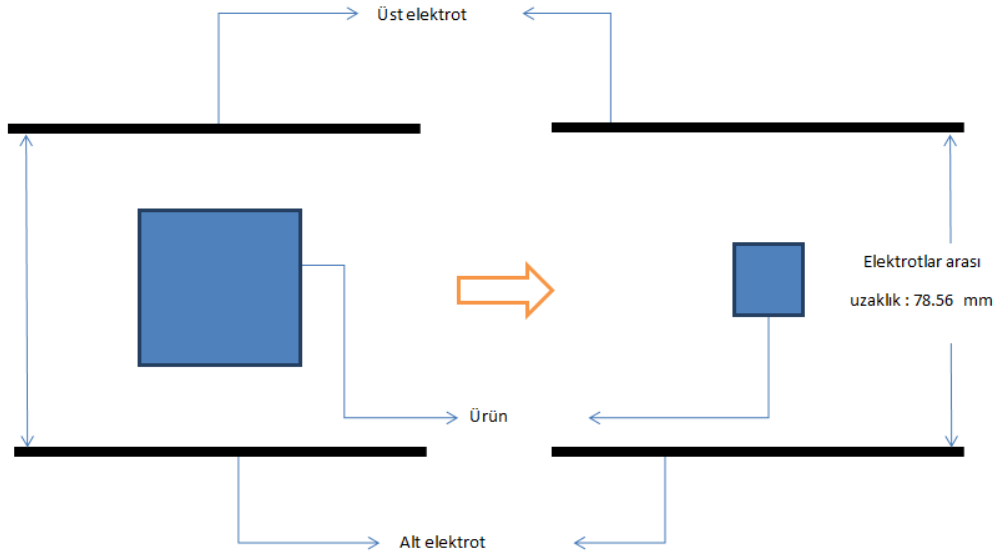
4.2. RADYO FREKANS (RF) SİSTEMLERDE ÜRÜN BOYUTLARININ ÜRÜN SICAKLIK DAĞILIMINA VE GÜÇ VERİMLİLİĞİNE OLAN ETKİSİ

RF uygulamalarda, ürün boyutunun ürün içi sıcaklık değişimi (eşitlik 4.1) ve güç verimliliğine (eşitlik 4.2) olan etkisi geliştirilen matematiksel model kullanılarak incelenmiştir [Uyar vd., 2013]. Çizelge 4.1’de RF sistem içerisine yerleştirilerek ısıtılan farklı boyuttaki ürünlerin hacimleri görülmektedir. Bu simülasyonlarda kübik ürün alt ve üst yüzeylerinin elektrotlara uzaklığı eşit alınmış ve ürün hacmi değiştirilerek (Şekil 4.3) ürün içi ortalama sıcaklık değişimi hacimsel ortalama ve güç verimliliğinin ürün boyutlarıyla değişimi analiz edilmiştir. Güç verimliliğini (η) hesaplamak için kullanılan eşitlikte P_{abs} ürün tarafından proses boyunca absorbe edilen ortalama güç ve P_{RFout} RF sistemde uygulanan gücü (400W) göstermektedir.

$$T_{ortalama} = \frac{\iiint_{ürün} T dx dy dz}{V_{ürün}} \quad (4.1)$$

$$P_{abs} = \frac{\iiint_{ürün} Q_{abs} dx dy dz}{V_{ürün}}; \eta = \frac{P_{abs}}{P_{RFout}} \quad (4.2)$$

Şekil 4.3’te elektrotlar arası uzaklığı (78.56 mm) sabit olan ve model çalışmasında kullanılan RF sistemin şematik çizimi gösterilmektedir. Kübik ürünün her iki elektrota eşit uzaklıkta olacak şekilde RF sistemin ortasında olduğu kabul edilerek 8 farklı ürün hacminde simülasyonlar yapılmıştır. Hacmi %100 olarak kabul edilen örnek (73.56 × 73.56 × 73.56 mm) yüzeyleri ile elektrotlar arası uzaklık 2.5 mm olarak kabul edilmiş ve diğer ürün boyutları (%100 hacimden %1 hacime kadar) buna göre belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Radyo frekans uygulamada ürünün farklı konfigürasyonlardaki gösterimi.

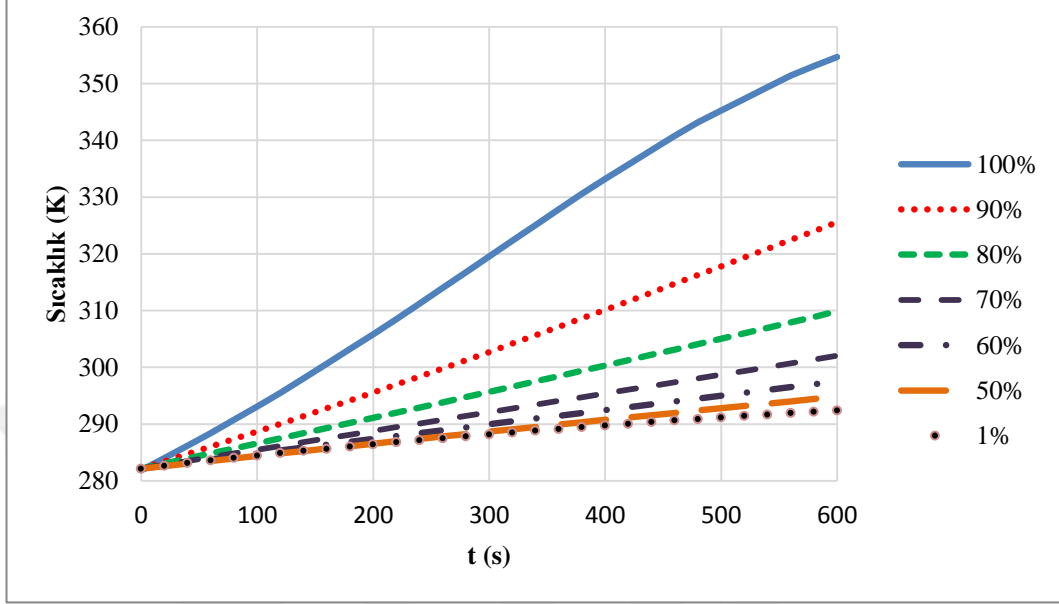
Çizelge 4.1. Farklı boyutlardaki ürünlerin sabit elektrot uzaklığında RF sistemindeki (78.56 mm) hacimleri.

Ürün hacmi yüzdesi (%)	Ürün hacmi (m ³)	Ürün boyutları (mm)
100	3.9800E-04	73.56 × 73.56 × 73.56
90	3.5820E-04	71.02 × 71.02 × 71.02
80	3.1840E-04	68.28 × 68.28 × 68.28
70	2.7860E-04	65.31 × 65.31 × 65.31
60	2.3880E-04	62.04 × 62.04 × 62.04
50	1.9900E-04	58.38 × 58.38 × 58.38
1	3.9800E-06	15.85 × 15.85 × 15.85

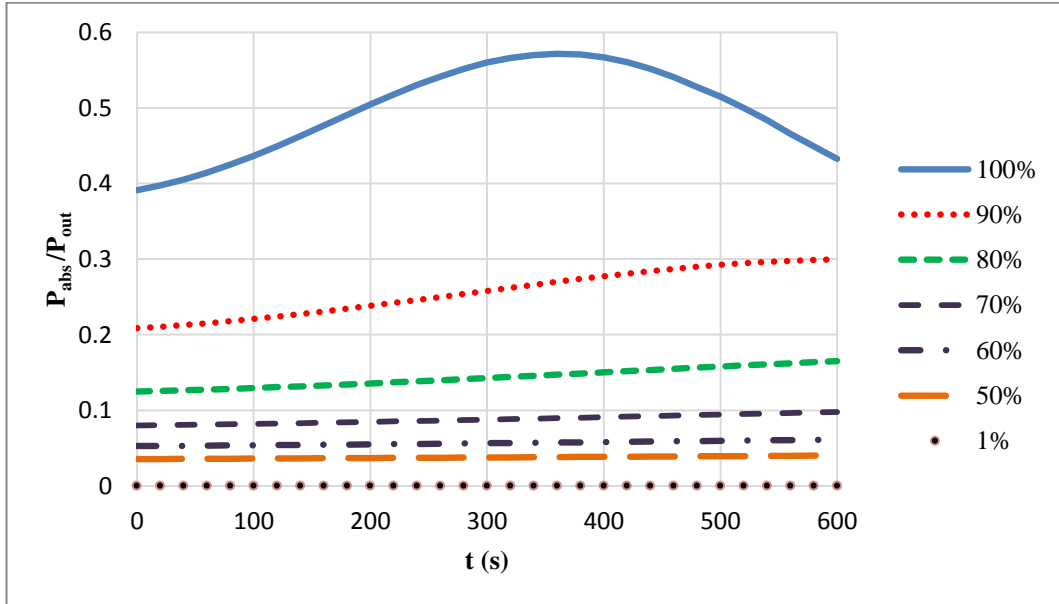
Farklı ürün boyutları ile yapılan simülasyonlardan elde edilen ürün içi ortalama sıcaklık değişimleri ve güç verimliliği değişimi ürün boyutlarına bağlı olarak Şekil 4.4'de ve 4.5a'da gösterilmiştir. Şekil 4.4'den de anlaşılacağı gibi ürün hacmi azaldıkça (% 100'den % 1'e) ürün içi sıcaklık artışı da azalmaktadır. Ürün hacmi azaldıkça üst ve alt elektrotlarla ürün arasındaki boşluk artmakta, ve elektriksel alan ürünle etkileşime girmeden alt elektrota ulaşarak ürün tarafından daha az elektriksel gücün absorbe edilmesine sebep olmaktadır. Ürün hacmi artarken ise, elektriksel alan ürün etkileşimi artmakta ve daha fazla elektriksel güç ürün tarafından absorbe edilerek (Şekil 4.5a) daha hızlı bir ısınmanın elde edilmesini sağlamaktadır (Şekil 4.4). Ürün ile elektrot arasındaki boşluğun elektriksel alan dağılımı ve ürün sıcaklık değişiminde önemli bir etken olduğu belirtilmektedir [Petrescu ve Ferariu 2008]. RF sistemde, uygulanan konfigürasyonda, ürün boyutları azaldıkça elektrotlar arasındaki mesafe sabit kaldığından ürün ile elektrotların arasındaki mesafe artmakta bunun sonucunda ürünün içerisindeki elektriksel alanın dağılımının şiddetinin azaldığı belirtilmektedir [Uyar vd., 2014]. Ürün içerisindeki ısınma hızı da elektriksel alana bağlı olduğundan ürün boyutu azaldıkça, ürün ve elektrotlar arasındaki mesafenin artması ile elektriksel alan şiddeti azalacağından, beklenildiği gibi ürünün ısınma hızı da Şekil 4.4'de görüldüğü şekilde azalmaktadır. Ancak ürünle elektrotlar arasındaki mesafe çok azaldığında üründe yerel ısınmalar oluşmakta bunun sonucunda ısınan bölgeler, dielektrik özelliklerin sıcaklıkla artışına bağlı olarak, daha fazla güç absorbe ederek daha hızlı ısınmaya maruz kalmaktadırlar. %100 hacim örneğinde 375 s proses zamanına kadar olan güç emilimindeki artış ve bunu izleyen azalış özel durumu ise, dielektrik özelliklerinden dielektrik kayıp faktörü değerinde 335 K sıcaklık değerinden itibaren olan azalma (Şekil 4.5b) ile açıklanabilmektedir.

RF ve MW uygulamalarda sıklıkla karşılaşılabilen bu durum kaçak ısınma (run away heating) olarak adlandırılmakta ve özellikle ürünlerin dielektrik özelliklerinin donma noktası altı ve üstünde gösterdiği radikal değişikliklere bağlı olarak, çözdürme işleminde daha da önem kazanmaktadır. RF uygulamalarında elektrotlarla ürün arasındaki mesafenin çok kısa olduğu durumlarda da kaçak ısınma problemlerinin olabileceği belirtilmekte ve pratikte ürünle elektrotlar arasında, güç

verimliliğini arttırmak ve kaçak ısınma problemlerini azaltmak amacıyla, belli bir boşluğun bırakılması önerilmektedir.

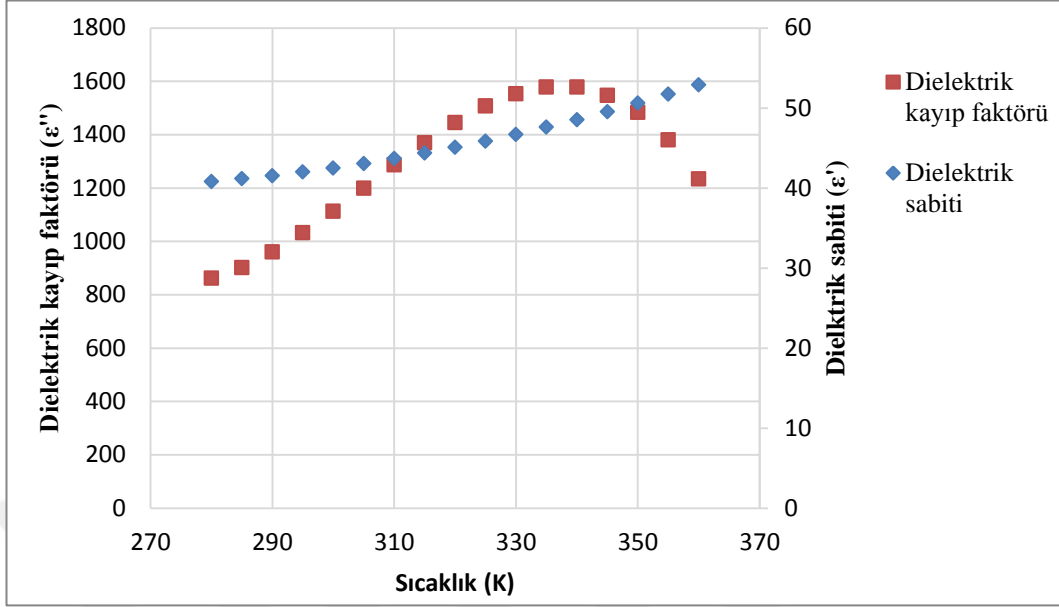


Şekil 4.4. Radyo frekans proses sırasında ürün boyutunun ürün içi ortalama sıcaklık değişimine etkisi.



Şekil 4.5 (a)

Şekil 4.5 devamı...



Şekil 4.5 (b)

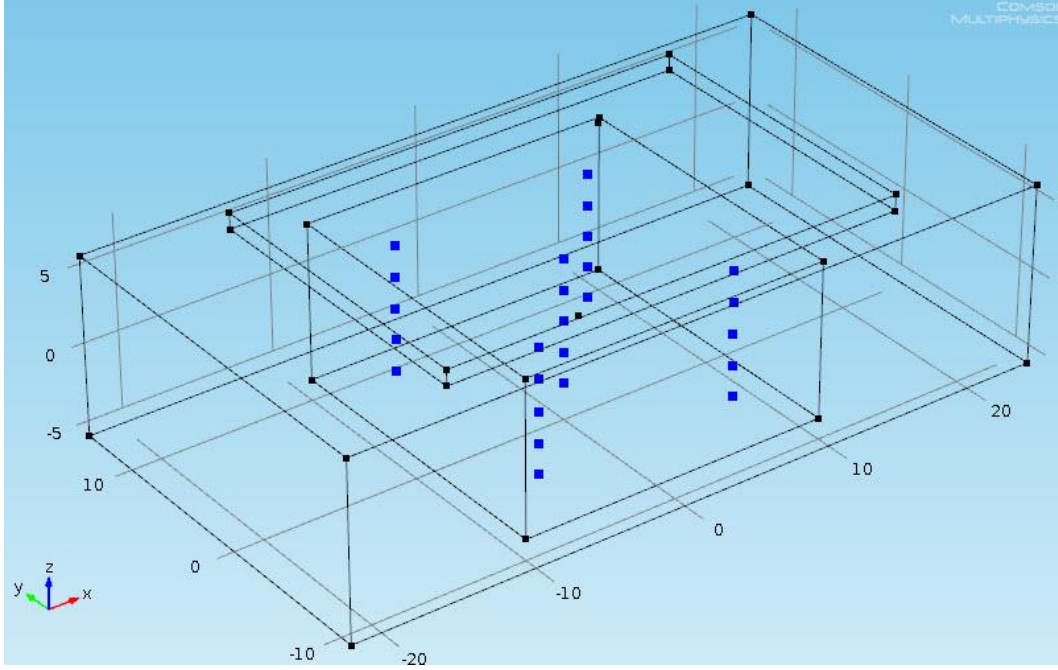
Şekil 4.5. (a) Radyo frekans proses sırasında ürün boyutunun güç verimliliği değişimine etkisi; (b) dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimi.

