

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**DONDURULMUŞ GIDA ÜRÜNLERİNİN ÇÖZDÜRÜLMESİ AMACIYLA HAVA
ÜFLEME DESTEKLİ RADYO FREKANS SİSTEMLERİN TASARIMI**

Ozan ALTIN

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2023**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

DONDURULMUŞ GIDA ÜRÜNLERİNİN ÇÖZDÜRÜLMESİ AMACIYLA HAVA ÜFLEME DESTEKLİ RADYO FREKANS SİSTEMLERİN TASARIMI

Ozan ALTIN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Dondurulmuş gıda ürünlerinin temperlemesinde/çözdürülmesinde ısı işlem olarak yaygın bir şekilde konveksiyon ve kondüksiyon ısı transferine dayalı geleneksel prosesler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde ısı transferi ürün yüzeyinden merkezine doğru yol aldığından ürün merkezinin çözünmesi için gereken sürede ürün yüzeyinde sıcaklığın yükselmesinden kaynaklı olarak kalite parametrelerinde, özellikle hacim olarak geniş ürünlerde, kayıp yaşanmaktadır. Yenilikçi yöntemlerden olan radyo frekans sistemlerde ürün elektromanyetik enerji ile etkileşime girerek üründe hacimsel olarak bir ısınma gerçekleşmektedir. Radyo frekans sistemde üründe hacimsel bir ısınma sağlandığından geleneksel yöntemlere göre proses süresinde ciddi kısaltmalar olmaktadır. Ancak, üründe hacimsel bir ısınma gerçekleşse de elektromanyetik enerjinin ürün köşe ve kenarlarında kırılıma uğramasından dolayı bu bölgelerde hızlı bir sıcaklık artışı gözlenmekte ve tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilememektedir. Radyo frekans sisteminin çözdürme prosesinde kullanılabilmesi amacıyla hava üfleme sistemleri ile birleştirilmesi ve sistem tasarımlarının yapılması tez kapsamında matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. Bu detaylı sistem tasarımının yapılabilmesi için radyo frekans prosesindeki parametrelerin ürün sıcaklık dağılımına etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elektrot dizaynının ve potansiyel elektrotun konumunun etkisi hem matematiksel model ortamında hem de üç farklı radyo frekans sistemde yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kesikli tek kaviteli ve sürekli tünel olmak üzere üç farklı radyo frekans sistem tasarımı hava üfleme sistemleri ile birleştirilerek hava hızı ve uygulanan güç değerinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Matematiksel model sonuçlarına göre tekdüze sıcaklık dağılımı bakımından en iyi sonuç 2750 V güç ve 5 m/s hava hızı uygulandığı koşulda elde edilmiştir.

Kasım 2023, 141 sayfa

Anahtar Kelimeler: Radyo frekans, çözdürme, temperleme, hava üfleme sistemleri, tekdüze sıcaklık dağılımı

ABSTRACT

Ph. D Thesis

DESIGN OF RADIO FREQUENCY SYSTEMS COMBINED WITH AIR IMPINGEMENT FOR THAWING OF FROZEN FOOD PRODUCTS

Ozan ALTIN

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Conventional methods based on convection and conduction heat transfer are widely used for thawing/tempering food products. With this system, since heat transfer travel from surface to center of sample, it is high possible to face quality lost during the obtain the tempering or thawing temperature at center of sample. In radio frequency system which is an innovative food processing method, the sample interacts with electromagnetic energy and volumetric heating occurs in the sample. There is a significant reduction in process time compared the conventional method due to the volumetric heating in radio frequency systems. However, the refraction of electromagnetic energy at corners and edges of sample results in non-uniform temperature distribution, especially thawing process. For this reason, mathematical model studies were carried out to design radio frequency combined with air impingement system to eliminate the high temperature problem at surface of sample. In order to developed this kind of radio frequency system, the effects of the parameters in the radio frequency process were investigated by both experimental and mathematical model studies. Electrode design, orientation of potential electrode and electrode distance effects on the temperature distribution were compared in three different radio frequency systems. According to results, batch single cavity and continuous tunnel cavity were developed combined with air impingement system. In developed combined radio frequency systems, various applied voltage and air velocity were investigated to obtained uniform temperature distribution. In terms of the temperature uniformity, suitable result was obtained applied 2750 V and 5 m/s air velocity conditions.

November 2023, 141 pages

Key Words: Radio frequency, tempering, thawing, air impingement systems, temperature uniformity

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans tezimin önsöz ve teşekkür bölümünde danışmanım Prof. Dr. Ferruh Erdoğan için “bir danışman hocadan fazlası olduğunu” belirtmiştim. Beş yıllık doktora süresince akademik olarak gelişmemi sağlayan ve değerli bilgileri ile bu uzun yolculukta yol gösterdiği ve hep daha iyisini elde etmem için beni zorladığı için ama en önemlisi hayat yolculuğumda bana ışık tuttuğu ve tecrübelerini aktardığı için danışmanım Sayın Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU’ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Bu süreçteki en büyük destekçim, en iyi arkadaşım, her zaman yanımda olan ve sevgisiyle bana güç veren uzak mesafelerin bir engel olmasına izin vermeyen değerli eşim Berfu İNCEÇAM ALTIN’a,

Hayata bakış açısıyla, hedefleriyle, çok çalışmasıyla ve enerjisiyle bana pozitiflik aşılayan ama yakışıklılığıyla sinirimi bozan kardeşim Hakan ALTIN’a,

Benim şimdiki ben olmamı sağlayan ve mutlu bir aile ortamında yetiştiren değerli annem Saniye ALTIN ve babam Şaban ALTIN’a,

Değerli CF π grup üyelerinin, güzel bir çalışma ortamı oluşturduğumuz ve hep yanımda oldukları için hepsine, tez izleme komitesi toplantılarında bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösterdikleri için Doç. Dr. Özge ŞAKIYAN DEMİRKOL ve Dr. Öğretim Üyesi Rahmi UYAR’a, misafir araştırmacı olarak bulunduğum Gaziantep Üniversitesi ve Georgia Üniversitesi kurumlarında bana her türlü desteği verdikleri için Prof. Dr. Fahrettin GÖĞÜŞ ve Prof. Dr. Fanbin KONG’a sonsuz teşekkürleri sunarım.

Bu çalışmanın bir bölümü TÜBİTAK -1001 (proje no: 217O070 - Vurgulu hava jeti destekli radyo frekans çözdürme prosesi tasarımı) ve bir bölümü TUBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programınca desteklenmiş olup; doktora süresince aldığım YÖK 100/2000 ve TUBİTAK 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı destekleri kapsamında TÜBİTAK ve YÖK kurumlarına da ayrıca teşekkür ederim.

Ozan ALTIN

Ankara, Kasım 2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER	iii
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	13
3.1 DeneySEL Çalışmalar	18
3.1.1 Üç radyo frekans sistemde (bölüm – 2) gerçekleştirilen deneySEL çalışmalar.....	18
3.1.1.1 Tylose hamuru kullanılarak gerçekleştirilen ısıtma deneyleri.....	19
3.1.1.2 Dondurulmuş tavuk göğsü örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen çözündürme deneyleri.....	22
3.1.2 Dondurulmuş blok ton balığı kullanılarak gerçekleştirilen çözündürme deneyleri.....	27
3.2 Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları	29
3.2.1 Farklı elektrot geometrileri temelinde gerçekleştirilen matematiksel model çalışmaları	29
3.2.2 Üç farklı radyo frekans sistemde matematiksel model geliştirme çalışmaları.....	33
3.2.3 Dondurulmuş ton balığı örneklerinin radyo frekans uygulama ile çözündürme prosesi için geliştirilen matematiksel model çalışmaları	35
3.2.4 Dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesi amacıyla endüstriyel ölçekte radyo frekans sistem tasarımı.....	38
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	42
4.1 Farklı Elektrot Geometrileri Temelinde Gerçekleştirilen Matematiksel Model Çalışmaları	42
4.2 Üç Farklı Radyo Frekans Sisteminde Gerçekleştirilen DeneySEL ve Matematiksel Model Çalışmaları	48
4.2.1 Tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model çalışmaları	50
4.3 Üç Farklı Radyo Frekans Sisteminde Gerçekleştirilen Dondurulmuş Tavuk Göğsü Örneklerine Uygulanan DeneySEL Çalışmalar	61
4.3.1. Radyo Frekans Sistem 1	62
4.3.2 Radyo Frekans Sistem 2	66
4.3.3 Radyo frekans sistem 3	79
4.4 Dondurulmuş Blok Ton Balığı Çözündürme Deneyleri.....	88
4.5 Dondurulmuş Ürünlerin Çözündürülmesi Amacıyla Endüstriyel Ölçekte Radyo Frekans Sistem Tasarımı	100
4.5.1 Kesikli tek kaviteli hava üfleme jet kombineli radyo frekans sistem.....	103

4.5.2 Sürekli tünel iki kaviteli hava üfleme slot jet kombineli radyo frekans sistemler.....	110
5. SONUÇ.....	131
KAYNAKLAR	133



SİMGELER DİZİNİ

c	Işık hızı (2999792458 m/s)
cm	Santimetre
mm	Milimetre
g	Gram
kg	Kilogram
c_p	Özgül ısı (J/kg.K)
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
g	Yerçekimi ivmesi (m_2/s)
GHz	Giga Hertz
MHz	Mega Hertz
M_0	Çözdürme öncesi ürün ağırlığı (g)
M_s	Çözdürme sonrası ürün ağırlığı (g)
M_1	Pişmeden önce ürün ağırlığı (g)
M_2	Pişmeden sonra ürün ağırlığı (g)
L^*	Renk parametresi parlaklık
a^*	Renk parametresi kırmızılık
b^*	Renk parametresi sarılık
ΔE^*	Renk farkı değeri
$T _\sigma$	Ürün – hava ara yüzey sıcaklığı
T_∞	Ortam sıcaklığı
h	Konveksiyon ısı transferi katsayısı ($W/m^2-^\circ C$)
K	Kelvin
k	Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m-^\circ C$)
m	Kütle (kg)
V	Voltaj (V)
kW	Kilo Watt
s	Saniye
T	Sıcaklık ($^\circ C$)
T_i	Başlangıç sıcaklığı ($^\circ C$)

v	Hız (m/s)
$ \vec{E} $	Elektriksel alan
ϵ_0	Boşluğun geçirgenlik değeri (8.854×10^{-12} F/m)
ϵ	Ürünün geçirgenliği
ΔT	Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)
$^{\circ}\text{C}$	Derece Celcius
Q_{abs}	Absorbe edilen enerji (W/m^3)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ϵ'	Dielektrik Katsayısı
ϵ''	Dielektrik Kayıp faktörü
f	Frekans (Hz)
λ	Dalga boyu
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
Δt	Zaman aralığı
π	Pi sayısı
u	Hava hız profili (m/s)
ρ_f	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
F	Yerçekimi kuvveti
p	Basınç (Pa)

Kısaltmalar

RF	Radyo frekans
AÜ	Ankara Üniversitesi
UGA	University of Georgia
GU	Gaziantep Üniversitesi
RMSE	Kök ortalama kare hatası
TUI	Sıcaklık tekdüzelik indeksi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1	Tez kapsamında yapılan deneysel ve matematiksel model çalışmaları dört gruba ayrılmıştır	13
Şekil 3.2	Radyo frekans sistemlerde kullanılan elektrot tipleri; (a) plaka elektrot, (b) çapraz elektrot, (c) püskül elektrot	15
Şekil 3.3	Deneysel çalışmalarda kullanılan radyo frekans (RF) sistemler ve özellikleri (a) Gaziantep Üniversitesi, (b) Georgia Üniversitesi ve (c) Ankara Üniversitesi'nde bulunan RF sistem.....	17
Şekil 3.4	Farklı radyo frekans sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan tylose örneğinin boyutları ve fiber optik noktaların konumları ...	18
Şekil 3.5	Gaziantep Üniversitesi kurumunda bulunan radyo frekans sistemde çözdürme prosesinde kullanılan derisiz ve kemiksiz tavuk örnekleri ve deneyler sırasında kullanılan üç adet fiber optiğın konumu	21
Şekil 3.6	Georgia Üniversitesi kurumunda gerçekleştirilen radyo frekans ve buzdolabı koşulunda çözdürme prosesinde kullanılan derisiz ve kemiksiz tavuk örnekleri ve deneyler sırasında kullanılan iki adet fiber optiğın konumu.....	23
Şekil 3.7	Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilen radyo frekans ve buzdolabı koşulundaki çözdürme prosesinde kullanılan derisiz ve kemiksiz tavuk örnekleri ve deneyler sırasında kullanılan iki adet fiber optiğın konumu	24
Şekil 3.8	Radyo frekans sistem 3'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan blok halindeki çizgili ton balıkları örnekleri (a) 1'nolu örnek; (b) 2'nolu örnek; (c) 3'nolu örnek	26
Şekil 3.9	Radyo frekans sistem 3'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan blok halindeki çizgili ton balıkları örneklerinde kullanılan fiber optik sensörler	26
Şekil 3.10	Plakalı ve çapraz elektrot geometrisinde potansiyel elektrotun üst ve alt da olduğu konumda, püskül elektrot geometrisinde tüm ve yarım ürün koşullarında geliştirilen matematiksel model geometrileri ve uzunluk birimleri.....	28
Şekil 3.11	Matematiksel model çalışmalarında kullanılan ürünün sıcaklığa bağılı (a) dielektrik katsayısı; (b) dielektrik kayıp faktörü değeri (Llave vd. 2014, 2015)	30
Şekil 3.12	Matematiksel model çalışmalarında kullanılan ve ürün faz değışimi sıcaklığının (-1°C) altındaki (a) özgül ısı kapasitesi-cp; (b) ısı iletkenlik katsayısı-k; (c) yoğunluk – ρ değeri (Llave vd. 2014, 2015)	31
Şekil 3.13	Üç radyo frekans (RF) sistemde farklı elektrot yüksekliğinde tylose ısıtma deneylerinin matematiksel modellenmesi için oluşturulan üç boyutlu sistem boyutları; (a) RF sistem 1, (b) RF sistem 2 ve (c) RF sistem 3	34