4.3. FAZ DEĞİŞİMİ İÇEREN 3 BOYUTLU MODELLEME ÇALIŞMASININ SONUÇLARI

Faz değişimini de içeren, 3-boyutlu olarak planlanan, modelleme çalışmasında, 27.12 MHz frekansında ve maksimum 600 W gücünde çalışabilen, elektrotlar arasında 11.4 cm uzaklık bulunan bir RF sistem (Capenhurst Technologies, Capenhurst Technology Park, Capenhurst, Chester CH1 6ES, England) ve model sonuçları Farag vd. [2008] tarafından verilen deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Bu kapsamda, bahsedilen çalışmada ürün içerisinde 25 farklı noktadan elde edilen sıcaklık değerlerinin ortalaması ile model sonuçlarının ortalaması karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6a'da COMSOL programında hazırlanan geometri ve sıcaklık değişimi kullanılan 25 farklı noktayı göstermektedir.

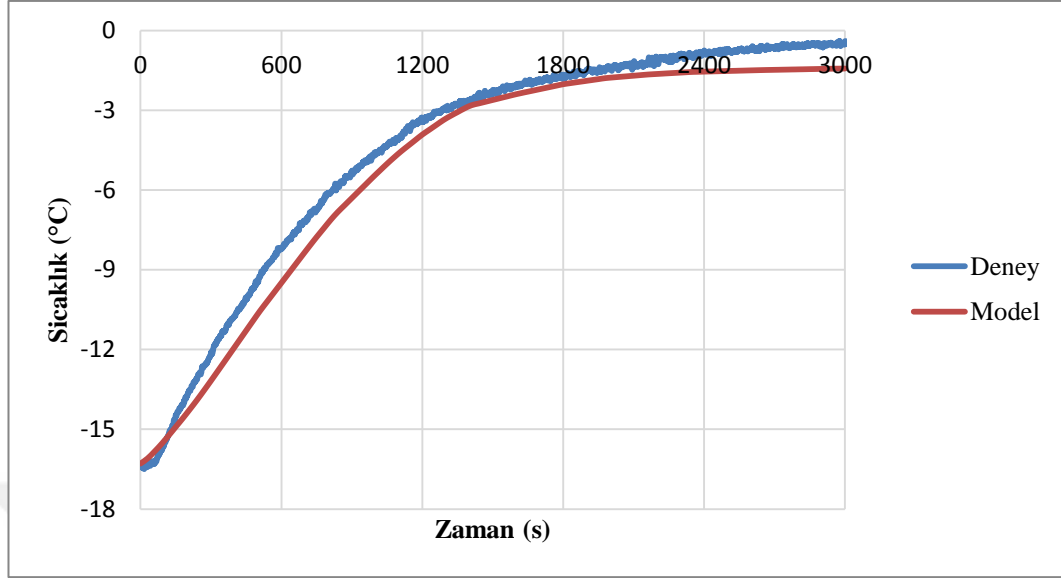
Şekil 4.6b deneysel sonuçları ile matematiksel modelden elde edilen ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırmasını göstermektedir. Bu karşılaştırma sonucunda

istatistiksel olarak hesaplanan fark değeri (RMSE) değeri 0.8 °C olarak hesaplanmıştır. Model geliştirme amacıyla kullanılan RF sistem içerisinde meydana gelen elektriksel potansiyel dağılımı Şekil 4.7a'da elektriksel alan dağılımı ise Şekil 4.7b'de gösterilmektedir. Bu şekillerde de görüldüğü gibi, RF sistem içerisinde oluşan elektrisel alanın, ürün boyutları kapsamında, ürün üst yüzeyinde etkin bir ısıtma sağladığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.8, 300, 600 ve 3000 s proses zamanında ürün içi sıcaklık; Şekil 4.9 ise aynı proses zamanlarında ürün tarafından absorbe edilen güç emilim değişimini göstermektedir. Üründe, köşelerden çözünmenin başlaması ile artan dielektrik özelliklere bağlı olarak absorbe edilen güç emiliminde (Şekil 4.9a) gözlenen artışların etkisi ürün sıcaklık değişiminde de paralel olarak gözlenmiştir. Proses süresi ilerledikçe homojen olarak elde edilen güç emilimi (Şekil 4.9c) kapsamında homojen sıcaklık dağılımının da oluşum net olarak gözlenmiştir (Şekil 4.8c).



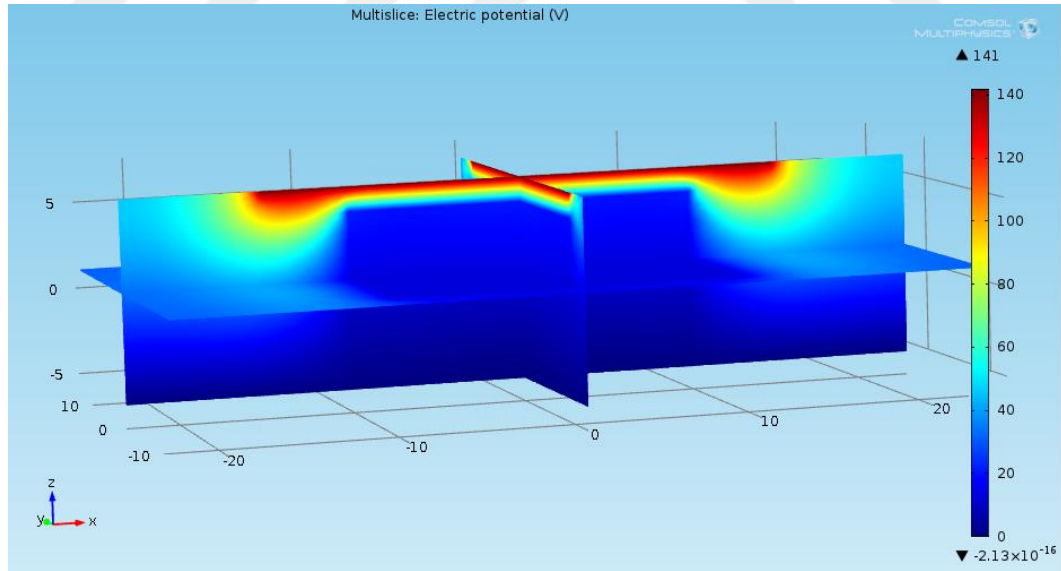
Şekil 4.6 (a)

Şekil 4.6 devamı...



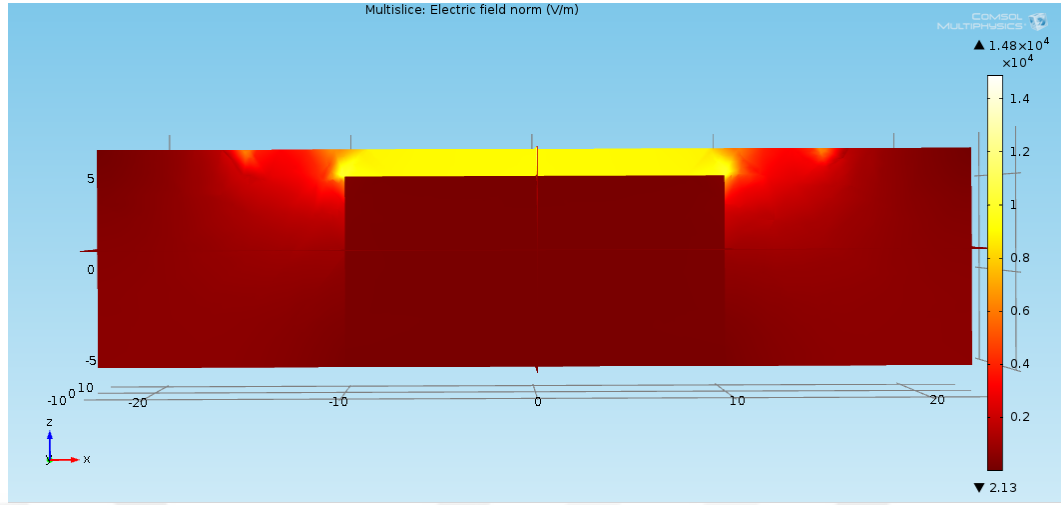
Şekil 4.6 (b)

Şekil 4.6. (a) Literatürden [Farag vd., 2011] alınan verilerle Comsol yazılımında oluşturulan model; (b) Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.



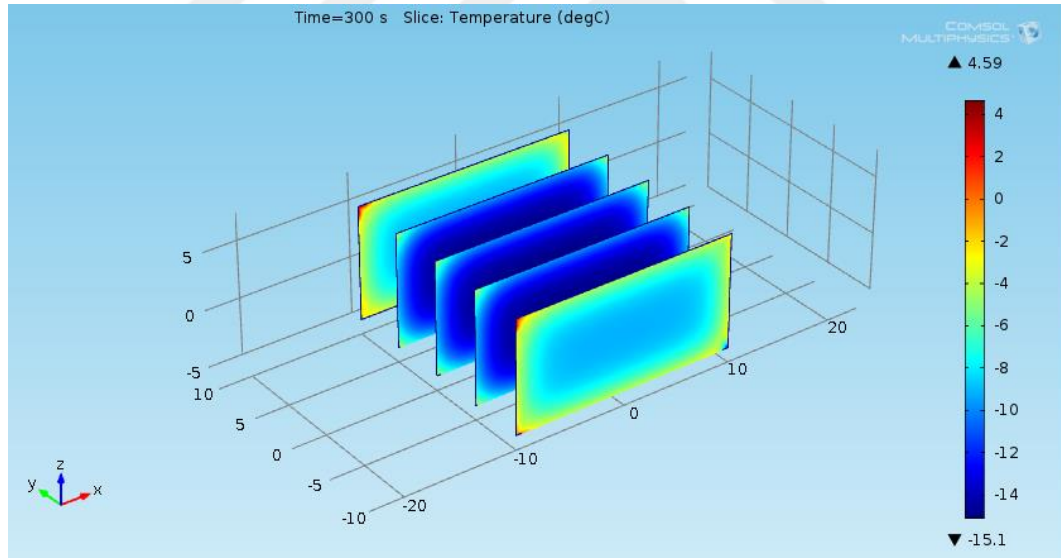
Şekil 4.7 (a)

Şekil 4.7 devamı...



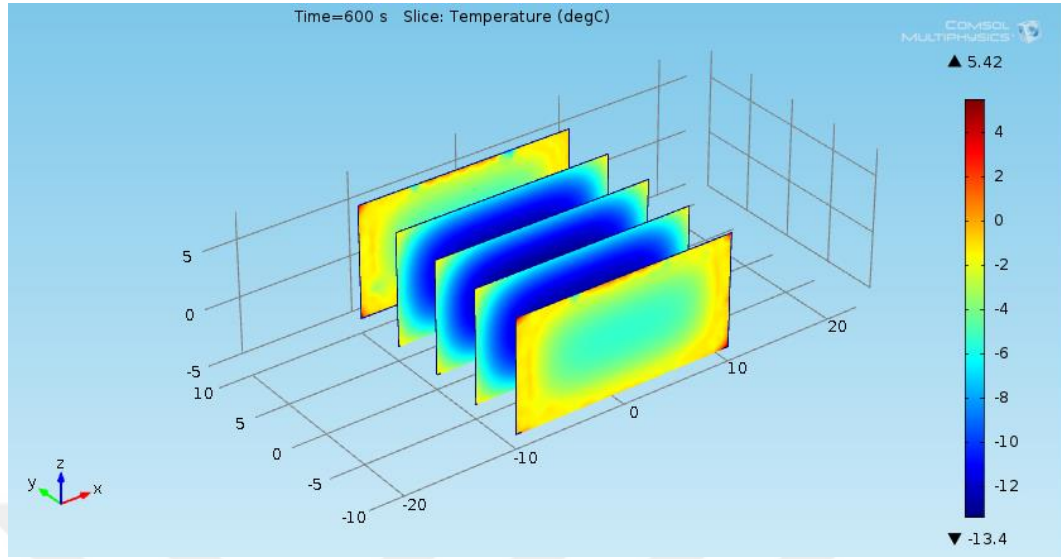
Şekil 4.7 (b)

Şekil 4.7. Radyo frekans uygulama sırasında elde edilen (a) elektriksel potansiyel; (b)elektriksel alan dağılımı.

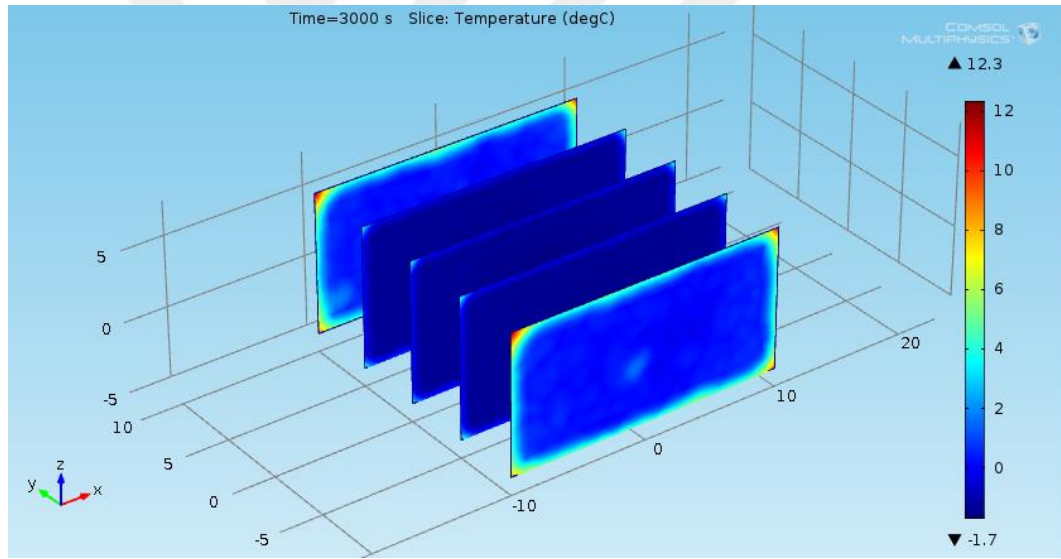


Şekil 4.8 (a)

Şekil 4.8 devamı...