Şekil 3.14	Tek kaviteli kesikli radyo frekans sisteminin yan duvarlara eklenen hava üfleme jetleri kombineli sistem tasarımı	38
Şekil 3.15	Tek kavite uzatılmış sürekli üretime uygun radyo frekans ve hava üfleme slotlarıyla kombine edilmiş sistem tasarımı ve boyutları.....	39
Şekil 3.16	İki kavite sürekli üretime uygun radyo frekans ve hava üfleme slotlarıyla kombine edilmiş sistem tasarımı ve boyutları.....	40
Şekil 4.1	Farklı elektrot tiplerinde gerçekleştirilen çözdürme prosesi sırasında ürünün ortalama sıcaklığı, merkez noktasının sıcaklığı ve ürün tarafından absorbe edilen enerjinin zamana bağlı değişimi	43
Şekil 4.2	Plakalı elektrot dizaynında üst ve alt elektrotun potansiyel elektrot olduğu iki durum için geliştirilen matematiksel modellerde ürünün yüzey sıcaklık, ürün içi polarizasyon (siyah oklar) ve elektrik alan dağılımı	44
Şekil 4.3	Çapraz elektrot dizaynında üst ve alt elektrotun potansiyel elektrot olduğu iki durum için geliştirilen matematiksel modellerde ürünün yüzey sıcaklık, ürün içi polarizasyon (siyah oklar) ve elektrik alan dağılımı	45
Şekil 4.4	Püskül elektrot dizaynında ürün kalınlığının tam ve yarım olduğu iki durum için geliştirilen matematiksel modellerde ürünün yüzey sıcaklık, ürün içi polarizasyon (siyah oklar) ve elektrik alan dağılımı.....	46
Şekil 4.5	RF sistem 1’de gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model sonuçlarının elektrotlar arası mesafenin 6, 10 ve 14 cm olduğu durumda karşılaştırılması	49
Şekil 4.6	RF sistem 1’de elektrotlar arası mesafenin 6, 10 ve 14 cm olduğu durumda gerçekleştirilen deney ve matematiksel modellerde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması.....	51
Şekil 4.7	RF sistem 2’de gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model sonuçlarının elektrotlar arası mesafenin 8, 10 ve 14 cm olduğu durumda karşılaştırılması	53
Şekil 4.8	RF sistem 2’de 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilen deney ve matematiksel modellerde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması	54
Şekil 4.9	RF sistem 3’de gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model sonuçlarının elektrotlar arası mesafenin 6, 10 ve 14 cm olduğu durumda karşılaştırılması	56
Şekil 4.10	RF sistem 3’de 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilen deney ve matematiksel modellerde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması	57
Şekil 4.11	Deneyler sonunda belirlenen ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının üç farklı radyo frekans sistemde karşılaştırılması (Şekil 4.6, 4.8 ve 4.10’daki deneysel veriler kullanılmıştır).....	58
Şekil 4.12	Üç radyo frekans sisteminde eşit potansiyel güç uygulandığı zaman tylose ısıtma prosesinde yüzey sıcaklık dağılımı	59

Şekil 4.13	Üç radyo frekans sisteminde eşit potansiyel güç uygulandığında ürün hacimsel sıcaklık ve merkez noktası sıcaklığının proses süresi ile değişimi	60
Şekil 4.14	RF sistem 1’de gerçekleştirilen dondurulmuş tavuk göğsü örneklerinin elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda uygulanan çözdürme prosesi sırasında ölçüm alınan fiber optik sensörlerin sıcaklık değişimi	62
Şekil 4.15	Radyo frekans sistem 1’de elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda dondurulmuş üç adet tavuk göğsüne uygulanan çözdürme prosesi bitiminde elde edilen ürünün üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı.....	64
Şekil 4.16	Radyo frekans sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri	67
Şekil 4.17	Georgia Üniversitesi kurumunda üç adet dondurulmuş tavuk göğsü örneğinin buzdolabı koşulunda çözdürülmesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri	68
Şekil 4.18	Radyo frekans sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 1 ve 2	70
Şekil 4.19	Radyo frekans sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 3 ve 4	71
Şekil 4.20	Georgia Üniversitesinde üç adet dondurulmuş tavuk göğsü örneğinin buzdolabı koşulunda çözdürülme prosesinin öncesinde üst yüzeyin ve çözdürülme işleminin tamamlanmasından sonra üst ve alt yüzeyin sıcaklık dağılımı	72
Şekil 4.21	Georgia Üniversitesinde radyo frekans sistem 2 ve buzdolabı koşulunda dondurulmuş tavuk örnekleri ile gerçekleştirilen çözdürme proseslerindeki çözme kaybı değerleri ve karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.22	Georgia Üniversitesinde radyo frekans sistem 2 ve buzdolabı koşulunda çözdürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde iki parçada gerçekleştirilen tekstür analizi ve sertlik değerinin karşılaştırılması	76
Şekil 4.23	Georgia Üniversitesinde radyo frekans sistem 2 ve buzdolabı koşulunda çözdürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde üç adet ile gerçekleştirilen pişme kaybı analizi	77
Şekil 4.24	Georgia Üniversitesi kurumunda analizi yapılan taze ve donmuş tavuk göğsü örneklerinin dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimi	78
Şekil 4.25	Radyo frekans sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri	80
Şekil 4.26	Radyo frekans sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 1 ve 2	81

Şekil 4.27	Radyo frekans sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 3 ve 4	82
Şekil 4.28	Ankara Üniversitesi kurumunda radyo frekans sistem 3 ve buzdolabı koşulunda dondurulmuş tavuk örnekleri ile gerçekleştirilen çözdürme proseslerindeki çözme kaybı değerleri ve karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.29	Ankara Üniversitesi kurumunda çözdürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde iki parçada gerçekleştirilen tekstür analizi ve sertlik değerinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.30	Ankara Üniversitesi kurumunda çözdürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde üç adet ile gerçekleştirilen pişme kaybı analizi	87
Şekil 4.31	Ton balığı filetolarında elde edilen sıcaklık değişimleri (a) fileto-1 – fb1-fb2 noktalarında; (b) fileto-2 – fb3-fb4 noktalarında; (c) fileto-2 – fb5-fb6 noktalarında; (d) fileto-3 – fb3-fb4 noktalarında elde edilen sıcaklık değişimleri.....	88
Şekil 4.32	Deneyssel radyo frekans çözdürme çalışmalarında ton balığı fileto yüzeylerinde elde edilen sıcaklık değişimi (a) fileto-1; (b) fileto-2; (c) fileto-3	89
Şekil 4.33	Radyo frekans uygulama çözdürme prosesi sırasında sistem içi sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelen yoğunlaşmanın üst elektrotlarda gözlenmesi.....	90
Şekil 4.34	Ton balığı deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırılması: (a) fileto – 1, fb1 noktası; (b) fileto – 1, fb2 noktası; (c) fileto – 2, fb3 noktası; (d) fileto – 2, fb5 noktası; (e) fileto -2, fb6 noktası; (f) fileto – 3, fb3 noktası	91
Şekil 4.35	Dondurulmuş ton balığı filetolarına uygulanan radyo frekans çözdürme işlemi sonucu elde edilen yüzey sıcaklık dağılımının model sonuçların ile karşılaştırılması: (a) fileto-1; (b) fileto-2; (c) fileto 3	92
Şekil 4.36	(a) x-y düzleminde ürünün farklı kesitlerinden elde edilen sıcaklık dağılımı; (b) x-z düzleminde sistem içerisi elektrik potansiyel (V) değişimi ve ürün içi polarizasyon değişimi (siyah oklar)	93
Şekil 4.37	Radyo frekans kavite içerisinde çözdürme prosesi sırasında hava sıcaklığın da belirlenmesi amacıyla geliştirilen modelin merkezinden alınan kesitte sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)	95
Şekil 4.38	Ankara Üniversitesi radyo frekans sistemde çözdürülme prosesi uygulanan iki numaralı filetodan deneyler sırasında elde edilen fiber optik sensör sonuçlarının doğal konveksiyon uygulanan modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması	96
Şekil 4.39	İki numaralı filetonun Ankara Üniversitesi radyo frekans sisteminde çözdürme prosesi sonunda üst yüzeyinin sıcaklık dağılımı, sabit ısı transfer katsayısı sınır koşulunun tanımlandığı matematiksel model ve doğal konveksiyon yönteminin uygulandığı model	97

Şekil 4.40	Ankara Üniversitesi radyo frekans sistemde çözdürme işlemi uygulaması sırasında ürün etrafındaki havanın sıcaklığın belirlenmesi için yerleştirilen fiber optik sensörlerin konumları ve geliştirilen matematiksel model ile karşılaştırılması	98
Şekil 4.41	İki numaralı fileto için geliştirilen matematiksel modelin kavite içerisinde üç ürün olması durumunda kavite içerisindeki hava sıcaklığının proses sırasında değişimi ve proses sonunda ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı	99
Şekil 4.42	Hava üfleme jetleri ile kombineli radyo frekans tek kaviteli kesikli sistem ve ürün için 192.573 elementli ağ yapısı.....	101
Şekil 4.43	Tek kaviteli kesikli radyo frekans sistemde sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumunda 1000 V güç uygulandığında proses sonundaki ürün yüzey sıcaklık ortalaması ve proses sırasında ürün hacimsel ortalama, üst ve alt yüzey	102
Şekil 4.44	Tek kaviteli kesikli radyo frekans sistemde sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumunda 2750 V güç uygulandığında proses sonundaki ürün yüzey sıcaklık ortalaması ve proses sırasında ürün hacimsel ortalama, üst ve alt yüzey	103
Şekil 4.45	Kesikli radyo frekans sistemde hava jet kombineli ve 1000 V güç kullanılarak uygulanan çözdürme işlemi sırasında y-z düzleminde ürün ve kavite sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar).....	105
Şekil 4.46	Kesikli radyo frekans sistemde hava jet kombineli ve 1000 V güç kullanılarak uygulanan çözdürme işlemi sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı.....	106
Şekil 4.47	Kesikli radyo frekans sistemde hava jet kombineli ve 1000 V güç kullanılarak uygulanan çözdürme işlemi sırasında sıcaklık değişimleri	108
Şekil 4.48	Kesikli tek kavite radyo frekans sistemde kavitenin x-z ekseninden alınan kesitte uygulanan güç değerinin dağılımı (oklar) ve ürün sıcaklık dağılımı.....	109
Şekil 4.49	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem geometrisi ve modellemede kullanılan 244.932 elementli ağ yapısı	110
Şekil 4.50	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç tanımlandığında doğal konveksiyon ve slot jet kombineli sistemde 1 m/s sınır koşulu uygulandığında elde edilen ürün hacimsel ortalama sıcaklık ortalaması ve ürün köşe noktası sıcak	112
Şekil 4.51	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç ve 1 m/s sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlarda hava akış profili ve ürün sıcaklık dağılımı	113
Şekil 4.52	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç ve 1 m/s hava hızı sınır koşulları uygulandığında y-z düzleminde alınan kesitte kavite ve ürünün sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)	114
Şekil 4.53	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlardaki enerji dağılımı	115

Şekil 4.54	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sonunda elde edilen ürün yüzey sıcaklık dağılımı	117
Şekil 4.55	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında ürün hacimsel sıcaklık ortalaması, tüm yüzeylerin sıcaklık ortalaması ve ürün köşe noktasının sıcaklığının zamanla değişimi	118
Şekil 4.56	Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun zamanla sıcaklık değişimi	119
Şekil 4.57	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemin üç boyutlu çizimi ve matematiksel modellerde kullanılan 267.957 elementli ağ yapısı	120
Şekil 4.58	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde konveksiyon ısı transferi katsayısının $10 \text{ W/m}^2\text{-K}$ olduğu durumda alt yüzey, $50 \text{ W/m}^2\text{-K}$ olduğu durumda üst yüzey sıcaklık ortalamasının doğal konveksiyon koşulu ile karşılaştırılması	120
Şekil 4.59	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde ısı transfer katsayısının 10 ve $50 \text{ W/m}^2\text{-K}$ sınır koşulu ve doğal konveksiyon olduğu durumlarda proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı	121
Şekil 4.60	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde 1000 V güç ve 1 m/s sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlarda hava akış profili ve ürün sıcaklık dağılımı	122
Şekil 4.61	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç ve 1 m/s hava hızı sınır koşulları uygulandığında y-z düzleminde alınan kesitte kavite ve ürünün sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)	123
Şekil 4.62	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlardaki enerji dağılımı	124
Şekil 4.63	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sonunda elde edilen ürün yüzey sıcaklık dağılımı	125
Şekil 4.64	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında ürün hacimsel sıcaklık ortalaması, tüm yüzeylerin sıcaklık ortalaması ve ürün köşe noktasının sıcaklığının zamanla değişimi	126
Şekil 4.65	İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun zamanla sıcaklık değişimi	128
Şekil 4.66	Dizaynında değişiklikler yapılarak slot jet bölümünün uzatıldığı ve yeni hava çıkış bölmelerinin eklendiği iki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemin üç boyutlu dizaynı ve teknik çizimi	129