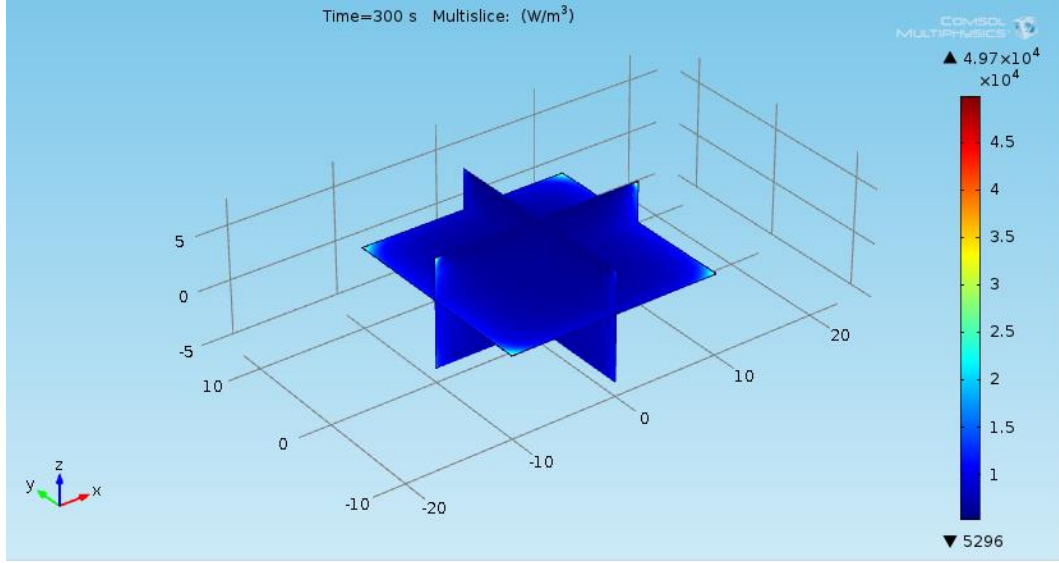


Şekil 4.8 (b)

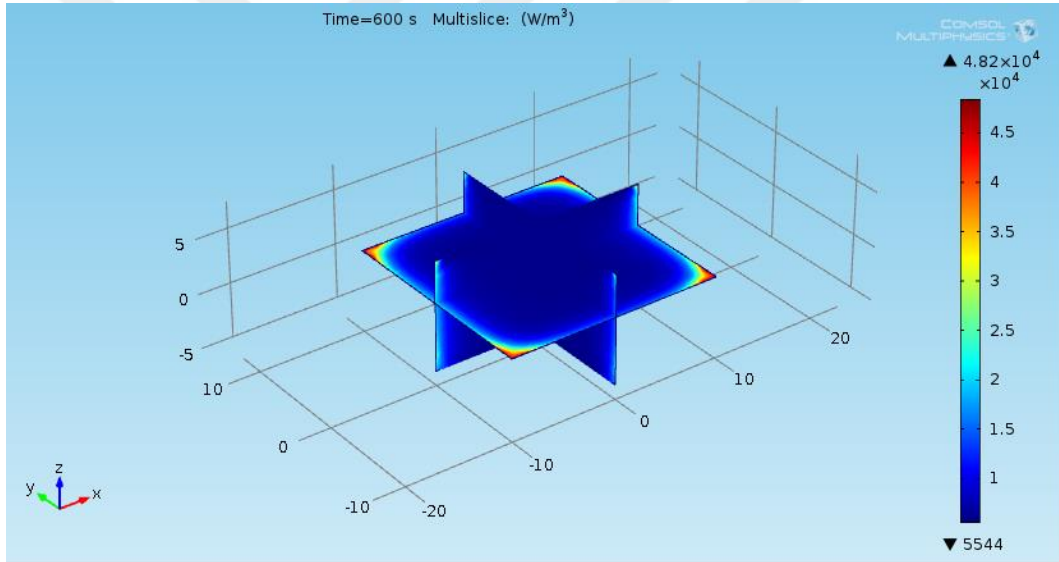


Şekil 4.8 (c)

Şekil 4.8. Radyofrekans çözdürme simülasyonunda et örneğinde (a) 300 s; (b) 600 s; (c) 3000 s proses süresi sonunda elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı.

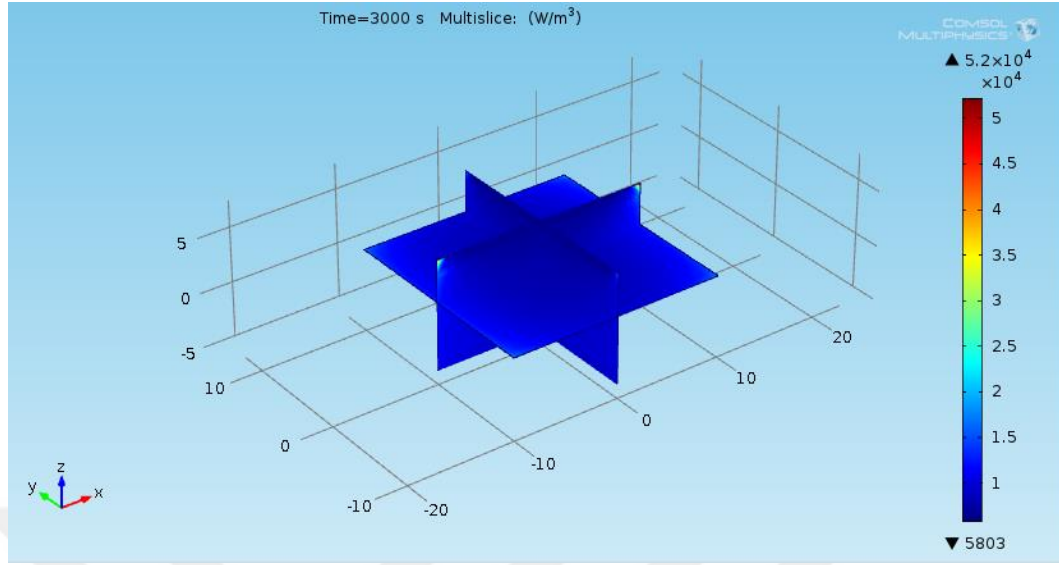


Şekil 4.9 (a)



Şekil 4.9 (b)

Şekil 4.9 devamı...



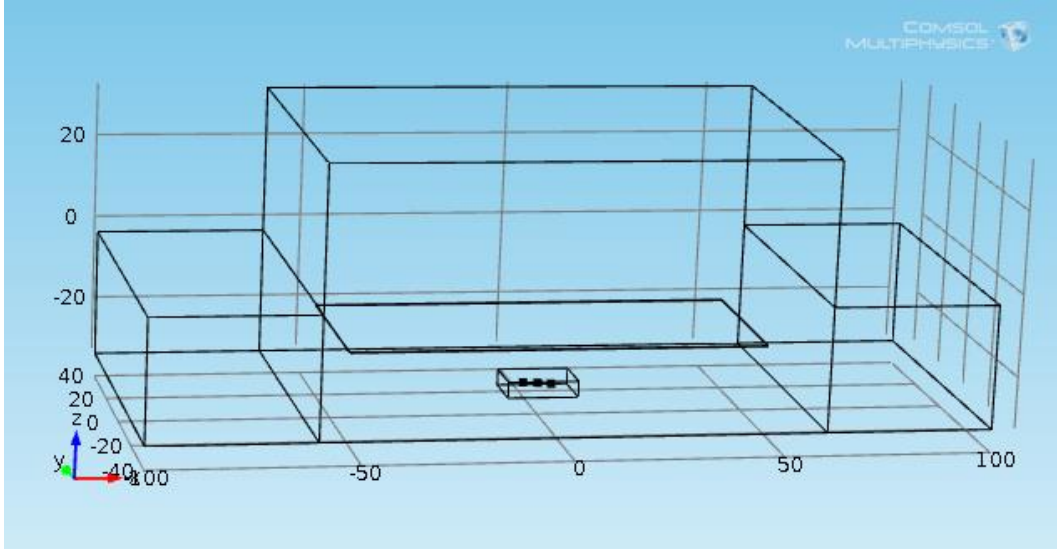
Şekil 4.9 (c)

Şekil 4.9. Radyofrekans çözdürme simülasyonunda et örneğinde (a) 300 s;(b) 600 s; (c) 3000 s proses süresi sonunda elde edilen ürün ürün güç emilim dağılımı.

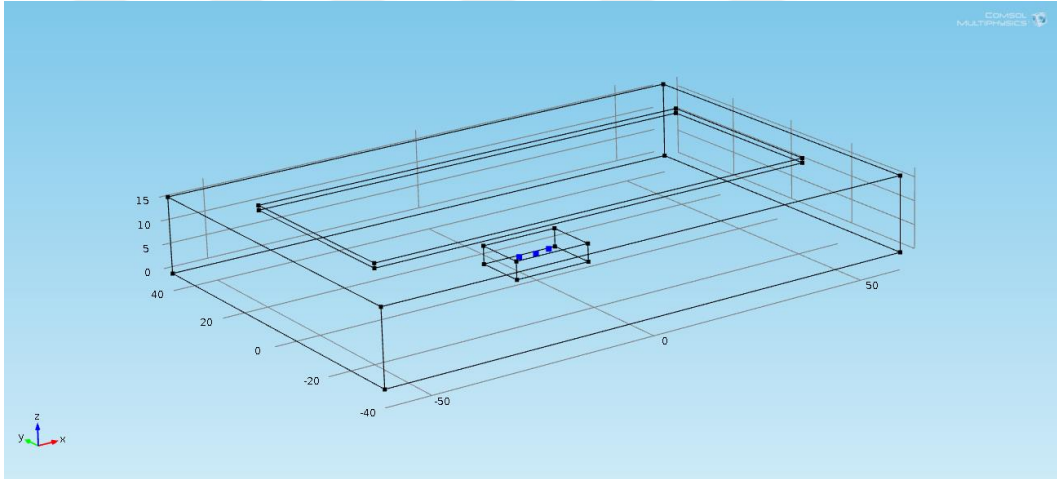
4.4. SERBEST SALINIMLI RADYO FREKANS (RF) SİSTEMDE ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN MODELLENMESİ

4.4.1. Ağ Bağımsızlık Çalışmaları

Geleneksel RF sistemde yapılan modelleme çalışmalarında sistem geometrisinin oluşturulduktan sonra, öncelikle çözümün ağ yapısından bağımsız olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bütün sistem geometrisi kullanılarak yapılan çözüm uzun süre (≈ 3 gün) gerektirdiğinden, basitleştirilmiş bir sistem geometrinin kullanılması planlanmış ve bu kapsamda da ayrıca ağ bağımsızlık çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda Şekil 4.10 ve 4.11’de gösterilen bütün ve basitleştirilmiş sistem geometrisi için kullanılan ağ yapıları ve element sayıları da Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Normal ağ yapısından daha kaba olan ağ kullanıldığı durumlarda çözümler yakınsamadığından (convergence), normal ağ yapısından daha kaba olan ağ yapıları ise kullanılmamıştır.



Şekil 4.10. Simülasyonlarda kullanılan radyo frekans sistemi geometrisi.



Şekil 4.11. Simülasyonlarda kullanılan basitleştirilmiş radyo frekans sistem geometrisi.

Çizelge 4.2. Simülasyonlarda kullanılan tam boyutlu ve basitleştirilmiş sistemlerde kullanılan eleman sayıları.

Ağ yapısı	Tam boyutlu sistem (Şekil 4.10)	Basitleştirilmiş sistem (Şekil 4.11)
Normal	27242	24869
Fine	69839	45145
Finer	373927	68148
Extra fine	2746343	121131
Extremely fine	7113308	296807

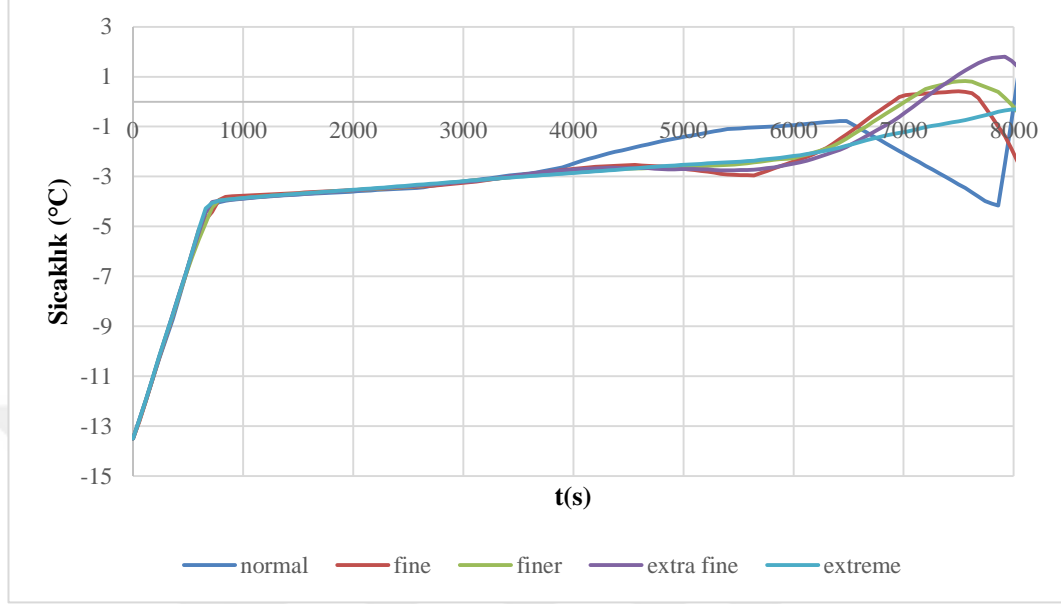
Şekil 4.12a-b, farklı ağ yoğunluğuna göre yapılan simülasyonlarda ürün geometrik merkez sıcaklık ve ortalama sıcaklık değerlerinde olan değişimi gösterirken, Şekil 4.12c ürünün absorbe ettiği ortalama güç emiliminin proses süresine göre değişimini göstermektedir. Gözleendiği gibi, ilk 1500 s proses süresinde – yani dielektrik özelliklerdeki değişimin göreceli olarak düşük olduğu durumlarda, ağ yapısındaki değişimler sıcaklık değişimlerinde belirgin bir farklılığa yol açmamıştır. Ancak ilerleyen proses zamanı, faz değişiminin gerçekleşmesi ve dielektrik özelliklerdeki değişimlerin artması yoğun ağ yapısı kullanımının daha doğru bir yaklaşım olacağını göstermiştir. Şekil 4.12a’da görüldüğü gibi salınım göstermeyen sıcaklık değişimi sonuçları en yoğun ağ yapısının kullanılmasıyla elde edilmiştir. Daha sonra simülasyonlar, sadece elektrotların ve ürünün yer aldığı bölgenin geometrisi (basitleştirilmiş sistem geometrisi) kullanılarak, farklı yoğunlukta ağ yapısı kullanılmasıyla (Çizelge 4.2) tekrarlanmıştır. Şekil 4.13a-b’de görüldüğü gibi sonuçlar, ürün geometrik merkez sıcaklığı ve ortalama sıcaklık değişimi açısından karşılaştırılmış ve sıcaklık değişimleri açısından bütün sistem sonuçları ile benzer sonuçlar gözlenmiştir.