Şekil 4.67 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde 5500 V güç ve 5 m/s hava hızının uygulandığı durum ile sistem dizaynına eklemeler yapılan durumda kavite içindeki havanın ve potansiyel elektrotların sıcaklık ortalaması.....	130
--	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Tylose hamurunun (%77 su içeri) sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri ve termal özellikleri (Bedane vd. 2021).....	20
Çizelge 3.2 Proses tasarım çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen vurgulu hava jeti uygulama modelleri ve sınır koşulları.....	37
Çizelge 4.1 Radyo frekans sistem 1’de sistemde çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri	65
Çizelge 4.2 Radyo frekans sistem 1’de çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen sertlik değerleri.....	65
Çizelge 4.3 Radyo frekans sistem 1’de çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan ortalama 10 gramlık üçer örnek ile hesaplanan pişme kaybı değerleri	65
Çizelge 4.4 Georgia Üniversitesinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmaların uygulandığı koşullar	66
Çizelge 4.5 Georgia Üniversitesinde kontrol ve radyo frekans sistemde çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri.....	73
Çizelge 4.6 Georgia Üniversitesi buzdolabı ortamında çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri ..	74
Çizelge 4.7 Ankara Üniversitesi kurumunda gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmaların uygulandığı koşullar	79
Çizelge 4.8 Ankara Üniversitesi kontrol ve buzdolabı ortamında çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri.....	83
Çizelge 4.9 Ankara Üniversitesi radyo frekans sisteminde çözdürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri.....	84

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisinde gıda işleme prosesi önemli bir yere sahiptir. Taze meyve ve sebze dışında neredeyse işleminden geçmeden tüketici huzuruna çıkan bir ürün bulunmamaktadır. Gıda ürünlerine pişirme, pastörizasyon, sterilizasyon, kurutma, çözdürme gibi ısı işlemleri endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu amaçla geleneksel yöntem olarak adlandırılan ve ısı transferi için bir ortama (su, hava) ihtiyaç duyan yöntemler geçmişten günümüze kadar gelişerek gelmiştir. Bu yöntemlerin yıllar içerisinde bilimin ve teknolojinin gelişmesiyle değişime uğrayarak seri üretim ile yüksek üretim kapasiteli versiyonlarına ulaşmışlardır. Geleneksel proses yöntemlerinin proses süresi, son ürün kalitesi ve enerji sarfıyatı açısından değişime ihtiyacı olduğu gözlenmiştir. Geleneksel yöntemlerde ısı transferi konveksiyon ve kondüksiyon ısı transferi prensibine dayanmakta olup ısı dışarıdan merkeze doğru hareket etmektedir. Ürün merkez noktası istenilen sıcaklığa gelene kadar ürün yüzeyi yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kalmaktadır. Proses sonunda kalitesi düşük son ürün elde edilmiş olur. Geleneksel yöntemlerde daha öncede belirtildiği gibi ısı transferinin aktarımı için bir ortama ihtiyaç duyulmaktadır. Proses sırasında kullanılan bu ortamın sıcaklığını yükseltmek için yüksek enerji kullanımı gerekmektedir. Ancak günümüzde sürdürülebilirlik, atık yönetimi ve enerji tüketimi gibi konular uluslararası arenada tartışılmaktadır. Bu anlamda Avrupa Birliği “Avrupa Yeşil Mutabakatı” adında 2050 yılını hedef gösteren bir strateji politikası hedeflerini gösteren bir anlaşma yayınlamıştır. Endüstriyel anlamda atık yönetiminin yapılması, harcanan enerjinin azaltılması ve en önemlisi sürdürülebilir bir üretim anlayışına geçilmesi mutabakat kapsamında işaret edilmiştir. Hedef gösterilen konular incelendiğinde gıda endüstrisinde geleneksel yöntemler ile yapılan proseslerin yenilikçi sistemler ile değiştirilmesi gerektiği gerçeği ortaya çıkmıştır. Gıda endüstrisinde prosesler termal ve termal olmayan olarak üzere iki gruba ayrılmıştır. Tez kapsamında termal prosesler incelendiğinde, yüksek basınç, dielektrik ısıtma ve dondurarak kurutma ön plana çıkmaktadır. Dielektrik ısıtma yöntemleri; mikrodalga ve radyo frekansı oluşmaktadır. Dielektrik yöntemlerin en büyük avantajı proses sırasında enerjinin transferi için herhangi bir ortama ihtiyaç olmamasıdır. Mikrodalga ve radyo frekans prosesinde kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alanın ürün tarafından absorbe edilmesiyle sıcaklık yükselir. Radyo frekans elektromanyetik spektrumunda 1-300 MHz

aralığı tanımlamaktadır (Risman 1991). Ancak Amerika Federal İletişim Kurumu bilim, endüstri ve sağlık alanında sadece 13,56, 27,12 ve 40,68 MHz frekanslarının radyo frekans uygulamasında kullanılmasına izin vermiştir (Llave ve Erdogdu 2022). Gıda endüstrisinde yaygın olarak 27,12 MHz frekans sistemler üretilmiştir. Radyo frekans sistemler mikrodalgaya göre düşük frekans ve yüksek dalga boyuna sahip olduğundan, 27,12 MHz frekans 11 m'lik bir dalga boyuna sahiptir, geniş hacimli ve birden fazla ürünün proses edilmesine imkân sağlamaktadır. Ürünün dielektrik özellikleri de önemli olduğundan sadece geniş hacimli ürünler tercih edilmemiştir. Örneğin Jiang vd. (2023) RF çözdürme prosesinde 1,5 cm kalınlığında balık örnekleri kullanırken Topcam vd. (2022) RF kurutmada kayısı örneklerini proses etmişlerdir.

Radyo frekans (RF) sistemlerin prensibi iki elektrot arasında potansiyel fark sonucu oluşan elektromanyetik enerjinin ürün tarafından absorbe edilip ısı enerjisine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Ürünün dielektrik özellikleri, dielektrik katsayısı ve kayıp faktörü, elektromanyetik enerjiden nasıl etkileyeceğini gösteren birimsiz parametrelerdir (Sosa-Morales vd. 2010). Dielektrik katsayısı ürünün ne kadar elektromanyetik enerjiyi absorbe edeceğini temsil ederken, kayıp faktörü absorbe edilen enerjinin ne kadarının ısı enerjisine dönüştürüleceğini ifade etmektedir (Jain vd. 2019). Ancak ürünün elektromanyetik ile ilişkisini anlamak için dielektrik kayıp faktörü ve penetrasyon derinliği parametreleri de incelenmelidir. Literatürde dielektrik kayıp faktörünün öneminden bahsedilmiştir (Mohamed vd. 2020). Ancak sadece bu parametreye yönelik direk bir çalışma olmasa da bu değer ne kadar yüksekse ürün tarafından elektromanyetik enerji o kadar verimli kullanılıyor şeklinde tanımlanmıştır. Elektromanyetik enerjinin ürün içinde ne kadar derinliğe ulaşabileceğini ya da enerjinin %63'ünün absorbe edildiği mesafe penetrasyon derinliği ile ifade edilmiştir (Huang vd. 2018). Elimizdeki tüm bu parametrelerin yanında ürünün termal özellikleri de ürün sıcaklık dağılımında etkilidir. Sonuç olarak ürünün elektromanyetik enerji ile etkileşimi birden fazla parametreye bağlı olmakla birlikte kompleks bir etkileşime sahiptir. Örneğin dielektrik özellikleri yüksek bir materyalin radyo frekans proses için uygun olduğunu kanısı literatürde benimsense de penetrasyon derinliği milimetre olacak kadar küçük ise enerji ürün içine absorbe olamayacak ve sıcaklık artışı sadece ürün yüzeyinde meydana gelecektir. Bu yüzden her gıda radyo frekans uygulamasına uygundur kanısı söz konusu

olmamalıdır ya da proses edilmek istenen gıda ürün özellikleri doğrultusunda radyo frekans uygulamasına uygun koşullara getirilmelidir. İki temel prensip ile elektromanyetik enerjinin gıdada sıcaklık artışına nasıl sebep olduğu açıklanmıştır. Dipolar rotasyon, polar moleküller özellikle su molekülleri elektromanyetik alana maruz kaldıklarında oluşan pozitif ve negatif kutupların etkisiyle rotasyon hareketi gerçekleştirmektedir (Bermudez-aguirre ve Niemira 2023). Bilindiği üzere su molekülünde hidrojen ve oksijen atomları arasında $104,5^\circ$ bir açı oluşmaktadır. Oksijenin negatif hidrojenin ise pozitif olduğu bir durum söz konusudur. Elektromanyetik dalgaın salınımla su molekülleri rotasyon hareketi yapmaktadır. Aynı durum serbest iyonlar için de geçerli olup iyonik iletim adıyla adlandırılmıştır. Özellikle dipolar rotasyonda frekans ne kadar yüksekse rotasyon hareketi o kadar sık gerçekleşmektedir. Bu yüzden dipolar rotasyon mikrodalga prosesinde daha baskınken radyo frekansta iyonik iletim daha baskın bir yol üstlenmektedir (Zhang vd. 2004).

RF sistemleri çalışma prensibi anlamında iki gruba ayrılmıştır; serbest salınım ve 50Ω sistemler. Serbest salınımlı bir RF sistem; trafo, düzeltici, osilatör ve elektron tüpü yani RF üreticiden oluşmaktadır. 50Ω sistemlerde ek olarak sabit frekansta stabil bir sinyal oluşturmak için empedans uyumlama kullanılmıştır. Gao vd. (2023) iki prensip arasındaki farkı teknik şekiller ile göstermiş ve en önemli farkın 50Ω RF sistemde kuvars kristal osilatör ile kararlı RF sinyalleri üretebilmesi belirtilmiştir. RF sistemlerin elektriksel aksan tasarımları dikkate alındığında serbest salınımlı bir RF sistemde hem frekans hem de güç proses sırasında dalgalanmalar gösterirken 50Ω sistemler proses sırasında sabit frekans ve sabit güç değeri uygulamak için tasarlanmıştır. Yapım maliyeti açısından serbest salınım sistemler daha uygun olduğundan yaygın bir şekilde tercih edilmiştir.

RF sistemlerde elektrotlar arası potansiyel fark sonucu elektromanyetik alan oluşmaktadır. Elektrotlardan biri potansiyel diğeri ise toprak görevi görmektedir. Toprak elektrot kavite içerisinde bir elektrot olarak dizayn edilebileceği gibi direk kavite duvarı da bu görevi görecektir şekilde tasarımlar mevcuttur. Potansiyel elektrottan toprak elektrota ya da kavite duvarına doğru enerji bir yol izlemektedir. Elektrotlar arasına yerleştirilen gıda ürünü kapasitör görevi görerek elektromanyetik enerjiyi dielektrik özellikleri doğrultusunda absorbe edip ısı enerjisine çevirmektedir. Elektromanyetik enerjiden

etkileşimlerine göre materyaller üç gruba ayrılmaktadır; absorbe edenler (gıda ürünleri), yansıtıcılar (metalik yüzeyler), geçirgenler (teflon). Gıda endüstrisinde seri üretimde kullanılacak RF sistemlerde elektromanyetik alana geçirgen bir bant kullanılmalıdır. Bu tip bantlar her ürün ya da proses için uygun olmadığından bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Radyo frekans sistemlerde üç tip elektrot dizaynı kullanılabilmektedir; plaka, çapraz ve püskül (Rowley 2001). Plaka elektrot tipi gıda endüstrisinde RF sistemlerde yaygın bir kullanıma sahiptir. Çapraz elektrot dizaynı RF sistemler ile literatürde yapılan çalışmalarda son yıllarda artış gözlenmiştir. Çapraz elektrot dizaynı kısaca silindirik paralel iki sıradan oluşmaktadır. Son dizayn şekli olan püskül elektrot tek bir sıra ve silindirik elektrotlardan oluşmaktadır. Tek sıra bir dizayna sahip olduğundan elektromanyetik alan geniş bir alana yayılamadığından hem endüstri hem de literatür bakımından araştırılma anlamında geri planda kalmıştır. Elektrot tiplerinin karşılaştırılması tez kapsamında geliştirilen matematiksel modellerde ürün sıcaklık profili ve elektromanyetik alanın kavite içerisindeki değişimi üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Elektrotlar açısından prosesi etkileyen ve son yıllarda gündeme gelen parametre ise potansiyel elektrotun konumudur. RF prosesinde ürün sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olan elektrotlar arası ve potansiyel elektrot ile ürün arasındaki mesafeden literatürde söz edilmiştir. Literatürdeki hemen hemen her çalışmada üst elektrotun potansiyel elektrot görevi üstlendiği sistemler ile araştırmalar yapılmıştır. Bedane vd. (2018) yapmış olduğu çalışmada çapraz elektrotlu dizayna sahip ve alt elektrotun potansiyel olduğu bir RF sistemin kullanıldığı literatürde bir ilk olarak yerini almıştır. Potansiyel elektrotun alt elektrot olarak konumlandığı durumda ürün ile potansiyel elektrot arasındaki mesafe sadece ürünün yerleştirildiği kabın kalınlığı kadardır. Bu durumun ürün sıcaklık dağılımına ve elektromanyetik alanın değişimine etkisi incelemek adına tez kapsamında üç farklı RF sistemde deneysel ve matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. RF sistemler arasında elektrot dizaynı ve potansiyel elektrotun konumu gibi parametreler değişkenlik gösterdiği için bu parametrelerin proses sırasında ürüne etkisi incelenerek karşılaştırılmıştır.