RF çözdürme işleminin matematiksel modellenmesi gibi elektromanyetik problemler de, Maxwell eşitliklerinin de çözülmesi gerektiğinden, ağ yapısının

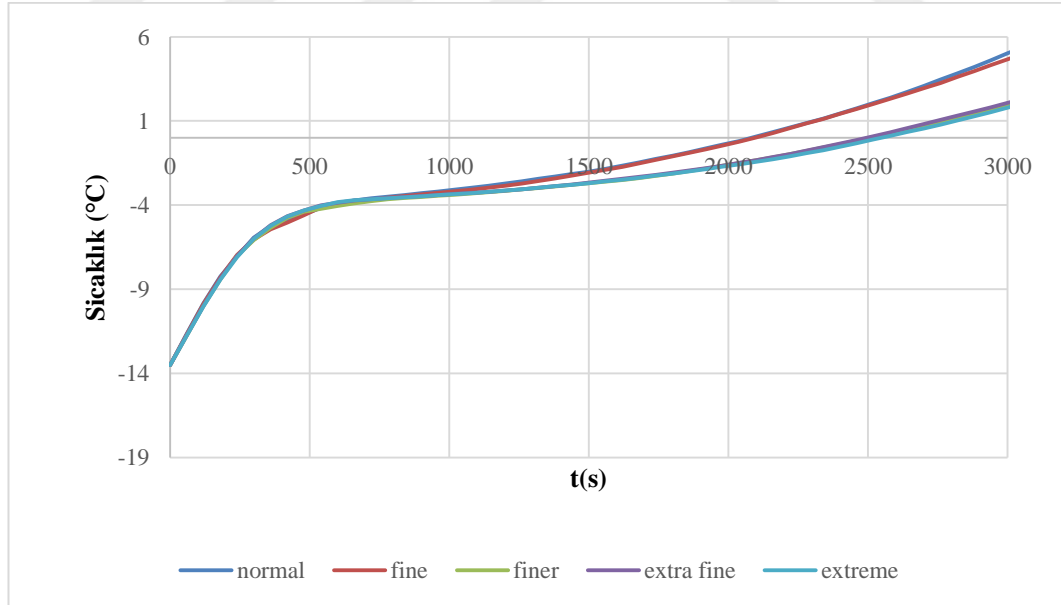
eleman boyutunun Nyquist kriterine uyması gerekmektedir:
$$S_{\max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon'\mu'}}$$

Bu eşitlikte λ - dalga boyunu (m), f - frekansı (Hz), c - vakumda ışık hızını (m/s), ϵ' - dielektrik sabitini ve μ' - relatif geçirgenlik (relative permeability) değerini göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda Maxwell eşitliklerinin sonlu elemanlar metoduna göre çözümü için dalga boyunun en az altıda biri boyutunda bir eleman boyutunda ağ yapısının oluşturulmasının gerektiği de belirtilmektedir [Zhang vd., 2001]. Ağ bağımsızlık çalışmalarında da belirtildiği üzere, Nyquist kriterine göre çok daha yoğun bir ağ yapısının kullanılmasıyla, sıcaklık salınımı yapmayan, fiziksel olarak doğru kabul edilebilecek sonuçlar elde edilebilmiştir. Salvi vd. [2011] tarafından da belirtildiği gibi, çözümü gereken problemde kullanılan materyal ısısal-fiziksel ve dielektrik özellikleri ağ yapısında kullanılan hücre boyutunu etkilemektedir. Ayrıca, faz değişimi gibi çözümü standart kondüksiyon

problemlerine göre, daha yoğun ağ yapısı gerektiren bir problemde eş zamanlı elektriksel alan dağılımı ve sıcaklık değişiminin belirlenmesi de gerektiğinden daha yoğun bir ağ yapısının gerektiği açıktır.

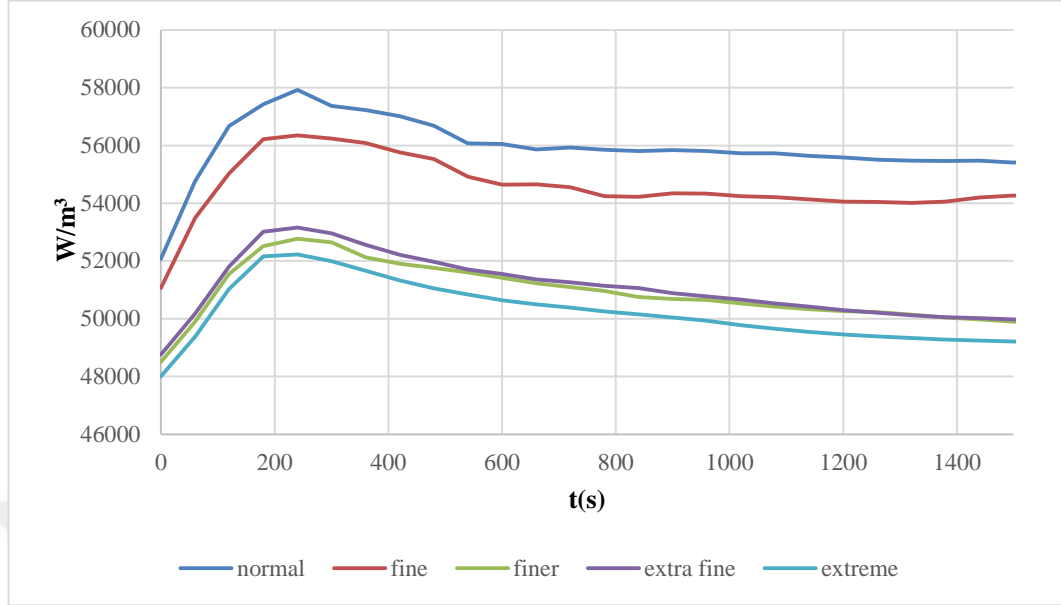


Şekil 4.12. (a)



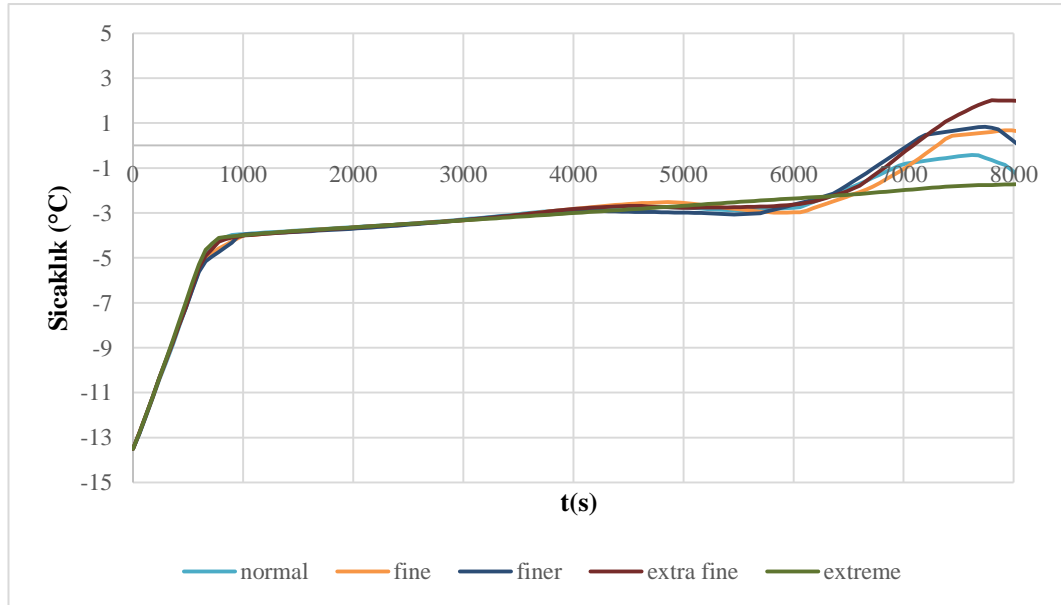
Şekil 4.12. (b)

Şekil 4.12 devamı...



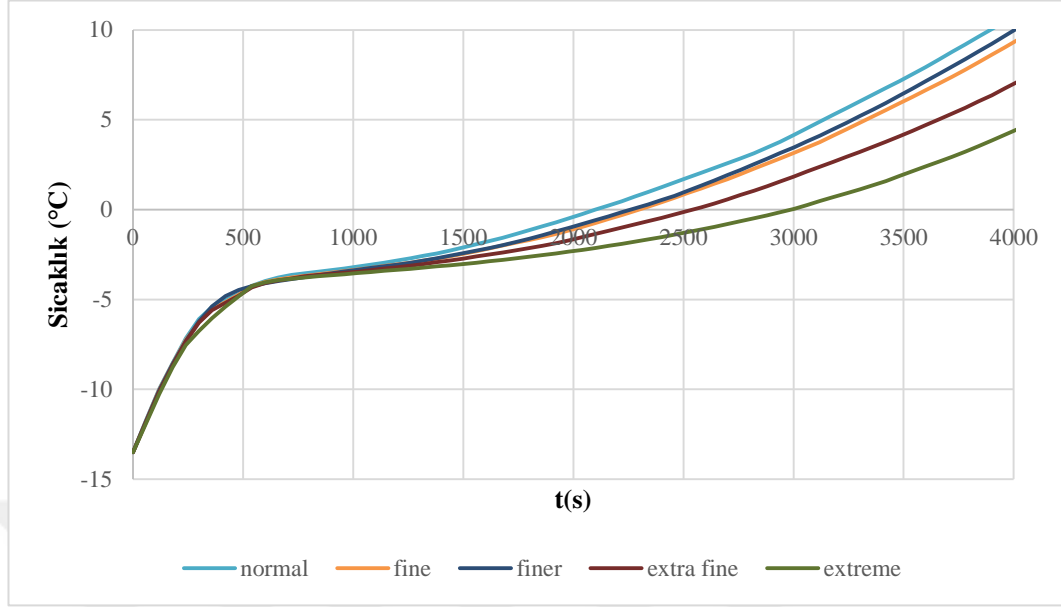
Şekil 4.12 (c)

Şekil 4.12. Bütün sistemde farklı ağ yoğunluğuna göre yapılan simülasyon sonuçlarına göre (a) ürün merkez sıcaklık; (b) ürün ortalama sıcaklık; (c) ürün tarafından absorbe edilen ortalama güç miktarı değişimi.

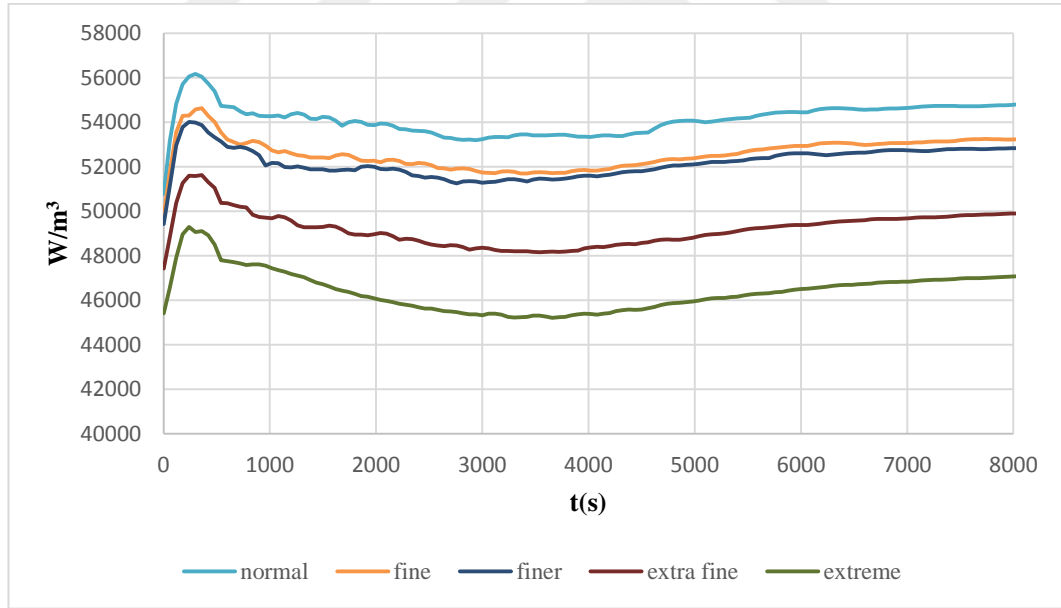


Şekil 4.13 (a)

Şekil 4.13 devamı...



Şekil 4.13 (b)

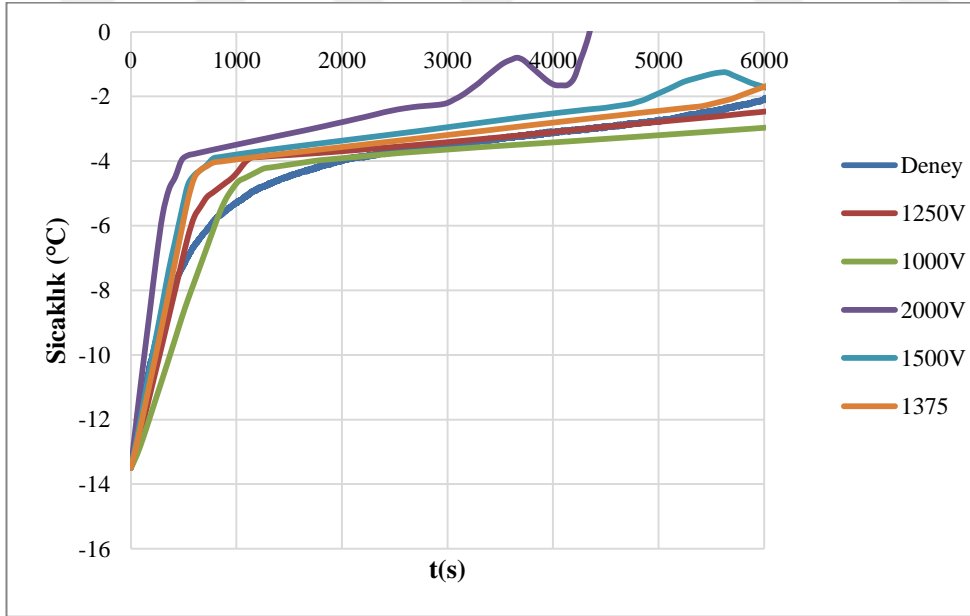


Şekil 4.13 (c)

Şekil 4.13. Basitleştirilmiş sistemde farklı ağ yoğunluğuna göre yapılan simülasyon sonuçlarına göre (a) ürün merkez sıcaklık; (b) ürün ortalama sıcaklık; (c) ürün tarafından absorbe edilen ortalama güç miktarı değişimi.

4.4.2. Deneysel Kullanılan Radyo Frekans Sistem Üst Elektrot Voltaj Değerinin Belirlenmesi

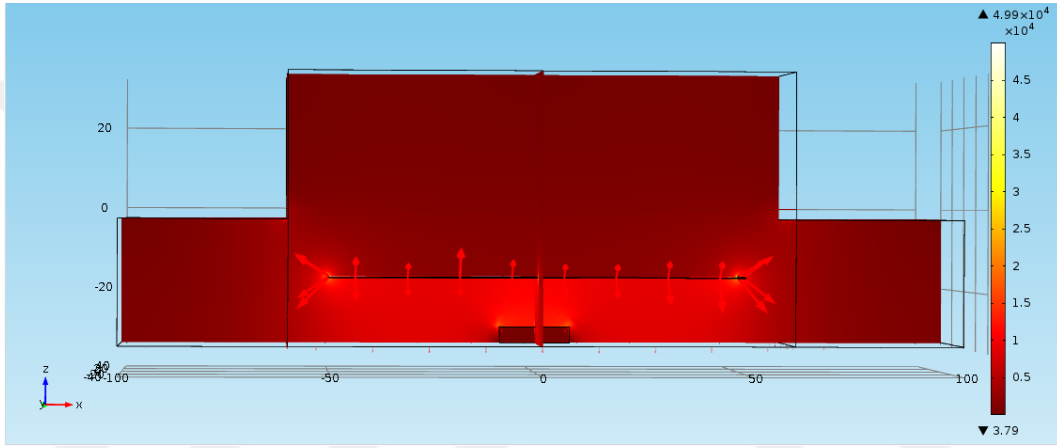
Deneysel kullanılan serbest salımlı sistemlerde üst voltaj değeri ürün boyutları, ürün ve üst elektrot arasındaki uzaklık, ürün dielektrik özellikleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu nedenle, sistemde çözdürme işlemi sırasında elde edilen üst voltaj değerini belirlemek amacıyla deney sonuçları ve model sonuçlarının karşılaştırıldığı bir deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem literatürde farklı kaynaklarda da önerilmektedir [Marshal ve Metaxas, 1998; Birla vd., 2008; Tiwari vd., 2011; Alfaifi vd., 2014]. Şekil 4.14, farklı voltaj değerleri kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması göstermektedir. Şekil 4.14'den de anlaşıldığı gibi üst elektrota uygulanan 1375 V değeri kullanılarak, blok-A (Şekil 3.9a) kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, blok –A ve blok-B'nin (Şekil 3.9) kullanıldığı deneysel koşullar için yapılan karşılaştırmalarda üst voltaj değerinin değişmediği de belirlenmiştir.