Radyo frekans literatürde sahip olduğu geniş dalga boyundan dolayı hacimsel bir ısıtma yöntemi olarak adlandırılmıştır. Ancak RF prosesine yönelik çalışmalar incelendiğinde

genel üründe tekdüze bir sıcaklık dağılımı oluşmaması ciddi bir sorun olarak görülmüştür. Bu durum Ankara Üniversitesinde bulunan çapraz elektrot dizaynına ve alt elektrotun potansiyel olduğu RF sistemde yaklaşık 6 kg ağırlığındaki dondurulmuş blok ton balığı örneklerine çözündürme işlemi uygulanarak incelenmiştir. Hem deneysel hem de matematiksel model çalışmaları yürütülmüştür. Literatürde yapılmış olan matematiksel model çalışmalarında çözümün daha hızlı olması adına ürün yüzeyinde sabit konvektif ısı transfer katsayısı ve ortam sıcaklığı sınır koşulu tercih edilmiştir. Ancak tezin bu bölümünde gerçekleştirilen modellerde ürün hacminin büyük olması ve çözündürme prosesinin uygulanmasından dolayı yani ürün ile kavite içerisindeki hava arasında ciddi bir sıcaklık farkı bulunduğundan modellerde doğal konveksiyon sınır koşulu uygulanmıştır. Sıcaklık farkından dolayı ürün etrafındaki havanın hareket edeceği ve konveksiyon ısı transfer katsayısının ürünün her yüzeyinde değişiklik göstereceği düşünülerek doğal konveksiyonun tanımlandığı modeller yapılmıştır. Doğal konveksiyonun matematiksel modelle eklenmesi ile kavite içerisindeki havanın ve elektrotların sıcaklığı da proses sırasında izlenebilmiştir. Blok ton balığı ile gerçekleştirilen deneyler sırasında üst elektrotun üzerine yoğunlaşmalar gözlenmiştir. Ürünün soğuk olmasından kaynaklı olarak kavite içerisindeki havanın ve elektrotun sıcaklığı düştüğünden bu yoğunlaşma problemi oluşmuştur. Elektrotta yaşanan yoğunlaşma sonucu elektromanyetik alanın su damlalarıyla etkileşime girip kıvılcım çıkma olasılığını oluşturmuştur. Deneylerin gerçekleştirildiği Ankara Üniversitesi RF sistemde üst elektrotta topraklama uygulandığı için ciddi bir kıvılcım problemi yaşanmamıştır. Ancak daha öncede bahsedildiği gibi gıda endüstrisinde üst elektrot potansiyel olarak tercih edilmiştir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda kavite içerisindeki havanın ve elektrot sıcaklığının özellikle çözündürme prosesi sırasında takip edilmesi gerektiği düşünülmüştür.

Elektrotlar arasına konumlandırılan gıda ürünü kapasitör görevi görmekte ve elektromanyetik enerjiyi absorbe etmektedir. Elektromanyetik alan özellikle ürün köşe ve kenarlarında yoğunlaşmakta olup sıcaklığın hızlı artmasına sebep vermektedir. Ürün köşe ve kenarlarındaki hızlı sıcaklık artışı yüzünden üründe tekdüze bir sıcaklık dağılımı RF prosesler sırasında elde edilememiştir. Bu sorun RF sistemlerin gıda endüstrisinde yaygınlaşmasını engellemiştir. Tez kapsamında yapılan deneyler ve matematiksel model

alışmalarından elde edilen bilgiler ve tecrübe doğruşusunda RF tünel tasarımınnn hava üfleme jetleri ile birleştirilerek tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilmesi hedeflenmiştir. Hava fleme jetlerinden uygulanan soğuk hava ile ürün yüzeyindeki yüksek sıcaklık sorunu kontrol altına alınması hedeflenerek RF ile zdrme prosesi uygulanmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Geleneksel yöntemler ile yapılan çözdürme işleminde ısı transferi konveksiyon ve kondüksiyon prensibi ile gerçekleştirilmektedir. Ortamdan gıda ürününe sonrada yüzeyden merkeze doğru gerçekleşen ısı transferinde proses süresi uzun sürmekte ve yüzey ile merkez arasındaki sıcaklık farkından dolayı kalitede düşüşler olmaktadır. Bilimin, teknolojinin ve gıda endüstrisinin gelişmesi ile yenilikçi gıda proses yöntemleri ortaya çıkmıştır. Dielektrik yöntemlerden biri olan radyo frekans uygulaması farklı proseslere uygulanabilirliği için araştırılmıştır. Radyo frekansta elektrotlar arasında oluşan elektromanyetik alanın oluşması ve ürün tarafından absorbe edilmesi geleneksel yöntemlere göre takip edilmesi zor olmaktadır. Matematiksel modellemenin yaygınlaşması ile radyo frekans prosesi gibi anlaşılması zor ve proses sırasında neler olup bittiğini göz ile takip edilmesi zor prosesler bilgisayar ortamına taşınmıştır. Erdogdu vd. (2017) sanallaştırma ve matematiksel modellemenin araştırma ve geliştirme açısından önemini sadece gıda endüstrisi açısından değil birçok sektör için önemini vurgulamıştır. Deneysel veriler ile doğrulanmış matematiksel modeller ile elektromanyetik alan dağılımı ve ürün ile etkileşimi daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilmiştir. Matematiksel modellemenin diğer bir amacı ise radyo frekans gibi uygulamalarda prosesi etkileyen birden fazla parametrenin ürün sıcaklık dağılımına etkisini deneyler ile vakit ve ürün kaybı yaşanmadan incelenmesine imkân sağlamıştır. Deneysel veriler ile doğrulanmış bir model üzerinden parametreler değiştirilerek proses üzerine etkisi tahmin edebilmektedir. Ancak matematiksel modelleme ne kadar gerçek koşullara yakın yapılırsa modellerin tamamlanma süresi o kadar uzamaktadır. Matematiksel model yazılımlarına bağlı olarak kompleks bir model bir ay ile bir yıl uzunluğunda sürmektedir. Bu sürelerin kısalabilmesi için matematiksel model geliştirilirken literatürde bazı yaklaşımlar ve varsayımlar yapılmıştır. Araştırmalarda serbest salınım prensibi ile çalışan RF sistemlerin matematiksel model geliştirilmesinde yapılan ön çalışmalar ile uygulanan güç değeri belirlenmiştir (Alfaifi vd. 2014; Zhang vd. 2019). Chen vd. (2016) mikrodalga prosesi için geliştirdikleri modelde dönme hareketinin uygulanmasında sürekli bir dönme etkisi yerine aşamalı dönme tanımlayarak model çalışma süresini kısaltmışlardır.

Radyo frekans uygulamasında birçok parametre prosesi etkilemektedir. Radyo frekans uygulamasında temel problem elektromanyetik enerjinin ürün köşe ve kenarlarda yoğunlaşmasıdır. Üründe tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edebilmek için araştırmacılar farklı parametreler üzerinde araştırma yapmışlardır. Elektrotlar arası mesafenin ürün sıcaklık dağılımına etkisi en çok araştırılan konulardan bir tanesidir. Elektrotlar arası mesafe serbest salınlı RF sistemlerde uygulanan güç değerini de etkilemektedir. Wang vd. (2015) soya fasulyesiyle serbest salınlı 6 kW güce sahip 27,12 MHz frekansta çalışan RF sistemde beş farklı elektrot yüksekliğinde ısıtma deneyleri yapılmıştır. 3 kg polipropilen kapta 11 ile 13 cm aralığında 0,5 cm aralıklarla ısıtma prosesi gerçekleştirilmiştir. Elektrotlar arası mesafe arttıkça uygulanan güç değerinde azalma gözlenmiştir. Uygulanan voltaj değeri 11 cm mesafede 6400 V iken elektrotlar arası mesafe 13 cm’de yaklaşık 5800 V olduğu tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada 12 kW güce sahip 27,12 MHz frekansta serbest salınlı RF sistemde vakum ambalajlanmış tatlı su çipurası filetolarıyla üç farklı elektrot aralığında çözündürme prosesi yapılmıştır (Jiang vd. 2021). Elektrotlar arası mesafenin 10, 12 ve 14 cm olduğu durumda yapılan temperleme prosesinde elektrotlar arası mesafe arttıkça proses süresinin uzadığı sonucu deneysel olarak gösterilmiştir. Bahsedilen bu çalışmalar ve literatürdeki birçok çalışma incelendiğinde plakalı elektrot dizaynında üst elektrotun potansiyel olduğu durumda elektrotlar arası mesafe azaldıkça uygulanan güç değeri ve buna bağlı olarak ısıtma hızı artmaktadır. Elektrotlar arası mesafe azaldıkça ısıtma hızı artsa da ürün sıcaklık dağılımı tekdüzelikten uzaklaşmaktadır. Ozturk vd. (2017) mısır unuyla elektrotlar arası mesafenin 11, 13 ve 15 cm olduğu koşullarda yapmış oldukları ısıtma deneyinde fiber optikle ürün iç sıcaklığı ve proses sonunda ürünün merkez ve üst yüzey sıcaklığı belirlenmiştir. Elektrotlar arası mesafe en düşük olduğu durumda ürün 80 °C’ye yaklaşık 5 dakikada ulaşırken elektrotlar arası mesafe 15 cm olduğu durumda bu süre 15 dakikalara çıkmıştır. Yüzey sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise elektrotlar arası mesafe arttıkça sıcaklık dağılımındaki tekdüzelikte pozitif bir artış olduğu gözlenmiştir. Elektrotlar arası mesafenin yanında elektrotun şekli konusunda da Tiwari vd. (2011) elektrotun uç bölgesinde açı ve uzunluk değiştirerek bir çalışma yapmışlardır. Elektrotun merkezinden belirli uzaklıklarda bükme ve bükme açısı değiştirilerek ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Üst elektrot altı farklı uzaklıktan 15°’lik açılarla büküldüğünde en iyi sonuç 20 cm’den büküm gerçekleştirildiğinde elde edilmiştir. Elektrotun merkezinden 20 cm

uzaklığından bükülmesi durumunda farklı açıların buğday unu ürünün ısıtılmasına etkisi incelendiğinde en iyi sonucun 20°'lik açıda elde edildiği vurgulanmıştır. Temel olarak elektrot yukarı doğru büküldüğünde ürün ile elektrot arasındaki mesafe artmıştır. Elektromanyetik enerjinin ürün köşelerine olan yoğunluğu elektrottaki bükme hareketi ile azaltılarak tekdüze bir sıcaklık dağılımı konusunda pozitif bir ilerleme kaydedilmiştir. RF uygulaması ile gerçekleştirilen proseslerde özellikle ürün köşe ve kenar sıcaklığındaki hızlı artışlar sebebiyle araştırmacılar ürünün yerleştirileceği kabın şekli ve materyali üzerine odaklanmışlardır. RF prosesinde ürünün elektromanyetik alan ile etkileşimi dielektrik özellikler ile tanımlanmıştır. Ürün etrafındaki kabın dielektrik özelliklerinin değiştirilerek ya da farklı dielektrik özelliklere sahip kaplar kullanılarak ürün sıcaklık dağılımında iyileşmeye yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Huang vd. (2016) elektromanyetik alana geçirgenliği ile bilinen strafor malzemesini soya fasulyesi kabı olarak kullanarak RF ısıtma prosesi uygulamışlardır. Deneysel çalışmalarda dikdörtgen şekilli strafor kalınlığı 2 ile 12 cm aralığında değiştirilirken kabın köşe kenarlarının yarıçap eğriliği 0 ile 10 cm aralıklarında değiştirilmiştir. Elektrotlar arası mesafenin 12 cm olduğu durumda gerçekleştirilen deneylerde en iyi tekdüze sıcaklık dağılımı kabın 8 cm kalınlıkta ve kenarlarının yarıçapı 8 cm eğrilikte olduğunda elde edilmiştir. Başka bir çalışmada polipropilen kaba iç ve dış bükey açı verilerek ürün şekli değiştirilmiştir (Wang vd. 2021). Kabın ilk duruşuna 0 mm olarak tanımlanmış ve iç-dış bükey uzunluğu -20 ile +20 mm olarak 10 mm aralıklarla deneylerde değiştirilmiştir. Bu durumda açı değişikçe ürün kenar kalınlığı artmaktadır. Ürün kalınlığı arttıkça daha fazla elektromanyetik enerji absorbe edildiği çalışmada bahsedilmiştir. Kenar kalınlığı arttığı durumlarda ısıtma hızı arttığından sıcaklık dağılımında arzu edilen olumlu bir gelişme elde edilememiştir.