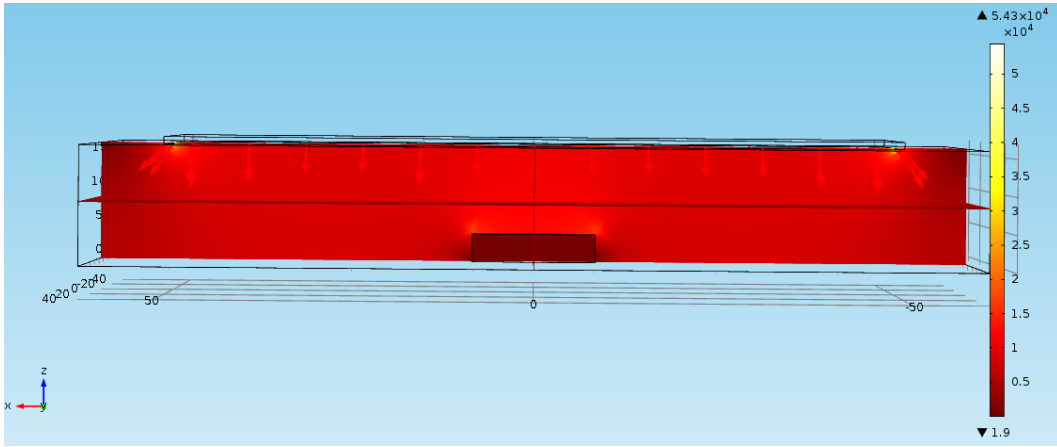
Şekil 4.14. Radyo frekans çözdürme çalışmasında farklı voltaj değerleri kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

4.4.3. Bütün ve Basitleştirilmiş Sistem İçin En Yoğun (Extreme Fine) Ağ Yapısı Kullanılarak Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Bütün sistem ve basitleştirilmiş geometriyle yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen elektriksel alan dağılımları Şekil 4.15’de gösterilmektedir. Bütün sistemde (Şekil 4.15a) etkisi az da olsa elektrotların üst kısmında elektriksel alan etkisinin bulunduğu görülmektedir. Bu açıdan, sistem içi yansımaların da ürün sıcaklık değişimi ya da güç emilimine etkisi olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.15 (a)

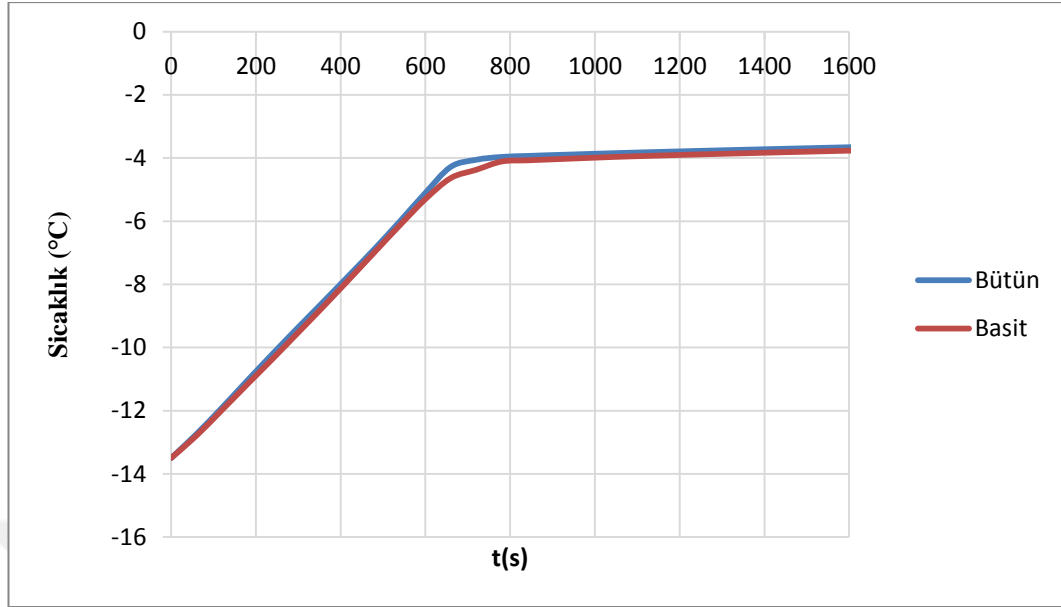


Şekil 4.15 (b)

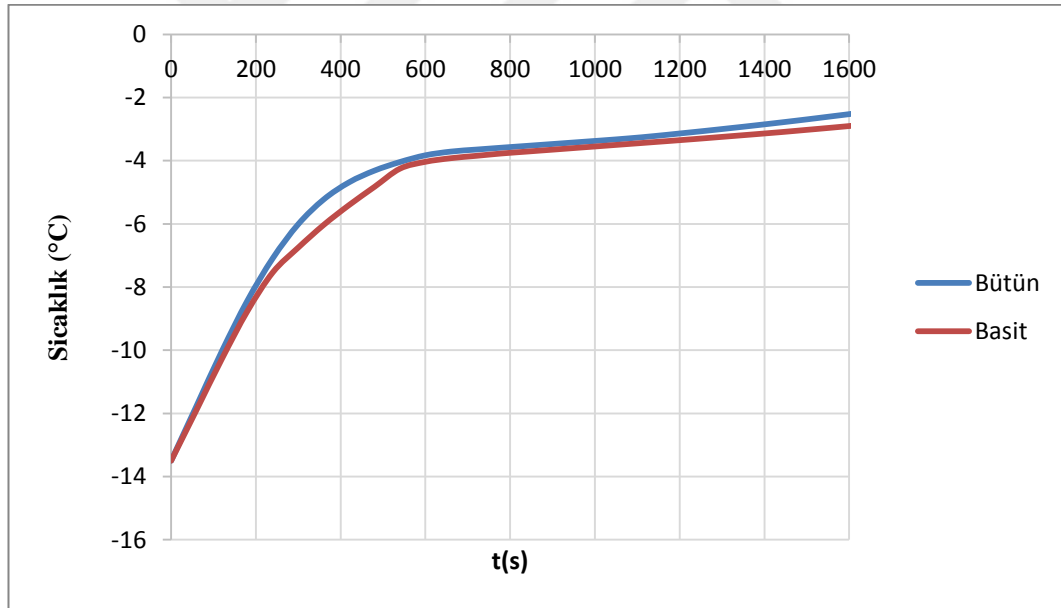
Şekil 4.15. Deneylerde kullanılan radyo frekans sisteminin (a) bütün geometrisi; (b) basitleştirilmiş geometrisi kullanılarak yapılan simülasyonlarda elde edilen elektriksel alan dağılımı.

Şekil 4.16a-b'de en yoğun (extreme fine) bütün ve basitleştirilmiş model sıcaklık değişimlerinin ürün geometrik merkezi ve ortalama sıcaklık değerleri açısından karşılaştırılması gösterilirken; Şekil 4.16c çözdürülen ürün tarafından absorbe edilen güç değişimi karşılaştırmasını göstermektedir. Görüldüğü gibi, sıcaklık değişimleri arasında önemli bir fark saptanamazken absorbe edilen güç miktarları arasında, bütün model ile basitleştirilmiş model arasında bir farklılık bulunmaktadır. Bu farklılık, bütün sistemde elektromanyetik dalgaların sistem içi yansıması ile ürünle etkileşimlerinin artması ve daha fazla güç emiliminin oluşması ile açıklanabilmektedir. Basitleştirilmiş geometriye sahip sistemde üst elektrotun üst kısmındaki elektromanyetik yayılım ihmal edilirken, bütün sistem modelinde üstten yansıyan dalgalar da çözüme dahil edilmektedir. Şekil 4.16d'de ise ürün kayıp tanjant değerinin $-10 - 0$ °C'de aralığında, diğer sıcaklık aralıklarına göre olan keskin artış değeri görülmektedir. Kayıp tanjant değerinde olan artışın RF penetrasyon derinliğinin azalması güç emiliminde 200 s proses sonrasında olan azalmayı (Şekil 4.16c) açıklamaya yardımcı olmaktadır. Bu süre sonunda ürün ortalama sıcaklığı da -10 °C'nin üzerine çıkmakta (Şekil 4.16b) olup kayıp tanjant değerinin de yükselmeye başlamasıyla RF penetrasyon derinliği azalmakta ve ürün daha az güç absorbe etmektedir.

Ancak, bu farklılığın sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılmasında belirgin bir farka yol açmadığı da, Şekil 4.16a-b'de görülmektedir. Bu nedeni, ürün donma bölgesinde dielektrik kayıp faktörü değerlerinin küçük olması nedeniyle üründe oluşan güç emilim değerlerinin sıcaklık değişimlerinde fark yaratacak kadar yüksek olmaması ile açıklanabilir. Bu düşüncenin doğruluğunu gösterebilmek için, proses süresinin uzatılmasıyla elde edilen sıcaklık ve güç emilim değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Proses süresi uzatıldığında yani ürün sıcaklık değişimi başlangıç donma noktasına yaklaştığında; dielektrik özelliklerin sıcaklıkla artışının absorbe edilen güç değeri ve ürün sıcaklık değişimine olan etkisi ortaya çıkmaktadır.

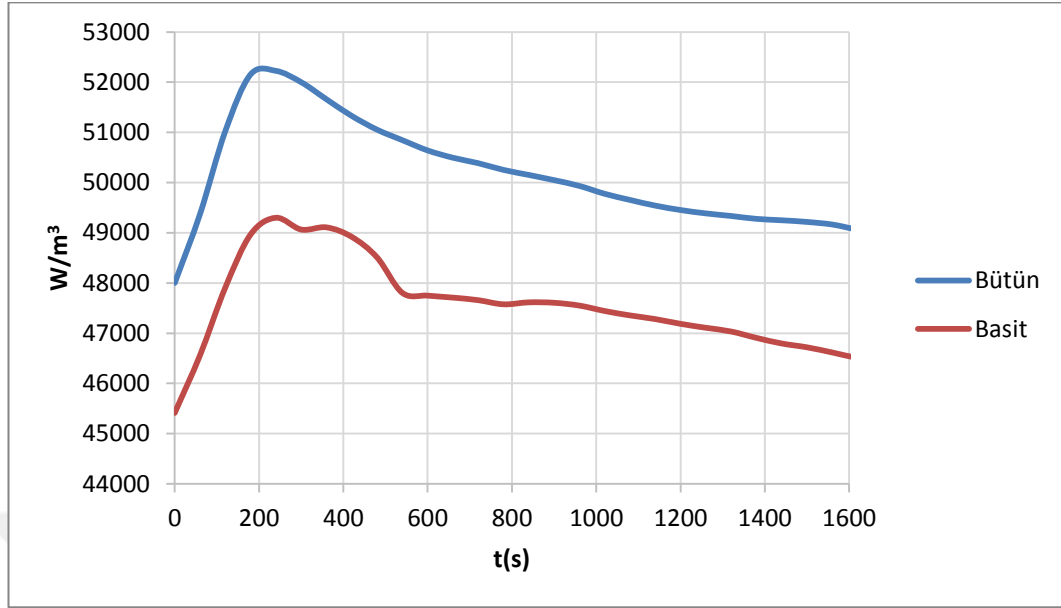


Şekil 4.16 (a)

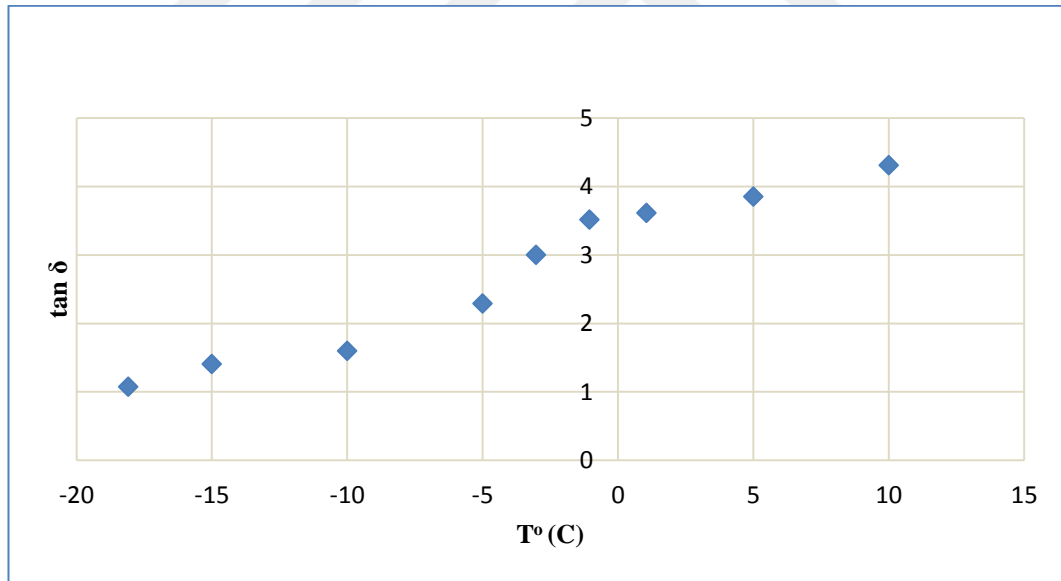


Şekil 4.16 (b)

Şekil 4.16 devamı...