Radyo frekans uygulamasında ürün boyutu ve elektrotlar arası mesafe üründe tekdüze bir sıcaklık elde edilmesi için dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Uyar vd. (2014) iki farklı durum için ürün boyutunun önemini gösteren bir çalışma yapmışlardır. İlk durumda elektrotlar arası mesafe sabitken ürün hacminin değişimi, ikinci durumda ise ürün ile elektrotlar arasındaki mesafe sabit tutulurken ürün hacminin değişiminin ürün sıcaklığına etkisi karşılaştırılmıştır. Elektrotlar arası mesafe sabitken ürün hacmi azaltıldıkça ürün elektromanyetik enerjiyi absorbe edememiş ve sıcaklık artışı giderek azalmıştır. Bu sonuca göre ürün dielektrik özellikleri ve penetrasyon derinliği değeri göz önünde

bulundurularak ürünün belli bir kalınlıkta olması gerektiği sonucu çıkarılabilmektedir. Ürün ile elektrotlar arası mesafe sabit tutulduğunda ürün boyutu küçüldüğü zaman elektrotlar birbirine yaklaşmaktadır. Elektrik alan yoğunluğunun ürün içinde elektrotlar arası mesafe azaldığında arttığı model üzerinden tespit edilmiştir. Ürün içindeki sıcaklık artışı iyonik iletim ve dipolar rotasyon ile gerçekleştiğinden yukarıda bahsedilmiştir. Elektrotlar arası mesafe azaldığında ürün içindeki potansiyel fark artmakta ve bu iki mekanizma daha güçlü bir şekilde gerçekleştiğinde ürün sıcaklığı daha hızlı artmaktadır. Ürünün kavite içerisindeki konumu ile alakalı da elektrotlar arası mesafe sabit tutulurken ürünün konumunun sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir (Huang vd. 2016). Soya fasulyesi ununun strafor kabına yerleştirilerek gerçekleştirilen çalışmada elektrotlar arası mesafe sabitken ürün alt elektrotun hemen üstüne ve iki elektrottan eşit uzaklığa yerleştirilerek karşılaştırma yapılmıştır. Ürün elektrotlar arasının merkezine yerleştirildiğinde elektromanyetik enerjinin ürün etrafını daha iyi sardığı ve sıcaklık dağılımı anlamında pozitif etki ettiği belirlenmiştir. Ancak gıda endüstrisinde bant üzerinde aynı anda çok fazla ürün proses edileceğinden ürünlerin battan düşmesi ve bantın gerginliğini koruyamaması açıdan bu parametre uygulanabilir bulunmamıştır.

Ürün dielektrik özellikleri RF uygulamasında elektromanyetik enerji ile etkileşimini ifade etmektedir. Dielektrik özellikler ürünün nem içeriğinden, sıcaklığından ve uygulanan frekans ile değişmektedir. Ton balığının üç farklı kas bölgesinin dielektrik özellikleri -20 ile +10 °C arasında ölçülerek Llave vd. (2014) tarafından paylaşılmıştır. Dielektrik özellikler çözünme sıcaklığının altında düşük değerlere sahip olduğu ve çok değişmediği görülmüştür. Ancak çözünme sıcaklığının üzerinde özellikle su moleküllerinin buz fazından su fazına geçmesiyle dielektrik özellikler radikal bir şekilde artmıştır. Aynı çalışmada sıcaklık arttıkça penetrasyon derinliğinin de azaldığı grafikler üzerinden gösterilmiştir. Dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla birlikte bu değişimi farklı yağ oranlarına sahip et ürünlerinde de ölçülmüştür (Farag vd. 2008). Özellikle yağsız ette 27,12 MHz frekansta çözünme sıcaklığının üstünde dielektrik özelliklerde hızlı bir artış olmuştur. Dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimi göz önünde bulundurulduğunda RF çözündürme uygulamasında üründe çözünme sıcaklığını geçen bölgelerde sıcaklığın hızlı bir şekilde artacağı Erdogdu vd. (2017) yapmış olduğu matematiksel model sonuçlarında gösterilmiştir. RF prosesinde iki elektrot arasına yerleştirilen gıda ürünü kapasitör görevi

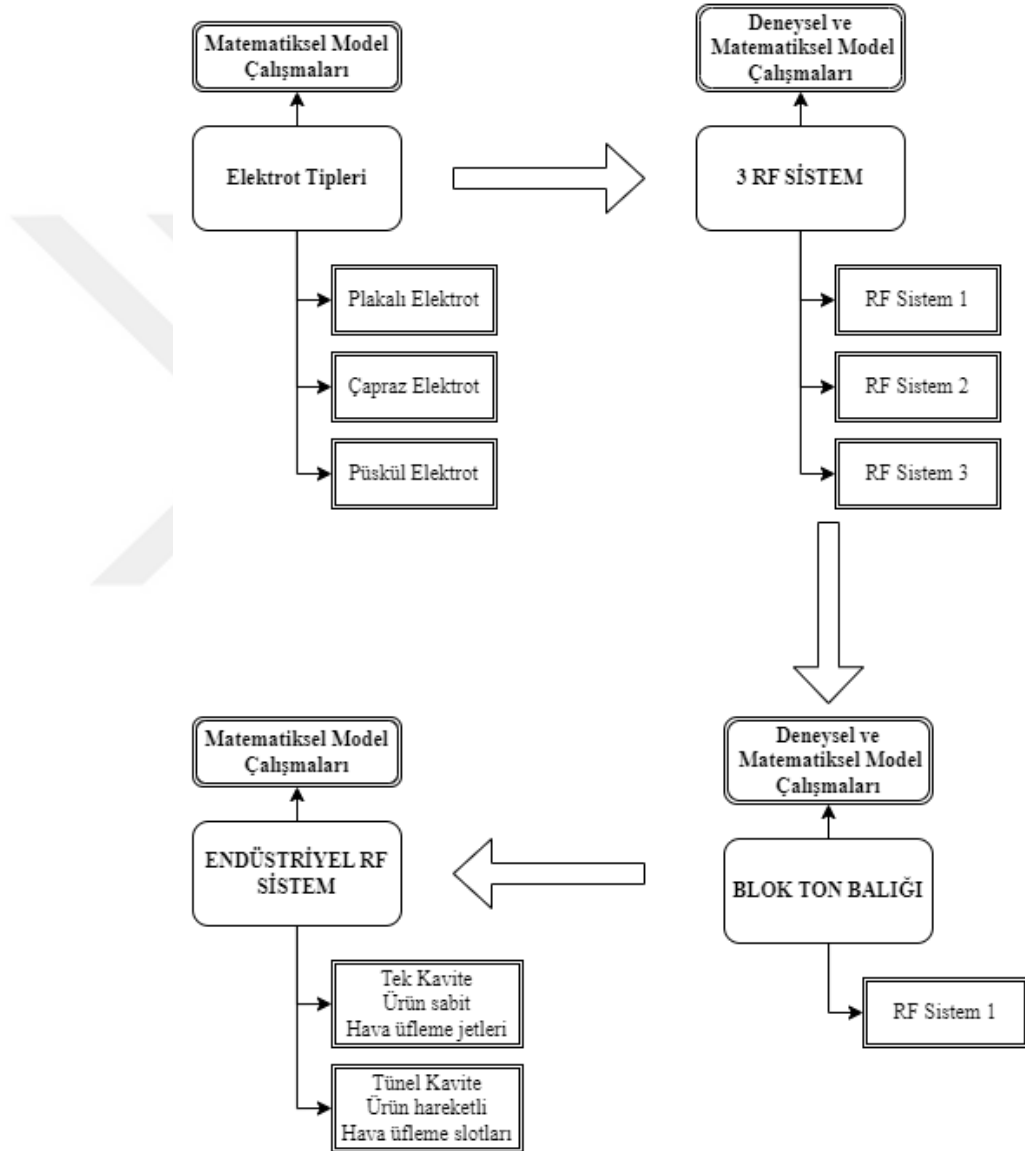
görerek elektromanyetik enerjiyi absorbe etmektedir. Elektromanyetik alanın köşe ve kenarlarda kırılıma uğraması nedeniyle elektromanyetik alan bu bölgelerde yoğunlaşarak sıcaklığın hızlı artmasına sebep olmuştur (Jiao vd. 2015; Huang vd. 2016; Zhang vd. 2019). RF uygulamasının yukarıda bahsedilen ürün sıcaklık dağılımı konusunda olumsuz etkilerinden dolayı farklı prosesler ile kombine edilerek kullanılmıştır. RF uygulaması yaygın olarak kurutma prosesinde sıcak hava üfleme ile birleştirilerek literatürde çalışmalar yapılmıştır. Elektromanyetik enerji ile kurutma prosesi kısaltılırken uygulanan sıcak hava ile tekdüze bir sıcaklık dağılımı ile eşit kurutma sağlanması hedeflenmiştir. Wang vd. (2021) kabuklu fındık ürününe sadece sıcak hava, sıcak hava üfleme kombineli radyo frekans uygulaması ve iki aşamalı sıcak hava ve sıcak hava üfleme kombineli RF uygulaması olmak üzere üç farklı kurutma prosesi uygulamışlardır. Radyo frekansın kurutma prosesinde kullanılması ile birlikte proses süresi yaklaşık dört kat kısalmıştır. Radyo frekans uygulamasının ürün kalite parametreleri açısından da sadece sıcak hava kurutmaya göre pozitif etkisi saptanmıştır. Örneğin protein oksidasyonu ve enzim aktivasyonu azalmıştır. Kabuklu cevizde gerçekleştirilen kurutma deneyinde farklı elektrot uzaklıkları (17, 18 ve 19 cm) ve farklı hava sıcaklıklarının (40, 50 ve 60 °C) etkisi incelenmiştir (Zhang vd. 2016). Yapılan çalışmada 1,6 kg kabuklu ceviz ürünü için optimum kurutma koşulu olarak elektrotlar arası uzaklığın 18 cm ve hava sıcaklığının 50 °C olduğu tespit edilmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilen proseste 40 dakikada ürünler 80 °C'ye ulaşırken 80 °C'de uygulanan sıcak hava kurutma prosesinde ürünler 60 dakikada 60 °C'ye ulaşmışlardır. Sıcak hava üfleme kombineli RF prosesi ile kurutma süresi ciddi bir şekilde kısaltılmıştır. Peng vd. (2019) sıcak hava üfleme kombineli RF prosesini bir adım öteye götürerek elma dilimlerini kurutmak için iki aşamalı bir kurutma prosesi uygulamıştır. İlk önce 2,3 m/s hava hızı ile hava üfleme jetleri ile ilk aşama kurutma, ikinci aşamada ise sıcak hava kombineli RF uygulaması tercih etmiştir. İki aşamalı kurutmada toplam prosesi 200 dakika iken sıcak hava üfleme RF uygulamasında 510 dakika bulunmuştur. Radyo frekans kombine sistemlerin etkinliğinin literatürde yapılan çalışmalarda proses süresine ve ürün kalitesine pozitif etkisi gösterildikten sonra çözdürme prosesi anlamında da bu yaklaşım kullanılmıştır. Wang vd. (2022) RF kavite içerisine -5 °C soğuk hava üfleyerek kavite içerisindeki sıcaklığı düşürmüşlerdir. Dondurulmuş ete soğuk hava destekli RF, sadece RF, hava kullanılarak ve su ile temperleme prosesleri uygulanmıştır. Soğuk hava destekli RF ile sadece RF uygulaması

arasında proses süresi bakımından istatistiksel olarak bir fark bulunmazken ürün yüzey sıcaklık dağılımı anlamında soğuk havanın pozitif bir etkisi olmuştur. Soğuk hava destekli RF uygulamasında ürünlerin renk ve çözme kaybı değerlerinde diğer üç prosese kıyasla daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. RF uygulamasının etkinliği farklı çalışmalar ile kanıtlanmıştır. Ancak tek başına kullanıldığında dezavantajları bulunduğu için, tekdüze bir sıcaklık dağılımı, diğer uygulamalar ile kombine edilmiştir. Böylece RF uygulamasının avantajlarından faydalanılmış ve eksik yönleri elimine edilmiştir.

Tez kapsamında literatürde incelendikten sonra dört başlık altında deneysel ve matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. İlk önce RF sistemleri ve elektromanyetik alan ile ürün arasındaki etkileşimi anlamak adına üç farklı elektrot dizaynında matematiksel modeller yapılmıştır. Daha sonra üç farklı RF sistemde tylose hamuru ile ısıtma ve tavuk göğsü ile çözme deneyleri yapılmıştır. Tylose ısıtma deneyleri hem deneysel hem de matematiksel model olarak üç farklı elektrot uzaklığında gerçekleştirilmiştir. Böylece elektrotların dizaynı, potansiyel elektrotun konumunun ve elektrotlar arası mesafenin ürün sıcaklık dağılımına etkisi karşılaştırılmıştır. Tylose ısıtma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine çözme prosesi uygulanacak koşullar belirlenmiştir. RF sistemlerin geniş dalga boyu ve derin bir penetrasyon derinliği sağladığı yukarıda bahsedilmişti. Bu amaçla Ankara Üniversitesi RF sistemde yaklaşık 6 kg ağırlığındaki ton balığı bloklarına çözme prosesi uygulanmıştır. Bu proses için geliştirilen matematiksel modellerde farklı sınır koşullarının sonuca etkisi ve gerçekliğe yakınlığı karşılaştırılmıştır. Çözme prosesinde kavite içerisindeki havanın ve elektrotların sıcaklığının önemli olduğu ve yoğunlaşma probleminin proseste sorun çıkarabileceği tespit edilmiştir. Bu üç bölüm tamamlandıktan sonra RF uygulamasının soğuk hava üfleme jetleri ile kombine edilmesine ve yeni bir tasarım yapılarak ürün sıcaklık dağılımına etkisi son bölümde matematiksel model çalışmaları ile incelenmiştir. RF uygulaması ile soğuk hava birleştirilerek ürünün yüzey sıcaklığının kontrol altına alınarak çözme prosesinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında elde edilen deneysel ve matematiksel model çalışmalarının sonuçları ile RF uygulamasının daha iyi anlaşılabilmesine ve çözme prosesi için literatüre yeni bir bakış açısı getireceği düşünülmektedir.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Tez çalışmaları kapsamında deneysel çalışmalar ve matematiksel modelleme çalışmaları eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Gerçekleştirilen bu çalışmalar dört ana başlığa ayrılmış olup şekil 3.1’de gösterilmiştir.

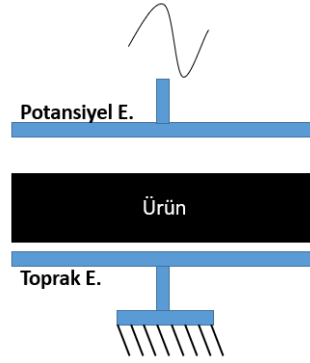


Şekil 3.1 Tez kapsamında yapılan deneysel ve matematiksel model çalışmaları dört gruba ayrılmıştır

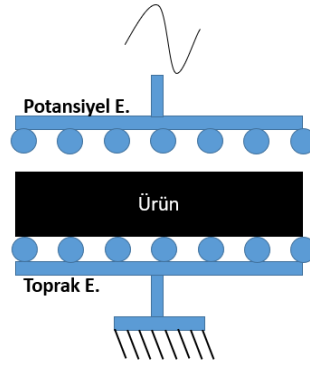
İlk başlıkta farklı elektrot geometrisine sahip RF sistemler içerisinde, proses sırasında meydana gelen, elektromanyetik alan ve ürün içi sıcaklık değişimi kapsamında matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Rowley (2001) kitap bölümünde üç farklı elektrot dizaynından bahsetmiştir. Bu bilgi doğrultusunda tezin ilk bölümünde plakalı, çapraz ve püskül elektrot geometrilerine sahip sistemlerde dondurulmuş bir ürünün çözündürülmesi sırasında ürün sıcaklık dağılımındaki değişimine etkisi karşılaştırılmıştır. RF sistemlerde paralel plakalı elektrot düzenekleri gıda endüstrisi tarafından yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Plaka elektrot seçeneği hem endüstride hem de literatürde yoğun bir şekilde tercih edilmesine karşın diğer iki elektrot tipinin ürün sıcaklık dağılımına ve kavite içerisinde oluşan elektromanyetik enerji dağılımına etkisini incelenerek matematiksel model ortamında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.2). Hem elektrot dizaynının hem de potansiyel uygulanan elektrotun konumunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Elektrot dizaynının birbirleri arasındaki farkları ve ürün ile etkileşimleri karşılaştırılmıştır.

İki numaralı başlıkta, Gaziantep Üniversitesinde bulunan RF sistem 1, Georgia Üniversitesinde (Athens, GA, USA) bulunan RF sistem 2 ve Ankara Üniversitesinde bulunan RF sistem 3’de deneysel ve matematiksel model çalışmaları yürütülmüştür. RF sistem 1 ve 3’de çapraz elektrot dizaynı bulunurken RF sistem 2’de plaka elektrot dizaynına sahiptir. RF sistem 3’de elektrik potansiyel alt elektrot ve topraklama ise üst elektrot grubunda uygulanırken, RF sistem 1’de bu düzenin tam tersi olarak potansiyel üst elektrot grubuna uygulanmıştır. RF sistem 2’de ise elektrik potansiyeli üst ve topraklama alt plaka elektrota uygulanmıştır. Potansiyel uygulanan elektrotun konumu, elektrot ile ürün arasındaki mesafe anlamında bir değişiklik gösterdiğinden bu durumun ürün sıcaklık dağılımına etkisi farklı elektrotlar arası mesafede yapılan deneyler ile karşılaştırılmıştır. Bu sistemlerde ilk olarak tylose hamuru ile üç farklı elektrot yüksekliğinde ısıtma prosesleri ve matematiksel modelleme çalışmaları tamamlanmıştır. Tylose ısıtma proseslerinin sonucuna göre dondurulmuş tavuk örneklerine uygulanacak çözündürme prosesinde kullanılacak elektrot yüksekliğine karar verilmiştir. Çözündürme işlemi sonunda çözme kaybı, renk, tekstür ve pişirme kaybı kalite parametreleri +4 °C’de çözündürülen tavuk göğsü örnekleri ile karşılaştırılmıştır.

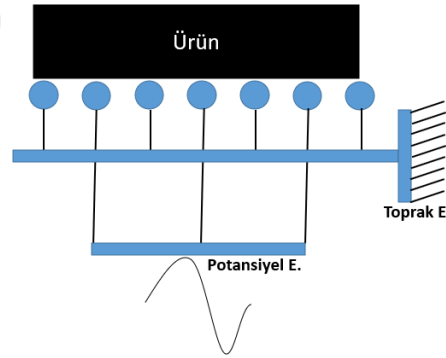
(a) Plaka Elektrot



(b) Çapraz Elektrot



(c) Püskül Elektrot



Şekil 3.2 Radyo frekans sistemlerde kullanılan elektrot tipleri; (a) plaka elektrot, (b) çapraz elektrot, (c) püskül elektrot

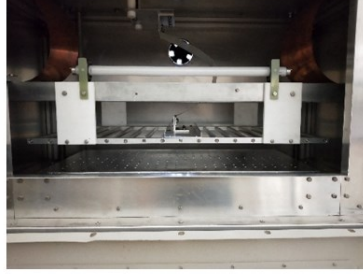
RF uygulamada 27,12 MHz frekansta elektromanyetik dalga boyu vakum ortamında yaklaşık 11 metredir (Altemimi vd. 2019). Dalga boyunun uzun olmasına bağlı olarak, yüksek bir penetrasyon derinliği de beklendiğinden, büyük hacimli ürünler RF proses uygulamasına endüstriyel ölçekte uygun olarak kabul edilmektedir. Bu amaçla, üç numaralı başlıkta ürün olarak yaklaşık 6 kg ağırlığındaki dondurulmuş ton balığı türü örnekleri kullanılmış ve bu kapsamda RF çözündürme işlemi sırasında ürün sıcaklık

değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiştir. Model çalışmaları iki farklı koşulda; sabit konveksiyon ısı transfer katsayısı ve doğal konveksiyon koşullarında yürütülerek geliştirilen matematiksel model sonuçları deneysel veriler ile doğrulanmış ve sınır koşullarının sonuçlara etkisi incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler geliştirilen matematiksel modelin doğrulanması amacıyla kullanılırken; RF sistem içerisinde ürün sıcaklık değişimleri yanında hava sıcaklık değişimleri ve doğal konveksiyona bağlı olarak meydana gelen hava hız profil değişimi de belirlenmiştir. Son başlıkta ise, üç numaralı bölümde geliştirilen matematiksel model yaklaşımı kullanılarak hava üfleme kombineli endüstriyel RF sistem tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümü halen endüstriyel çözdürme koşullarında meydana gelen ürün sıcaklık tekdüzeliğinin sağlanması ve ürün yüzey – kenar – köşe noktalarında oluşan sıcaklık artışlarının engellenmesi ve endüstriyel uygulama amacıyla sistem tasarlanması kapsamında tamamlanmıştır.

RF uygulama, geleneksel yöntemlere göre yüksek enerji verimliliği ile proses süresini kısaltmaktadır. Ancak, RF sistemlerin bu avantajlarına rağmen üründe tekdüze bir sıcaklık dağılımının elde edilemiyor olması gıda endüstrisi için sorun teşkil etmekte ve kullanım yaygınlığını olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden tezin dördüncü bölümünde, yukarıda da açıklandığı üzere, gıda endüstrisinde kullanılabilecek (tek ve iki kavite kesikli ve sürekli olmak üzere) RF sistemler hava üfleme sistemleri ile kombine olacak şekilde tasarlanmıştır. Tek kavite kesikli RF sistemde proses süresince ürünün sabit konumda durduğu ve kavitenin yan duvarlarına hava üfleme jetlerinin yerleştirildiği bir düzenek planlanmıştır. Sürekli tünel RF sistemlerde ise ürünün sabit bir hızda bant üzerinde hareket ettiği ve kavitenin üst duvarına yerleştirilen hava üfleme slotları (dörtgen kesitli yivler) ile dizayn edilmiştir. Bu aşamadaki matematiksel modellerde farklı güçlerde plakalı elektrot ve farklı hava üfleme hızlarının dondurulmuş ürünün çözdürülmesine etkisi incelenmiş ve bu bağlamda sistem tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Dört ayrı bölümde gerçekleştirilen tez çalışmaları kapsamında aşağıda, bu bölümler bazında, sırasıyla önce deneysel çalışmalar sonra da matematiksel modelleme çalışmaları açıklanmıştır.

(a)



RF Sistem 1
Gaziantep Üniversitesi
27,12 MHz frekans
10 kW güç, 5 kademeli
Çapraz elektrot
Üst elektrot potansiyel

(b)



RF Sistem 2
University of Georgia
27,12 MHz frekans
6 kW güç
Plaka elektrot
Üst elektrot potansiyel

(c)



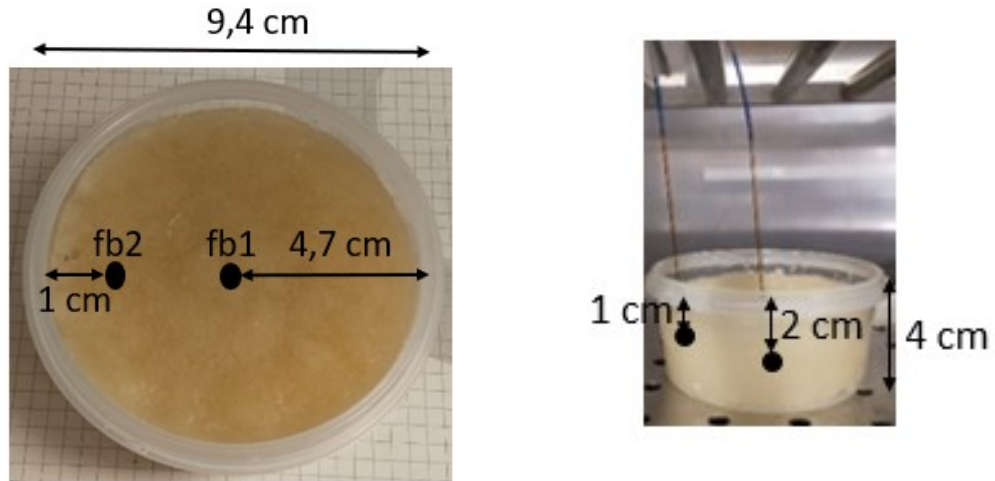
RF Sistem 3
Ankara Üniversitesi
27,12 MHz frekans
10 kW güç, 5 kademeli
Çapraz elektrot
Alt elektrot potansiyel

Şekil 3.3 Deneyisel çalışmalarda kullanılan radyo frekans (RF) sistemler ve özellikleri
(a) Gaziantep Üniversitesi, (b) Georgia Üniversitesi ve (c) Ankara Üniversitesi'nde bulunan RF sistem

3.1 Deneysel Çalışmalar

3.1.1 Üç radyo frekans sistemde (bölüm – 2) gerçekleştirilen deneysel çalışmalar

Bu kapsamda RF uygulama ile ısıtma ve çözündürme prosesleri iki farklı elektrot geometrisine sahip olan üç RF sistemde gerçekleştirilmiştir. Üç RF sistem de 27,12 MHz frekansında çalışmakta olup; Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'nde bulunan RF sistem 3 (Sonar, İzmir, Türkiye) 10 kW güce sahip alt elektrot grubuna elektrik potansiyel uygulanan çapraz elektrot düzeneğine sahip olan bir sistemdir (Şekil 3.3.c). Bir başka çapraz elektrot düzeneğine sahip olan ancak elektrik potansiyel uygulamasının üst elektrot grubuna uygulandığı ve yine 10 kW güce sahip olan bir diğer RF sistem 1 (Sonar, İzmir, Türkiye) ise Gaziantep Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'nde kullanılmıştır (Şekil 3.3.a). Üçüncü sırada kullanılan RF sistem ise paralel elektrot düzeneğine sahip olan Georgia Üniversitesi Gıda Bilimi ve Teknolojisi bölümünde bulunan 6 kW güce sahip olan ve üst elektrotun elektrik potansiyel uygulandığı RF sistem 2 (COMBI 6-S, Strayfield International, Wokingham, UK; Şekil 3.3.b).



Şekil 3.4 Farklı radyo frekans sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan tylose örneğinin boyutları ve fiber optik noktaların konumları

3.1.1.1 Tylose hamuru kullanılarak gerçekleştirilen ısıtma deneyleri

RF ısıtma deneyleri için %77 nem içerisine sahip metil selüloz ve saf su karışımı olan tylose hamurunun kullanılması tercih edilmiştir. Tylose hamurunun kolay şekil alabilmesi ve dielektrik, termal özelliklerinin literatür tarafından bilinmesi nedeniyle matematiksel model doğrulamalarının yürütüleceği RF ısıtma deneylerinde kullanılmıştır.