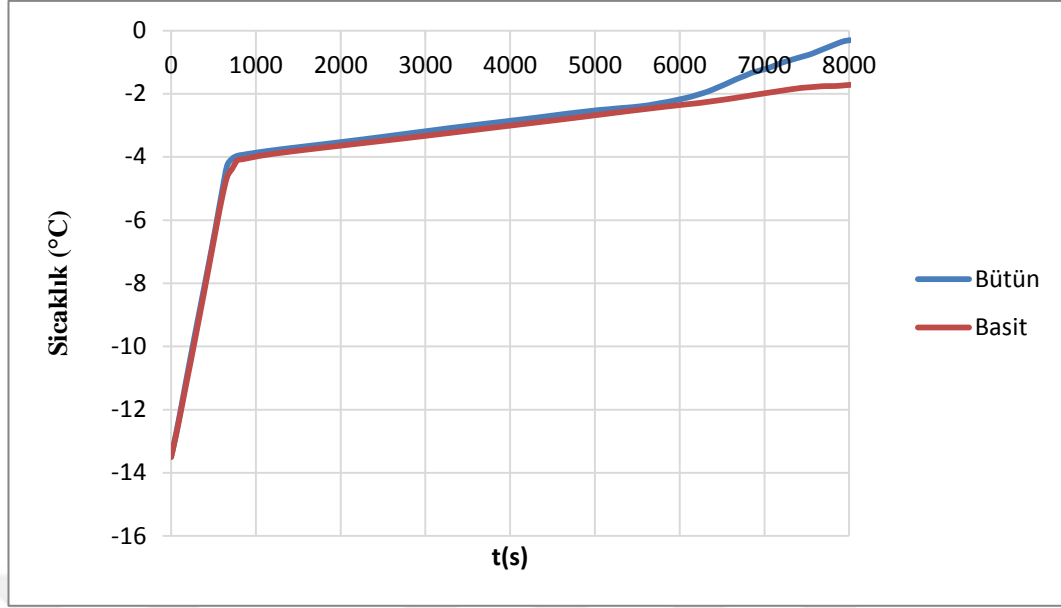


Şekil 4.16 (c)

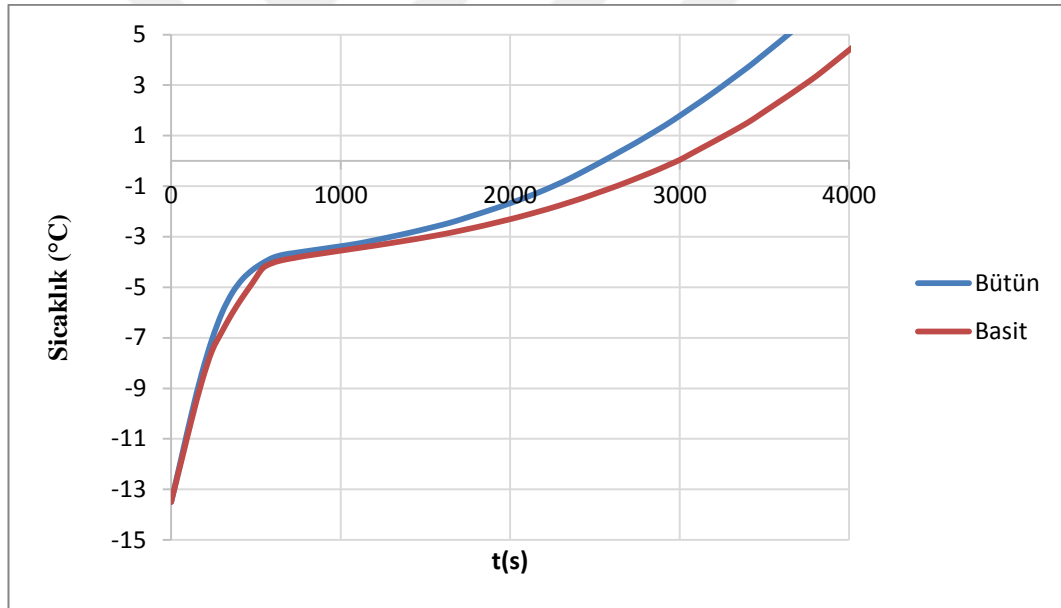


Şekil 4.16 (d)

Şekil 4.16. RF ısıtma sisteminin tüm olarak ve basitleştirilmiş geometrilerinin en yoğun (extreme fine) ağ yapısı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları (a) ürün geometrik merkez sıcaklık değişimi; (b) ürün ortalama sıcaklık değişimi; (c) ürünün absorbe ettiği ortalama güç değişimi; (d) ürünün sıcaklık değerlerine bağlı olarak değişen kayıp tanjant değerleri

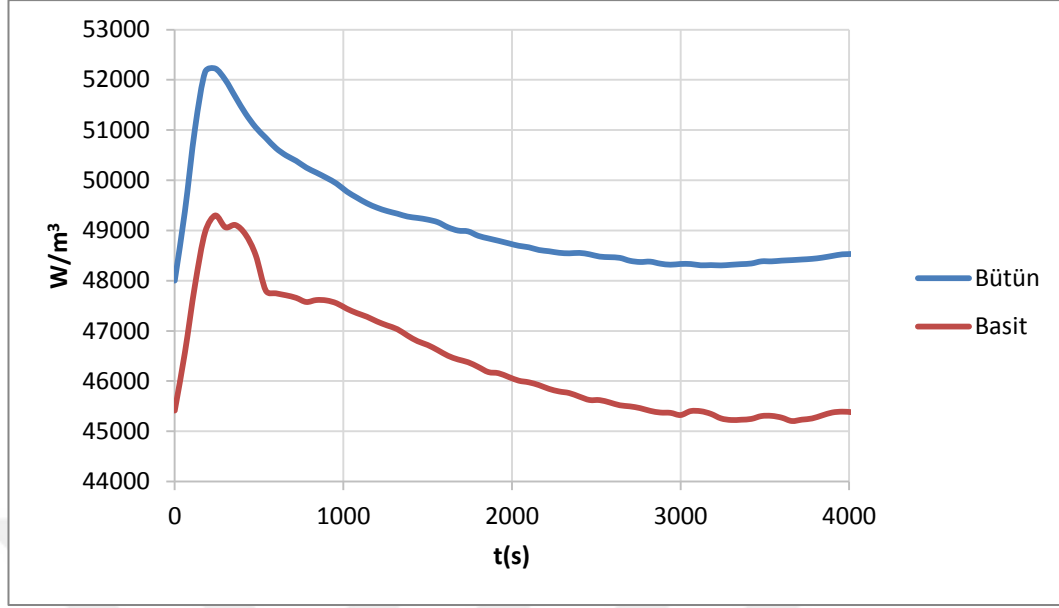


Şekil 4.17 (a)



Şekil 4.17 (b)

Şekil 4.17 devamı...



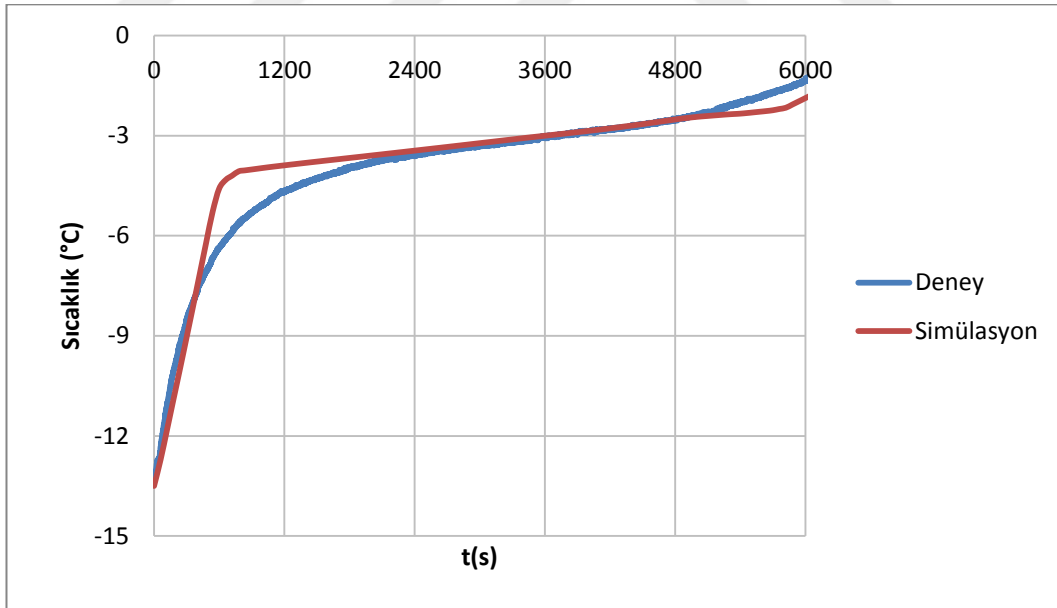
Şekil 4.17 (c)

Şekil 4.17. RF ısıtma sisteminin tüm olarak ve basitleştirilmiş geometrileri kullanılarak yapılan simülasyonlarda elde edilen (a) ürün geometrik merkez sıcaklık; (b) ürün ortalama sıcaklık değişimi; (c) ürünün absorbe ettiği ortalama güç değişiminin karşılaştırılması.

4.4. SERBEST SALINIMLI SİSTEM İÇİN GELİŞTİRİLEN MODEL SONUÇLARININ DENEYSEL VERİLERLE DOĞRULANMASI

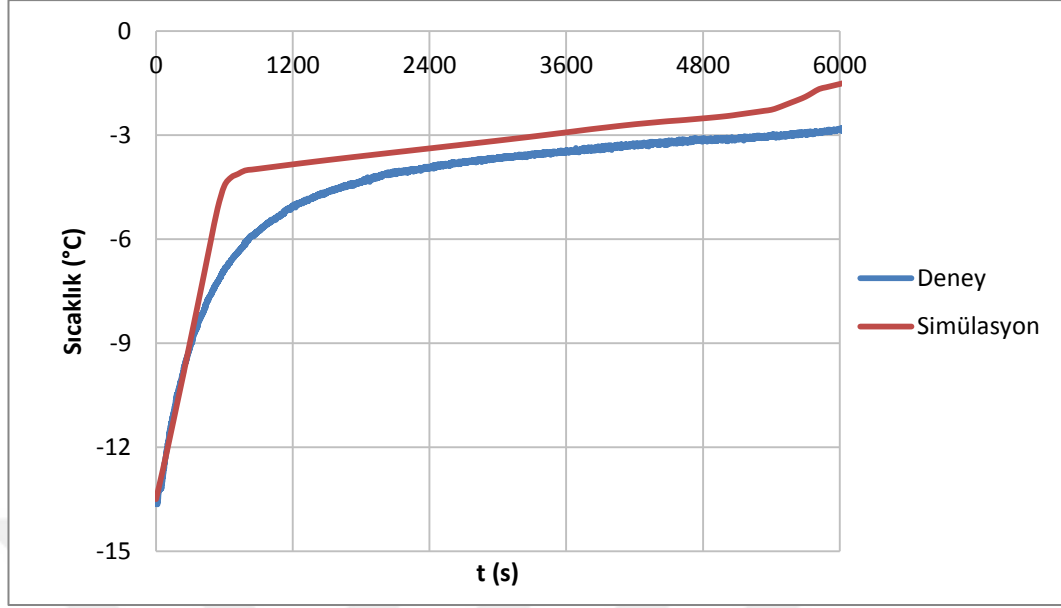
Serbest salımlı bir RF sistemde, çözdürme işlemi için bir matematiksel model geliştirilmiş ve model sonuçlarının doğrulanması amacıyla deneysel veriler elde edilmiştir. Materyal ve Metot bölümünde detaylı olarak açıklanan ve Şekil 3.9'da şematik olarak gösterilen iki farklı dondurulmuş et bloklarıyla yapılan deneylerin ve model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Bu şekillerde, model sonuçları ile deney sonuçları arasında iyi bir uyum sağlandığı görülmektedir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda RMSE değerleri, blok A (Şekil 3.9a - RF sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 12 cm) için 0.9 ve 1.3 °C ve blok B (Şekil 3.9b - RF sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 13 cm) için 1.9 ve 1.0 °C olarak belirlenmiştir.

Görüldüğü gibi, literatürden alınan veriler kullanılarak geliştirilen model sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Şekil 4.6b) sonucu elde edilen RMSE değeri $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, serbest salınımlı sistemde model doğrulama çalışmalarında RMSE değerleri, yukarıda belirtildiği gibi, 0.9 , 1.3 , 1.9 ve $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak elde edilmiştir. Serbest salınımlı sistemde, özellikle 600 s proses süresinde model sonuçları ile deney sonuçları arasında bir sapma gözlenmiştir (Şekil 4.6a, b). Bu sapmanın önemli bir sebebinin, serbest salınımlı sistemlerde, üst elektrot voltaj değerinin proses süresince sabit olarak uygulanamaması ve proses boyunca tam değerinin belirlenememesidir. Model geliştirme kapsamında kullanılan et örneğinin dielektrik değerleri deneysel olarak ölçülemeyip literatürden [Farag vd., 2008] elde edilmiştir. Dielektrik özelliklerde olan sapmaların da model sonuçlarını doğrudan etkileyeceği açıktır. Ayrıca deneylerde kullanılan problemlerin konumlarının tespiti ve deney süresince et örneği içerisinde sabit pozisyonda kalmamalarının da model ve deney sonuçları arasındaki sapmanın bir nedeni olabileceği düşünülmektedir.



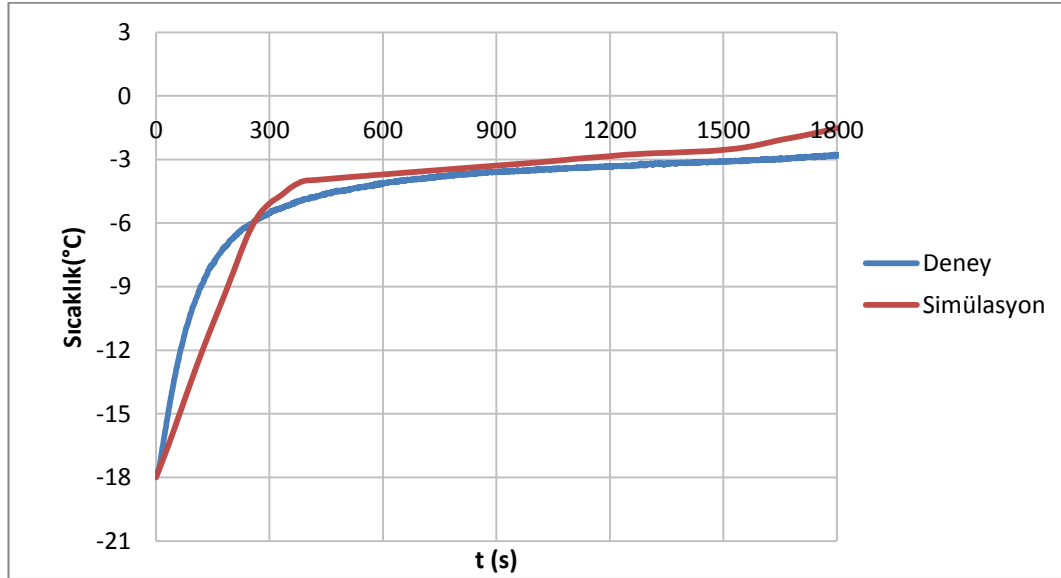
Şekil 4.18 (a)

Şekil 4.18 devamı...



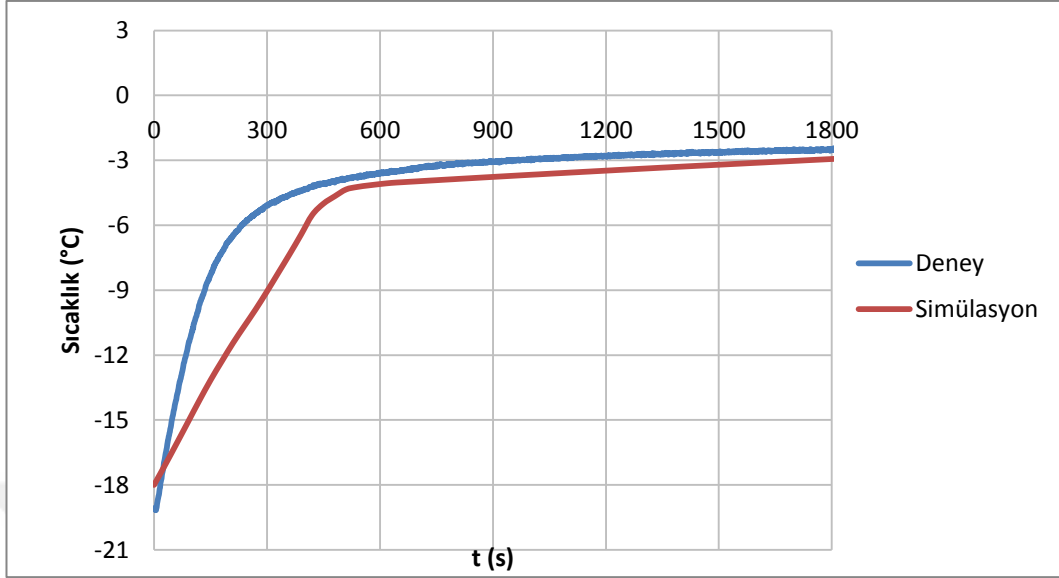
Şekil 4.18 (b)

Şekil 4.18. 2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan serbest salımlı radyo frekans sisteminde elde edilen deney sonuçları ve model sonuçlarının (a) 1. probun bulunduğu konum için karşılaştırılması (blok-A - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 12 cm); (b) 2. probun olduğu konum için karşılaştırılması (blok-A - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 12 cm).