Her üç sistemde de tylose materyali ile RF ısıtma işlem deneyleri hem elektrotlar arası mesafenin ürün sıcaklık dağılımına etkisini incelemek hem de kullanılan üç farklı sistemde serbest salınım prensibiyle çalıştığından elektrotlar arası mesafeye bağlı olarak meydana gelen (potansiyel uygulanan elektrottaki) potansiyel fark değerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Üst elektrot grubunun RF sistem içerisindeki yüksekliği, her üç RF sistemde de belli sınırlar içinde ayarlanabilir bir özelliğe sahiptir. Buna göre elektrotlar arası uzaklık anlamında en kısıtlı seçenek 5 ile 15 cm aralığıyla değişebilen RF sistem 1'dir. Bu durum göz önünde bulundurularak, her üç sistemde de benzer olması amacıyla, deneysel çalışmaların elektrotlar arası 6-10-14 cm uzaklıkta yapılması planlanmıştır. RF sistem 1 ve 3 bünyesinde beş kademeli güç ayarlama seçeneği mevcutken deneysel çalışmalarda ikinci güç kademesi tercih edilmiştir. Bu sistemlerde birinci güç seviyesinde, düşük elektrik potansiyelin farkına bağlı olarak uzun proses süreleri ortaya çıkarken; üçüncü güç seviyesinde ürün kenar ve köşelerinde, yüksek elektrik potansiyeline bağlı olarak, yüksek sıcaklık oluşumları ve yanmalar meydana gelmektedir. RF sistem 2'de ise sistem tam güç seçeneği ile çalışmaktadır. RF sistem 2'de herhangi bir güç ayarı seçeneği bulunmadığından elektrotlar arası mesafe 6 cm koşulunda deney gerçekleştirilirken elektrik boşalması sorunu ile karşılaşmıştır. Potansiyel elektrotun yüzey alanına göre ürün yüzey alanı çok küçük kaldığından ve elektrotlar arası mesafe azaldığında potansiyel elektrota uygulanan güç değeri arttığından 6 cm koşulunda tylose ısıtma deneyleri bu sistemde gerçekleştirilememiştir. Yapılan ön denemeler sonunda elektrotlar arası mesafe 8 cm olduğu durumda deneysel çalışmalar yapılabilmiştir. Belirtildiği üzere RF uygulama ile ısıtma deneylerinde tylose (Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Almanya: Tylose MH300) materyalinden hazırlanan %77 su oranına sahip hamur örneği kullanılmıştır. Tylose hamurunun dielektrik ve termal özellikleri (ısıl iletkenlik katsayısı-k, 0,523 W/m-K; ısı kapasitesi – cp, 3710 J/kg-K ve yoğunluk- ρ , 1070 kg/m³) Bedane vd. (2021) yaptığı çalışmadan alınmıştır (Çizelge 3.1).

Tylose hamuru 9,4 cm çapında ve 4 cm yüksekliğinde olan ve elektromanyetik alana geçirgen özellik gösteren silindirik polipropilen bir kap içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Birla vd. (2008) polipropilen kabın dielektrik değişkeni 0,2 ve dielektrik kayıp faktörünü 0,0023 olarak paylaşmışlardır. Özellikle kayıp faktörü değerinin çok düşük olmasından dolayı polipropilen kap radyo frekansı elektromanyetik enerjiye maruz kaldığında sıcaklık artışı göstermemektedir. Hazırlanan tylose hamuru +4 °C’de 1 gün bekletilerek RF ısıtma uygulamasına hazır hale getirilmiştir. Ürün içi sıcaklık değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla ilk fiber optik sensör (fb1) ürünün merkez noktasına, ikinci fiber optik sensör (fb2) ise ürünün kenarından 1 cm uzaklıkta ve ürün üst yüzeyinden 1 cm derinliğe yerleştirilmiştir. Üç farklı sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda iki adet fiber optik sensör (Fiso Tech. Inc., Quebec, Canada) ve veri toplayıcı (UM14, Universal Multichannel Instrument, Fiso Tech. Inc., Canada) kullanılarak ürün iç sıcaklığı RF ısıtma işlem uygulama süresince kaydedilmiştir. Proses sonunda ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı da termal kamera ile belirlenmiştir (Ankara ve Gaziantep Üniversitelerinde; Fluke, Ti105, ABD kullanılırken University of Georgia; FLIR T440, FLIR Systems, Inc., North Billerica, MA, USA sistemi kullanılmıştır).

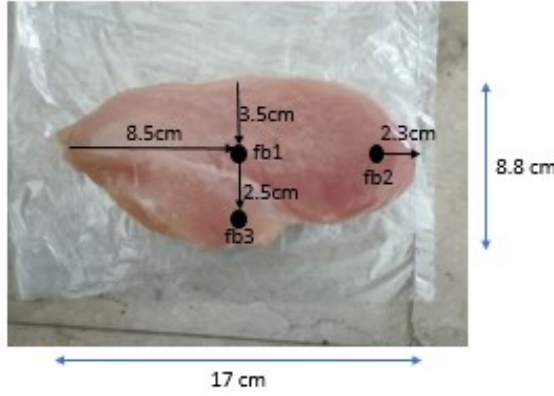
Çizelge 3.1 Tylose hamurunun (%77 su içeri) sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri ve termal özellikleri (Bedane vd. 2021)

Sıcaklık (°C)	Dielektrik değişkeni ϵ'	Dielektrik kayıp faktörü ϵ''
5	64,8	130,06
10	65,52	131,93
20	63,42	145,29
30	63,64	175,91
40	61,86	198,88
50	60,42	227,62
60	58,22	258,96
70	56,2	292,89
80	55,28	318,02

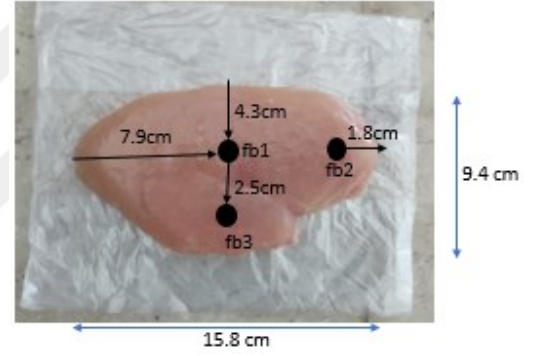
Tylose hamuru kullanılarak elde edilen deneysel veriler RF ısıtma sırasında ürün sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen matematiksel model doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği üç RF sistemde serbest salınım prensibiyle çalışmakta olup; elektrotlar arası potansiyel fark sistemin güç kapasitesine, elektrotlar arası mesafeye, ürün hacmi, kalınlığı ve miktarı ile ürünün

dielektrik özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Matematiksel modelleme çalışmaları ile deney sonuçlarının benzerlik gösterdiği elektrotlar arası potansiyel fark değeri, tersine mühendislik yaklaşımı ile deneme yanılma yöntemi izlenerek tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar üç farklı elektrot yüksekliğinde yapılan tylose ısıtma deneylerinde elde edile iki adet fiber optik sensör sıcaklık değişimi ve proses bitiminde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı verileri kullanılarak geliştirilen matematiksel modelde tanımlanan elektrotlar arası potansiyel fark değeri doğrulanmıştır. Tylose ısıtma prosesinde elde edilen sıcaklık değişimlerine göre göre dondurulmuş tavuk göğsü örneklerinin (çözdürülmesi amacıyla) proses edileceği elektrot yüksekliğine deney – model sonuçlarına göre karar verilmiştir.

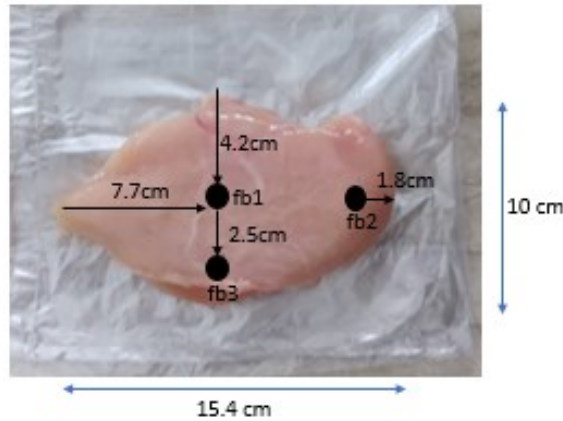
Tavuk örneği 1



Tavuk örneği 2



Tavuk örneği 3



Şekil 3.5 Gaziantep Üniversitesi kurumunda bulunan radyo frekans sistemde çözdürme prosesinde kullanılan derisiz ve kemiksiz tavuk örnekleri ve deneyler sırasında kullanılan üç adet fiber optiğin konumu

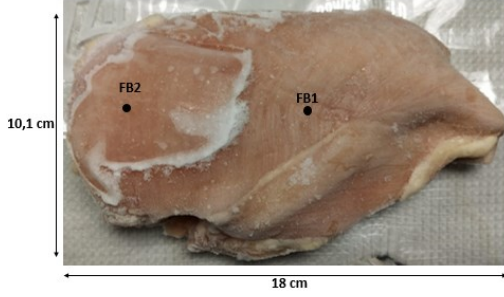
3.1.1.2 Dondurulmuş tavuk göğsü örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen çözündürme deneyleri

Dondurulmuş tavuk göğsü örneklerinin çözündürülmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar için örnekler yerel bir marketlerden temin edilmiştir. Derisiz ve kemiksiz olarak alınan farklı kalınlıktaki ürünler ayrı ayrı $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de dondurulmuştur. Yapılan tylose ısıtma deney sonuçlarına göre (sonuçlar bölümünde de detaylı olarak açıklandığı üzere) RF sistemlerde elektrotlar arası mesafe 14 cm olduğu durumda tylose ısıtma deneylerinde diğer iki elektrotlar arası mesafeye göre üründe daha iyi bir tekdüze sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bu sonuçlar kapsamında dondurulmuş tavuk örneklerinin çözündürme uygulaması elektrotlar arası 14 cm olduğu koşulda gerçekleştirilmiştir. RF sistem 1'de gerçekleştirilen çalışmalarda ürünler tamamen dondurulduktan sonra matkap kullanılarak ince bir uç yardımıyla ürün içi sıcaklığı takip etmek için üç farklı noktadan delikler açılmıştır (Şekil 3.5). Fiber optik sensörler için delik açıldıktan sonra ürünler tekrardan dondurucuya yerleştirilmiştir. Proses bitiminde ürün üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı termal kamera ile belirlenmiş ve çözündürme prosesinin tamamlanmasından sonra ürünler $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yaklaşık bir gün bekletilerek tamamen çözündürüldükten sonra kalite değişimlerinin belirlenmesi amacıyla aşağıda anlatılan analizler uygulanmıştır.

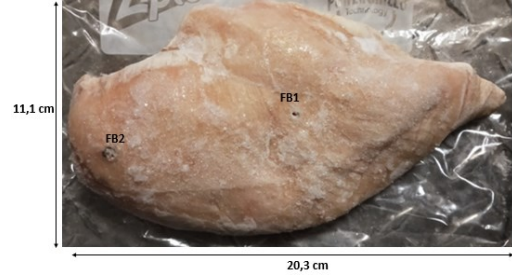
RF sistem 1'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalar pandemi dönemine denk geldiği için sadece RF sistemde çözündürme işlemi tamamlanabilmiş olup kontrol ya da buzdolabı ortamında çözündürme işlemi vakit kısıtlı olduğundan gerçekleştirilememiştir. Georgia Üniversitesi'nde dondurulmuş tavuk göğsü çözündürme deneyleri hem plakalı RF sistem 2'de elektrotlara arası mesafenin 14 cm olduğu koşulda hem de buzdolabı koşulu olarak $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de inkübatörde gerçekleştirilirken; elde edilen kalite analiz sonuçları kontrol grubu olarak kullanılan taze tavuk göğsünden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda tavuk göğsü örneklerinin proses edileceği elektrot yüksekliğinde tamamen çözündürme prosesi, yani fiber optik sensörlerin en az $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ulaştığı ek bir deney çalışması da bu kapsamda gerçekleştirilmiştir. Ayrı ayrı $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de dondurulan tavuk göğsü örneklerinde proses sırasında iç sıcaklığı takip etmek için matkap kullanılarak iki adet delik açılmıştır. Örneklerin boyutları ve fiber optik noktaların yerleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. RF çözündürme prosesi için üç, buzdolabı koşulunda üç ve RF sistemde fiber optik noktaların en az $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı koşulda (RF proses 4) deneyler

gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve sonrasında termal kamera ile ürün yüzey sıcaklık dağılımı da belirlenmiştir.