Şekil 4.19 (a)

Şekil 4.19 devamı...



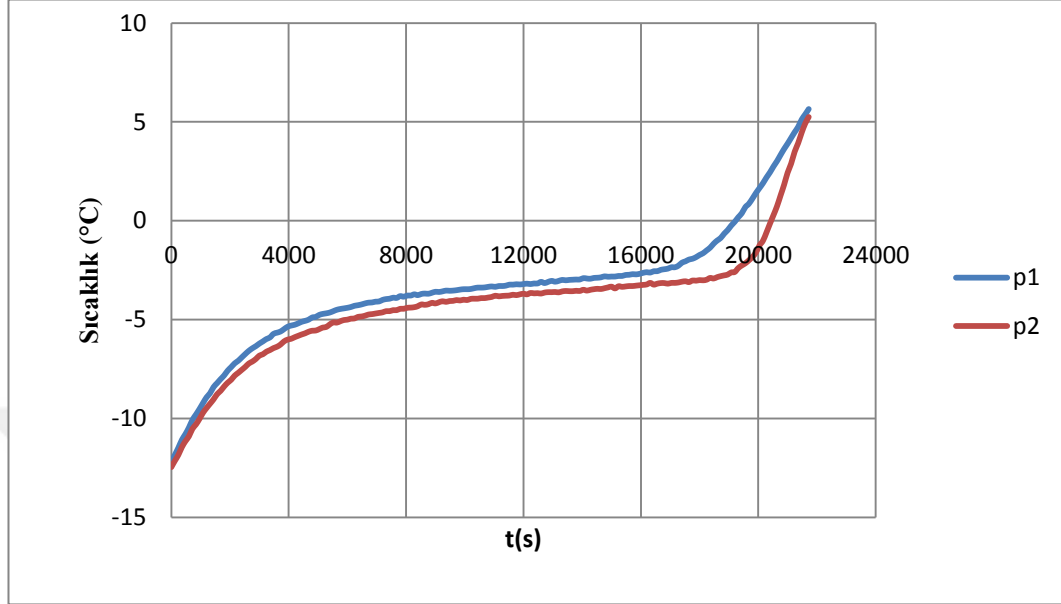
Şekil 4.19 (b)

Şekil 4.19. 2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan serbest salımlı radyo frekans sisteminde elde edilen deney sonuçları ve model sonuçlarının (a) 1. probun bulunduğu konum için karşılaştırılması (blok-B - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 13 cm); (b) 2. probun bulunduğu konum için karşılaştırılması (blok-B - sistem içerisinde elektrotlar arası uzaklık 13 cm).

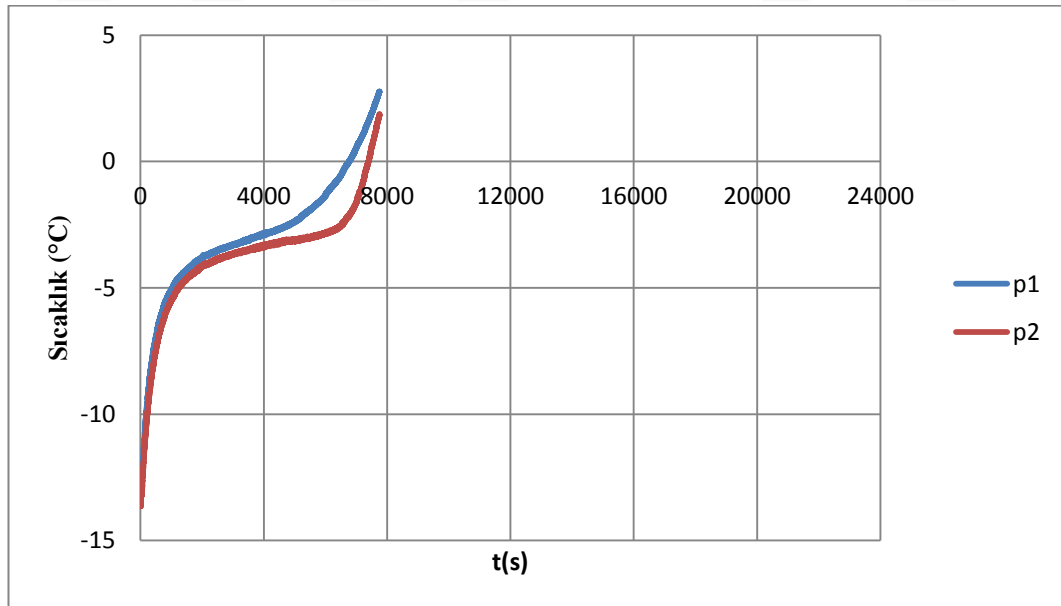
4.5. RADYO FREKANS ÇÖZDÜRME İŞLEMİNİN GELENEKSEL ÇÖZDÜRME YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Model doğrulama kapsamında yapılan deneysel çalışmaların devamında, RF çözdürme yöntemi ile geleneksel çözdürme işlemini karşılaştırmak amacıyla da bir seri deney yapılmıştır. Şekil 4.20'de oda sıcaklığında yapılan çözdürme işleminden elde edilen ürün sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi çözdürme işlemi yaklaşık 5 saat sürmüştür. Buna karşın RF uygulaması ile yapılan çözdürme işlemi ise Şekil 4.21'de görüldüğü gibi ise 2 saat sürmüştür. Bu süre literatürde yapılan diğer çözdürme işlemlerine göre oldukça uzun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni örneğin miktarının az olması ve elektrotlar arasındaki uzaklığın fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu deney kapsamında ürüne uygulanan tekrar dondurma ve çözdürme işleminin ürünün termofiziksel özelliklerinde bir değişikliğe sebep

verebileceği düşünülse de, karşılaştırma işleminde aynı örneği kullanabilmek amacıyla bu şekilde bir deneysel yöntemin kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 4.20. Geleneksel çözdürme işlemi ile iki farklı probdan elde edilen sıcaklık değişimi.



Şekil 4.21. Radyo frekans (2 kW gücünde ve 27.12 MHz frekansında çalışan serbest salınımlı radyo frekans sisteminde - elektrotlar arası uzaklık 12 cm) çözdürme işlemi ile 2 farklı probdan elde edilen sıcaklık değişimi.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Dondurma prosesi gıda endüstrisinde, gıda ürünlerinin raf ömürlerinin arttırılması ve kalitenin muhafaz edilebilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Dondurulmuş ürünlerin tüketilebilmesi veya bir proseste kullanılabilmesi amacıyla sıcaklıklarının donma noktasının üzerinde bir sıcaklığa çıkartılarak çözdürülmesi gerekmektedir. Çözdürmeden tüketilebilen ürünlere örnek olarak dondurma ve dondurulmuş meyve parçaları verilebilse de diğer dondurulmuş gıda ürünlerinin izleyen proses aşamalarında kullanılabilmeleri için çözdürülmeleri gerekmektedir. Örneğin, donmuş et ve balıkların konserve ya da başka bir proseste kullanılabilmeleri – işlenebilmeleri amacıyla çözdürme prosesine tabi tutulmaları gerekmektedir. Çözdürme işlemi sırasında ürün kalitesinde ortaya çıkacak problemlerin ve mikrobiyal gelişimin minimal düzeyde tutulabilmesi için bu işlemin mümkün olduğu kadar hızlı yapılması, çözdürme işlemi sırasında ürün sıcaklığının belirlenen bir sıcaklığı geçmemesi ve çözdürme kayıplarının da kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Endüstriyel anlamda, en yaygın olarak kullanılan çözdürme sistemleri, konveksiyonla ısı transferi temelinde çalışan sistemlerdir. Bu sistemlerde çözdürme süresinin artmasıyla ürün de, proses sıcaklığına bağlı olarak, mikrobiyal ve/veya enzimatik aktivite ve kalite kayıpları meydana gelebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemlerde prosesin uzun sürmesi ve çözdürme kayıplarının ekonomik anlamda işletme maliyetlerini etkilemesi nedeniyle bu sistemlerin yerini alacak hızlı bir çözdürme metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, endüstriyel proseslerde, tüketicilerin yüksek kalite beklentilerinin karşılanması yanında daha hızlı ve ekonomik bir işleme de gerek duyulmaktadır.

Bu kapsamda dielektrik ısıtma olarak da adlandırılabilen radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) uygulamaları, çözdürme prosesi olarak, konveksiyonel sistemlere göre, potansiyeli olan yöntemler olarak kabul edilmektedir. MW bölgede dalga boyunun, RF bölgeye göre daha kısa olmasından dolayı penetrasyon derinliğinin az olması nedeniyle ortaya çıkan sınırlamalar RF bölgede geçerli

değildir. Dalga boyunun kısa olmasının yanı sıra MW frekansının da yüksek olması nedeniyle proses edilen üründe, ürünün sistem içerisindeki konumuna ve proses süresine bağlı olarak, aşırı ısınmış ya da yanmış bölgelerin oluşması RF ile proses edilen ürünlere göre daha belirgin olarak gözlenmektedir. RF bölgede, dalga boyuna bağlı olarak, MW ile karşılaştırıldığında, daha derine nüfuz edebilme düşük frekanslarda gerçekleşmekte ve bu kapsamda ürün sıcaklık değişimini kontrolü daha kolay yapılabilmektedir. Literatürde, MW sistemler kullanılarak çözdürme işleminin modellenmesi konusunda farklı çalışmalar bulunurken, RF çözdürme işleminin modellenmesi konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu kapsamda öncelikle, RF ısıtma işleminin modellenmesi amacıyla COMSOL çoklu fizik programı kullanılarak bir model geliştirilmiş ve bu model literatür verileri ile doğrulanmıştır. Daha sonraki aşamada bu modele faz değişimi eklenerek, dondurulmuş gıda ürünlerinin çözdürme işlemi sırasında ürün içi sıcaklık dağılımı ve RF sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik dalga dağılımının belirlenmesi amacıyla bir model geliştirilmiş ve bu model 50 Ω 'luk RF sistemler ile geleneksel serbest salımlı RF sistemlerden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu kapsamda, 50 Ω 'luk RF sistemler için doğrulama çalışmalarında literatürden elde edilen deneysel veriler kullanılırken, serbest salımlı sistemler için yapılan doğrulama çalışmaları için bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde iki farklı boyutta dondurulmuş et örnekleri kullanılmış ve RF çözdürme işlemi sırasında fiber optik problar kullanılarak elde edilen sıcaklık değişimleri model doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır.

Faz değişimini de içeren 3 boyutlu model doğrulama çalışmalarında 50 Ω 'luk RF sistem için yapılan çalışmada model ve deneysel veriler arasındaki uyumluluk kapsamında RMSE değeri 0.8 $^{\circ}\text{C}$ olarak elde edilirken serbest salımlı sistemlerde yapılan çalışmalarda 0.9, 1.3, 1.9 ve 1.0 $^{\circ}\text{C}$ değerleri elde edilmiştir. Bu değerler model doğrulama çalışmaları kapsamında kabul edilebilir değerler olarak kabul edilmiştir. Ancak model verileri ile deneysel verilerin grafiksel – görsel karşılaştırmasında bazı uyumsuzluklar olduğu da gözlenmiştir. Bu uyumsuzlukların, serbest salımlı RF sistemde üst elektrot voltaj değerinin deneysel olarak

belirlenemeyip deneme yanılma yoluyla tespit edilmesi ve literatürden elde edilen dielektrik ve termofiziksel özellikler ile deneylerde kullanılan et örneklerinin özellikleri arasında olabilecek farklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Geliştirilen RF ısıtma ve çözdürme modellerinde, model doğrulama çalışmaları dışında, ürün sıcaklık değişimlerine ürün boyutlarının etkisi ve ağ bağımsızlık çalışmaları da yapılmıştır. Ağ bağımsızlık çalışmalarında, RF proses sırasında ürün ortalama sıcaklığında meydana gelen değişmelere ve ürün tarafından absorbe edilen güç miktarı değerleri kullanılmıştır.

RF çözdürme yöntemi, ürün içerisinde hacimsel - eş zamanlı – geleneksel yöntemlere göre homojen kabul edilebilecek bir ısınma sağlamasına bağlı olarak, son yıllarda araştırma ve endüstriyel uygulama açısından popüler bir alandır. Ancak, yöntemin dondurulmuş gıda ürünlerine uygulanması sırasında prosesin ürün sıcaklık değişimleri kapsamında kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da proses kontrol ve RF sistem tasarımına yardımcı olabilmek amacıyla RF ısıtma ve çözdürme modelleri geliştirilmiş ve model sonuçları deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Belirtilen içeriği ile, bu çalışmanın, gıda endüstrisinde kullanılabilir RF çözdürme sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu açısından öncü bir çalışma olduğu düşünülmektedir. Daha güçlü işlemciye sahip bilgisayarların da kullanılmasıyla hareketli bir bant üzerinde elektrotlar arasındaki uzaklığın dinamik olarak değiştiği bir sistem de RF çözdürme işleminin modellenmesi endüstriyel açıdan faydalı bir çalışma olacaktır.

5. KAYNAKLAR

Alfaifi, B., Tang, J., Jiao, Y., Wang, S., Rasco, B., Jiao, S., & Sablani, S. “Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Model development and validation.”, *Journal of Food Engineering*, 120, 268-276, (2014).

Awuah, G. B., Ramaswamy, H. S., Economides, A., ve Mallikarjunan, K. “Inactivation of *Escherichia coli* K-12 and *Listeria innocua* in milk using radio frequency (RF) heating.”, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 396-402, (2005).

Basak, T., ve Ayappa, K. G., “Analysis of microwave thawing of slabs with effective heat capacity method.”, *AIChE journal*, 43(7), 1662-1674, (1997).

Bengtsson, N.” Electronic defrosting of meat and fish at 35 and 2450 MHz—a laboratory comparison”, *Food Technology*, 17(10), 1309–1312, (1963).

Bialod, D., Jolion, M., ve LeGoff, R., “Microwave thawing of food-products using associated surface cooling.”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 13(3), 269-274. (1978).

Birla, S. L., Wang, S., Tang, J., ve Hallman, G., “Improving heating uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control.”, *Postharvest Biology and Technology*, 33(2), 205-217, (2004).

Birla, S. L., Wang, S., Tang, J., Fellman, J. K., Mattinson, D. S., & Lurie, S., “Quality of oranges as influenced by potential radio frequency heat treatments against Mediterranean fruit flies.”, *Postharvest Biology and Technology*, 38(1), 66-79, (2005).

- Birla, S.L., Wang, S., Tang, J., “Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water”, *Journal of Food Engineering*, 84 (2), 270–280, (2008).
- Cathcart, W. H., & Parker, J. J. “Defrosting frozen foods by high-frequency heat”, *Food Res*, 11, 341–344, (1946).
- Chamchong, M., & Datta, A. K., “Thawing of foods in a microwave oven: I. Effect of power levels and power cycling.”, *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 34(1), 8-21, (1999).
- Chan, T.V.C.T., Tang, J., Younce, F.,. “3-Dimensional numerical modeling of an industrial radio frequency heating system using finite elements”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 39 (2), 87–106, (2004).
- Chevalier, D., Le Bail, A., Chourot, J.M. ve Chantreau, P. “High pressure thawing of fish (whiting): influence of the process parameters on drip losses”, *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie*, 32(1):25–31, (1999).
- Choi, Y., and M.R. Okos., “Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods.”, *Food Engineering and Process Applications*, 1:93-101, (1986).
- Clark, T.D.,. “The Current Status Of Radio Frequency Post-Baking Drying Technology” ,The 72nd annual technical conference of the biscuit and cracker manufacturers' association. October 21, Texas, (1997).
- Coleman, C. J., “The microwave heating of frozen substances. *Applied Mathematical Modelling*”, 14(8), 439-443, (1990).
- Delgado, A.E. ve Sun, D.W. “Heat and mass transfer models for predicting freezing processes : a Review”, *Journal of Food Engineering*, 47:157-174, (2001).

- Dev, S. R., Kannan, S., Gariepy, Y., & Raghavan, V. G., “Optimization of radiofrequency heating of in-shell eggs through finite element modeling and experimental trials.”, *Progress In Electromagnetics Research B*, 45, 203-222, (2012).
- Hoke, K., Houska, M. Kyhos, K. Landfeld, A. “Use of a computer program for parameter sensitivity studies during thawing of foods”, *Journal of Food Engineering*, 52:219–225, (2002).
- Erdoğdu, F., "Mathematical modeling of transport phenomena for simulation and optimization of food processing operations.", *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*, (Editörler: Yanniotis, S., Taoukis, P., Stoforos N.G., Karathanos V.T.,) 473-487, Springer US, (2013).
- Farag, K. W., Lyng, J. G., Morgan, D. J., & Cronin, D. A. “A comparison of conventional and radio frequency tempering of beef meats: Effects on product temperature distribution.”, *Meat science*, 80(2), 488-495, (2008).
- Farag, K. Lyng, J. G. Morgan, D. J. Cronin, D. A. “Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of –18 to +10 °C”, *Meat Science*, 79 (4) : 740–747, (2008).
- Farag, K. W., Marra, F., Lyng, J. G., Morgan, D. J., & Cronin, D. A., “Temperature changes and power consumption during radio frequency tempering of beef lean/fat formulations.”, *Food and bioprocess technology*, 3(5), 732-740, (2010).
- Farag, K. Lyng, J. G. Morgan, D. J. Cronin, D. A. “A Comparison of Conventional and Radio Frequency Thawing of Beef Meats: Effects on Product Temperature Distribution”, *Food Bioprocess Technology*, 4:1128–1136, (2011).

- Fellows, P. Food processing technology – principles and practice (2nd ed.), 369–380). Chichester, UK: Ellis Horwood, (2000).
- Fu, W. R., & Hsieh, C. C. “Simulation and verification of twodimensional ohmic heating in static system”, Journal of Food Science, 64(6), 946–949, (1999).
- Fennema, O. “Loss of vitamins in fresh and frozen foods”, Food Technology, 12, 32-38, (1977).
- Gambuteanu, C., ve Alexe, P. “Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of unpackaged pork Longissimus dorsi. ”, Annals of the University Dunarea de Jos of Galati-Fascicle, VI: Food Technology, 37(1), 98-107, (2013).
- Groulx, D., & Ogoh, W. “Solid-liquid phase change simulation applied to a cylindrical latent heat energy storage system.”, In COMSOL Conference 2009., (2009).
- Guo, Q., Piyasena, P., Mittal, G.S., Si, W., Gong, J., “Efficacy of radio frequency cooling in the reduction of Escherichia coli and shelf stability of ground beef”, Food Microbiology 23:(2), 112–118, (2006).
- Haugland A., “Industrial Thawing Of Fish- to improve quality, yield and capacity”,A Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology, Ph.d Thesis, (2002)
- İçier, F., İzzetoglu, G. T., Bozkurt, H., & Ober, A. “Effects of ohmic thawing on histological and textural properties of beef cuts.”, Journal of food engineering, 99(3), 360-365., (2010).

- James, S. J., & James, C. “Thawing and tempering. In Meat Refrigeration” . Woodhead Publishing, Cambridge, 159–187, (2002).
- Jason, A. C., & Sanders, H. R., “Dielectric thawing of fish”, Food Technology , 16(6), 101–112, (1962).
- Jiao, Y., Tang, J., Wang, S., Koral, T., “Influence of dielectric properties on the heating rate in free-running oscillator radio frequency systems”, Journal of Food Engineering. 120, 197–203, (2014).
- Kimura, Y., “Development of thawing technology using far-infrared radiation”, Journal of Japan Society of Food Engineering (Shokuhin Kako Gijutsu) 9: 231–235, (1989)
- Kumar D., Murthy G. S., and Tiwari G., “Introduction to Advanced Food Process Engineering” (Editör: Sahu J. K.) Microwave and Radio Frequency Heating of Food Products: Fundamentals, Modeling, and Applications, CRC Press, NW, 3-27, (2014)
- Laycock, L., Piyasena, P., Mittal, G.S.,. Radio frequency cooking of ground, comminuted and muscle meat products. Meat Science, 65:(3), 959–965, (2003).
- Llave, Y., Terada, Y., Fukuoka, M., & Sakai, N. “Dielectric properties of frozen tuna and analysis of defrosting using a radio-frequency system at low frequencies.”, Journal of Food Engineering, 139, 1-9, (2014).
- Li B., Sun D.-W., “Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review”, Journal of Food Engineering , 54: 175–182, (2002).

- Luechapattanaporn, K., Wang, Y., Wang, J., Tang, J., Hallberg, L. M., & Dunne, C. P. "Sterilization of scrambled eggs in military polymeric trays by radio frequency energy.", *Journal of Food Science*, 70(4), E288-E294, (2005).
- Makita, T. "Application of high pressure and thermophysical properties of water to biotechnology", *Fluid Phase Equilibrium*, 76, 87–95, (1992).
- Marra, F., Lyng, J., Romano, V., McKenna, B., "Radiofrequency heating of foodstuff: solution and validation of a mathematical model", *Journal of Food Engineering*, 79:(3), 998–1006, (2007).
- Marra, F. Zhang, L. Lyng, J. G., "Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances", *Journal of Food Engineering*, 91:497–508, (2009).
- Marshall, M. G., & Metaxas, A. C., "Modeling of the radio frequency electric field strength developed during the RF assisted heat pump drying of particulates.", *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 33(3), 167-177, (1998).
- Miles, C. A., Morley, M. J., ve Rendell, M. "High power ultrasonic thawing of frozen foods", *Journal of Food Engineering*, 39:151–159, (1999).
- Moulson, A. J. & Herbert, J. M., *Electroceramics*, Chapman and Hall , (1990).
- Moyer, J. C., and E. Stotz. "The blanching of vegetables by electronics.", *Food technology*, 1.2 252-257, (1947).
- Mussa, D.M. ve LeBail, A.. "High pressure thawing of fish: evaluation of the process impact on *Listeria innocua*", *IFT Annual Meeting, Institute of Food Technologists*, (2000).

Neophytou, R.I., Metaxas, A.C., “Combined 3D FE and circuit modeling of radio frequency heating systems”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 33:(4), 243–262, (1998).

Neophytou, R.I., Metaxas, A.C., “Combined tank and applicator design of radio frequency heating systems”, *Microwaves, Antennas and Propagation, IEEE Proceedings*, 146:(5), 311–318, (1999).

Orsat, V., Gariépy, Y., Raghavan, G.S.V., Lyew, D., “Radio-frequency treatment for ready-to-eat fresh carrots”, *Food Research International*, 34, 527–536, (2001).

Orsat, V., Raghavan, G.S.V., “Radio-frequency processing” , *Emerging Technologies for Food Processing*, (Editör: Sun, D.-W.), Elsevier Ltd., New York, USA, 445–468, (2005).

Pangrle, B. J., Ayappa, K. G., Davis, H. T., Davis, E. A., & Gordon, J., “Microwave thawing of cylinders.”, *AIChE journal*, 37(12), 1789-1800, (1991).

Pham, Q. T., “Modeling heat and mass transfer in frozen foods: a review.”, *International Journal of Refrigeration*, 29:876-888, (2006).

Pham Q. T. “Thawing” Operations in Food Refrigeration, (Editör: Mascheroni, R. H.), CRC Press, 331-352, (2012).

Piyasena, P., Dussault, C., Koutchma, T., Ramaswamy, H. S., & Awuah, G. B. “Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties—a review.”, *Critical reviews in food science and nutrition*, 43(6), 587-606, (2003).

Pizza, A., Pedrielli, R., Busetto, M., Bocchi, M., & Spinelli, R., “Use of radiofrequencies in the meat processing industry. Effects on the quality

characteristics of meat and cooked meat products.”, *Industria Conserve*, 72, 122–133, (1997).

Ramaswamy, H., & Tang, J., “Microwave and radio frequency heating.”, *Food Science and Technology International*, 14(5), 423-427, (2008).

Reznick, D. “Ohmic heating of fluid foods”, *Food Technology*, (May), 250–251, (1996).

Roberts, J. S., Balaban, M. O., Zimmerman, R., & Luzuriaga, D. “Design and testing of a prototype ohmic thawing unit.”, *Computers and electronics in agriculture*, 19(2), 211-222, (1998).

Romano, V., & Marra, F., “A numerical analysis of radio frequency heating of regular shaped foodstuff.”, *Journal of Food Engineering*, 84(3), 449-457, (2008).

Rowley, A.T., “Radio frequency heating”, *Thermal Technologies in Food Processing* (Editör: Richardson, P.), Woodhead Publishing Cambridge, Cambridge, 127–162., (2001).

Ryynanen S., “The Electromagnetic Properties of Food Materials: A Review of the Basic Principles.”, *Journal of Food Engineering.*, 26, 409-429 (1994)

Sanders, H. R. “Dielectric thawing of meat and meat products”, *Journal of Food Technology*, 1, 183–192, (1966).

Sakai N., and Mao W., “Infrared Heating”, *Thermal food processing: new technologies and quality issues.* (Editör: Sun, D. W.), CRC Press, FL, 493-522, (2006).

- Taher, B. J., & Farid, M. M., “Cyclic microwave thawing of frozen meat: experimental and theoretical investigation.”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 40(4), 379-389, (2001).
- Tang, J., Wang, Y., Chan, T.V.C.T.,” Radio frequency heating in food processing” *Novel Food Processing Technologies*. (Editör: Gustavo Barbosa-Cánovas, G.V., Tapia, M.S., Cano, M.P.), Marcel Dekker, New York, NY, USA, 501–524, (2005).
- Tiwari, G., S. Wang, J. Tang, and S. L. Birla. "Computer simulation model development and validation for radio frequency (RF) heating of dry food materials." *Journal of Food Engineering* 105, no. 1: 48-55, (2011).
- Taoukis, P., Davis, E. A., Davis, H. T., Gordon, J., ve Talmon, Y., “Mathematical modeling of microwave thawing by the modified isotherm migration method.”, *Journal of Food Science*, 52(2), 455-463, (1987).
- Uslu M. K., Certel M. “Dielektrik Isıtma ve Gıda İşlemede Kullanımı” *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi* (3) 61-69, (2006).
- Uyar, Rahmi, Ferruh Erdogdu, and Francesco Marra. "Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes: A computational study." *Food and Bioproducts Processing*, 92, 243–251, (2013).
- Yang, J., Zhao, Y., Wells, J.H., “Computer simulation of capacitive radio frequency (RF) dielectric heating on vegetable sprout seeds”, *Journal of Food Process Engineering*, 26:239–263, (2003).
- Yun, C. G., Lee, D. H., & Park, J. Y. “Ohmic thawing of afrozen meat chunk”, *Journal of Food Science and Technology* , 30(4), 842–847, (1998).

- Vicente A. A., Castro I., ve Teixeira J. A. "Ohmic Heating for Food Processing", Thermal food processing: new technologies and quality issues. (Editör: Sun, D. W.), CRC Press, FL, 493-522, (2006).
- Virtanen, A. J., Goedeken, D. L., & Tong, C. H., "Microwave Assisted Thawing of Model Frozen Foods Using Feed-back Temperature Control and Surface Cooling.", *Journal of Food Science*, 62(1), 150-154, (1997).
- Wang, S., Tang, J., Johnson, J. A., Mitcham, E., Hansen, J. D., Cavaliere, R. P., Biasi, B., "Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in in-shell walnuts.", *Postharvest Biology and Technology*, 26(3), 265-273, (2002).
- Wang, Y., Wig, T.D Tang, J. And Hallberg, L.M. "Sterilization of Foodstuffs Using Radio Frequency Heating", *Journal of Food Science*, 68:(2), 539-544, (2003).
- Wang, Y., Wig, T. D., Tang, J., & Hallberg, L. M. "Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization.", *Journal of Food Engineering*, 57(3), 257-268, (2003).
- Wang Y., ve Wang J. "Computer Simulation of Radio Frequency Heating", *Food Processing Operations Modeling Design and Analysis*, Second Edition, (Editör: Joseph M . Irudayaraj and Soojin Jun), CRC Press, 81–111, (2008).
- Wang, S., Tiwari, G., Jiao, S., Johnson J.A., & Tang, J. "Developing postharvest disinfestation treatments for legumes using radio frequency energy", *Biosystems Engineering*, 105(3), 341-349, (2010).

Wang, J., Luechapattapanorn, K., Wang, Y., & Tang, J., “Radio-frequency heating of heterogeneous food–Meat lasagna.”, *Journal of Food Engineering*, 108(1), 183-193, (2012).

Watanebe S., Kakuta Y., ve Hashimoto O. “Microwave Thawing Examinations of a Frozen Material (Tuna) in a Microwave Oven.” (2006)

Zeng, X., & Faghri, A., “Experimental and numerical study of microwave thawing heat transfer for food materials.”, *Journal of heat transfer*, 116(2), 446-455, (1994).

Zhao, Y., Flugstad, B., Kolbe, E., Park, J. W., & Wells, J. H. “Using capacitive (radio frequency) dielectric heating in food processing and preservation—a review”, *Journal of Food Process Engineering*, 23(1), 25-55, (2000).

Zhong, Q., Sandeep, K. P., & Swartzel, K. R., “Continuous flow radio frequency heating of particulate foods.”, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(4), 475-483, (2004).

Zhu, S., Ramaswamy, H.S. and Simpson, B.K.. “Effect of high-pressure versus conventional thawing on color, drip loss and texture of Atlantic salmon frozen by different methods”, *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie* 37(3):291–299, (2004).

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Rahmi Uyar

Doğum Tarihi: 10/01/1972

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Düz Lise	Mersin Atatürk Lisesi	1987-1990
Lisans	Gıda mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2002-2006
Yüksek Lisans	Gıda mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2007-2009

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Uyar, Rahmi, and Ferruh Erdoğan. "Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling." *Journal of Food Engineering*, 93(3), 337-343, (2009).
2. Erdoğan, F, Uyar R, and Palazoğlu, T. K., "Experimental comparison of natural convection and conduction heat transfer." *Journal of Food Process Engineering*, 33(S1), 85-100, (2010).
3. Uyar, R., & Erdogdu, F.. "Numerical evaluation of spherical geometry approximation for heating and cooling of irregular shaped food products", *Journal of Food Science*, 77(7), E166-E175, (2012)
4. Karaduman, M., Uyar, R., & Erdogdu, F., "Toroid cans—An experimental and computational study for process innovation", *Journal of Food Engineering*, 111(1), 6-13, (2012).
5. Uyar R., Erdogdu, F., Marra F., "Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes: A computational study", *Food and Bioproducts Processing*, 91, 243-251, (2013).
6. Uyar, R., Bedane, T. F., Erdoğan, F., Palazoğlu T. K., Farag, K.W., Marra, F., "Radio-frequency thawing of food products – A computational study", *Journal of Food Engineering*, 146, 163–171, (2015).
7. Marra, F.. Bedane T. F., Uyar, R. Erdogdu F., Lyng J.G. "Application of Radiowave Frequency in Food Processing" *Conventional and Advanced Food Processing Technologies*, 501-514, (2015)