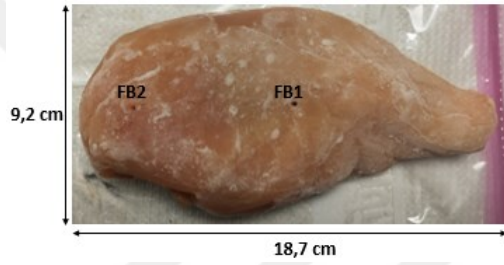
RF proses 1



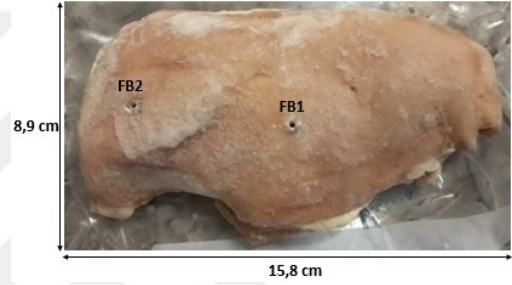
RF proses 2



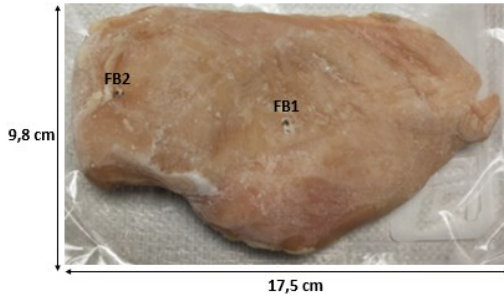
RF proses 3



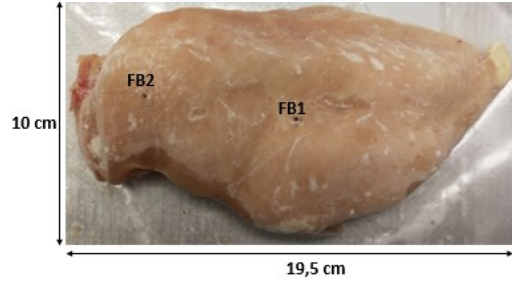
Buzdolabı 1



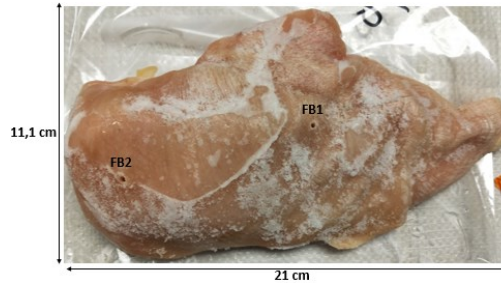
Buzdolabı 2



Buzdolabı 3

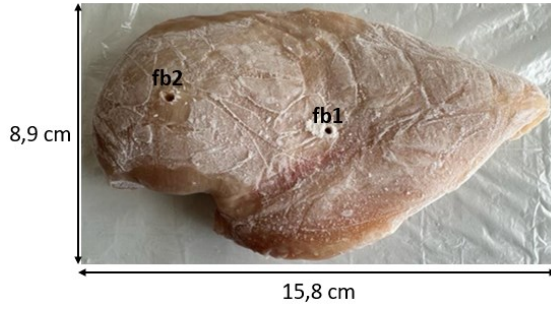


RF proses 4

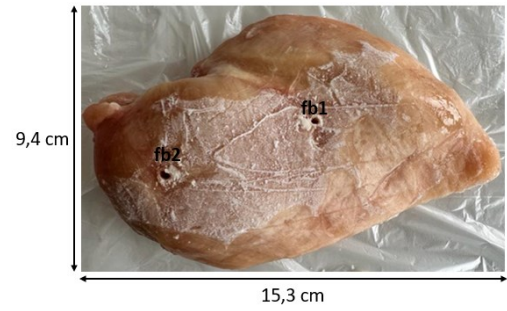


Şekil 3.6 Georgia Üniversitesi kurumunda gerçekleştirilen radyo frekans ve buzdolabı koşulunda çözündürme prosesinde kullanılan derisiz ve kemiksiz tavuk örnekleri ve deneyler sırasında kullanılan iki adet fiber optiğin konumu

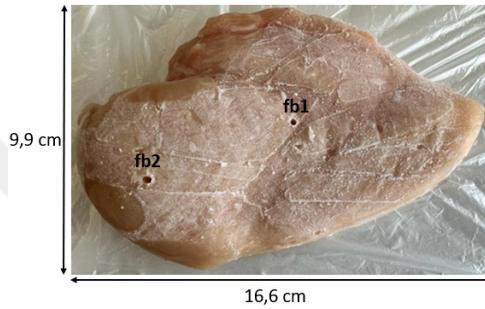
RF proses 1



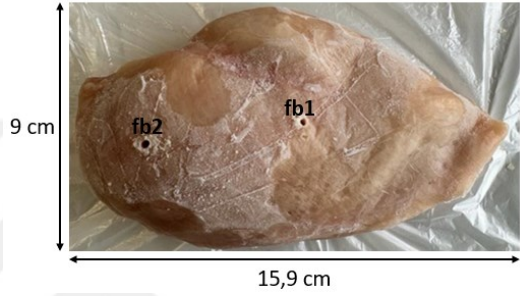
RF proses 2



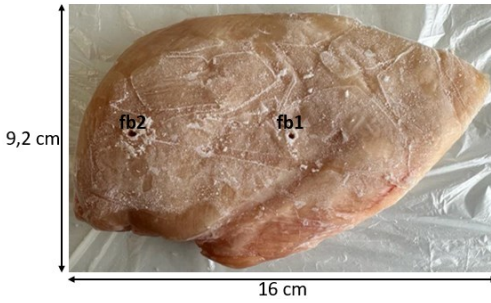
RF proses 3



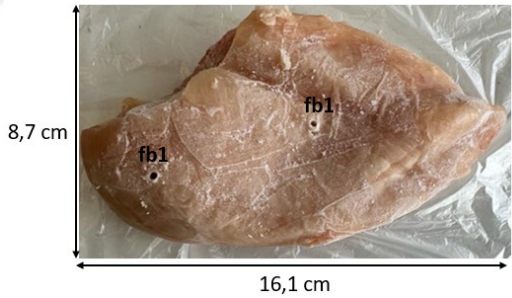
RF proses 4



Buzdolabı 1



Buzdolabı 2



Şekil 3.7 Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilen radyo frekans ve buzdolabı koşulundaki çözdürme prosesinde kullanılan derisiz ve kemiksiz tavuk örnekleri ve deneyler sırasında kullanılan iki adet fiber optiğin konumu

Ankara Üniversitesi'nde bulunan ve RF sistem 3 olarak adlandırılan ekipmanda gerçekleştirilen deneylerde üç farklı koşulda yürütülmüştür. Her koşulda iki adet dondurulmuş ürün kullanılmıştır. Tylose hamuru ısıtma prosesi sonuçlarına göre dondurulmuş ürünlerin çözdürme prosesine elektrotlar arası mesafenin 14 cm'de olmasına karar verilmiştir. İki ürün (RF proses 1 ve 2) 1800 s proses edilirken diğer iki ürün yine elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu koşulda ürün tamamen çözülene kadar proses (RF proses 3 ve 4) edilmiştir. Dondurulan tavuk göğsü örneklerine deney sırasında

fiber optiklerin yerleştirilmesi için yine ince uçlu matkap kullanılarak delikler açılmıştır. Şekil 3.7’de deneylerde kullanılan örneklerin boyutlarını ve fiber optik sensörlerin yerleştirilme konumları gösterilmiştir. Fiber optik sensörler, bulundukları konumlarda ürün kalınlığının yarısı kadar (fb1 için ortalama 1,2 cm, fb2 için ortalama 2 cm) bir derinliğe yerleştirilmiştir. RF deneyleri öncesinde ürünün üst yüzeyi, proses sonrasında ise hem üst hem de alt yüzey sıcaklık dağılımı termal kamera ile belirlenmiştir. RF prosesine tabii tutulan ürünlerin kalite özelliklerini karşılaştırmak amacı ile iki adet ürün ev tipi buzdolabında çözdürülmüştür. Aynı zamanda taze alınan iki ürünün analizleri de kontrol grubu olarak kullanılmıştır.

RF çözdürme işlemi uygulanan dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine çözme kaybı, tekstür, renk ve pişme kaybı analizleri yapılmıştır. Çözme kaybı; çözdürme öncesi (M_0) ve sonrası (M_s) ürünün ağırlıkları belirlenerek çözdürme sırasındaki ağırlık kaybı kütsel olarak belirlenmiştir (Farag vd. 2009).

$$\% \text{ Çözme kaybı} = \frac{M_0 - M_s}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

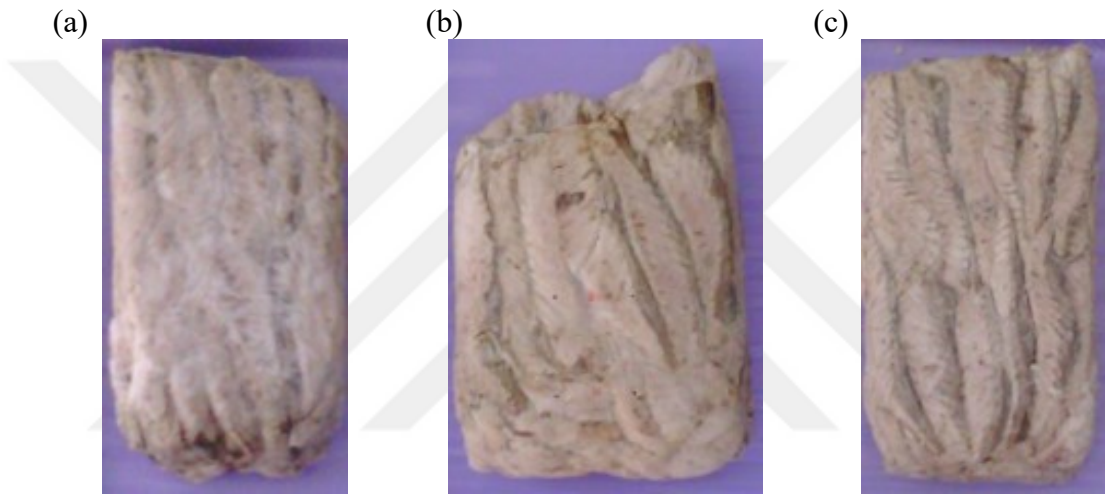
Pişme kaybı; her bir çözdürülmüş tavuk göğsü örneğinden yaklaşık üç parça 10 g alınarak kilitli poşetlere yerleştirilmiş ve merkez sıcaklığı 72 °C’ye ulaşınca kadar 75 °C’deki su banyosunda bekletilmiştir. Pişirmeden önceki (M_1) ve pişirmeden sonraki (M_2) ağırlıklar kullanılarak aşağıdaki formüle göre pişme kaybı hesaplanmıştır (Lee vd. 2021).

$$\% \text{ Pişme kaybı} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

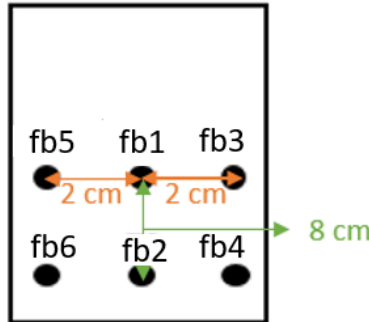
Tekstür profil analizi (TPA), çözdürülmüş tavuk örneğinin kalınlığı eşit olmadığından ürünün merkez ve kenar bölgelerinden alınan iki farklı silindirik parçaya uygulanmıştır. Tekstür profil analizi (TPA) silindirik prob ile tekstür analiz cihazında (Model TA-XT2i, Texture Analyzer, Stable Micro System, UK) yapılmıştır. Test öncesi cihaz sabit 2 kg yük ile kalibre edilmiş; test öncesi ve sonrası prob hızı 3 mm/s, iki sıkıştırma arasında 1 mm/s hız kullanılmıştır. Silindirik prob ürün yüksekliğinin %50’si kadar bir sıkıştırma uygulaması Bedane vd. (2018) tarafından açıklandığı şekilde kullanılmıştır.

Renk analizi; TPA analizi için hazırlanan örneklerin farklı bölgelerinden ölçüm alınarak tamamlanmıştır. Parçalar merkez ve köşe olarak iki gruba ayrılırken, merkez parçanın üst ve alt yüzeyinden; köşe parçanın üst ve iç yüzeyinden ölçümler üç tekerrürlü alınmıştır. Renk analizi sırasında L^* (parlaklık), a^* (kırmızılık) ve b^* (sarılık) değerleri analiz edilmiştir. RF prosesinin renk üzerine etkisini karşılaştırmak için renk farkı değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Anese vd. 2012).

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_{kontrol}^* - L_{RF}^*)^2 + (a_{kontrol}^* - a_{RF}^*)^2 + (b_{kontrol}^* - b_{RF}^*)^2} \quad (3)$$



Şekil 3.8 Radyo frekans sistem 3’de gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan blok halindeki çizgili ton balıkları örnekleri (a) 1’nolu örnek; (b) 2’nolu örnek; (c) 3’nolu örnek



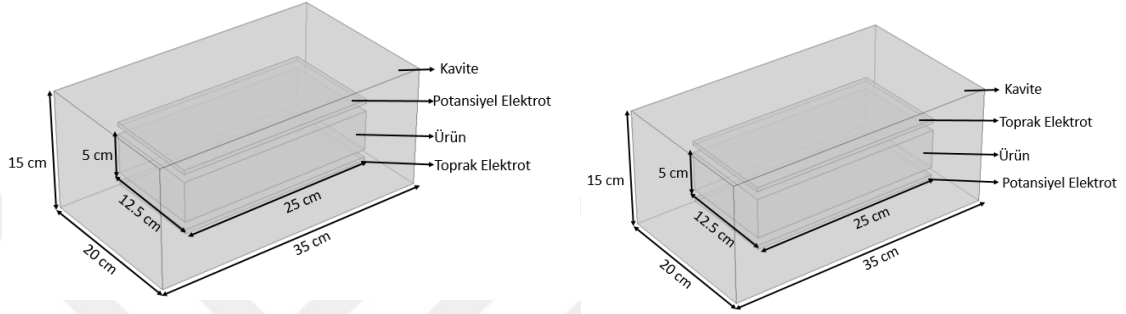
Şekil 3.9 Radyo frekans sistem 3’de gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan blok halindeki çizgili ton balıkları örneklerinde kullanılan fiber optik sensörler

3.1.2 Dondurulmuş blok ton balığı kullanılarak gerçekleştirilen çözündürme deneyleri

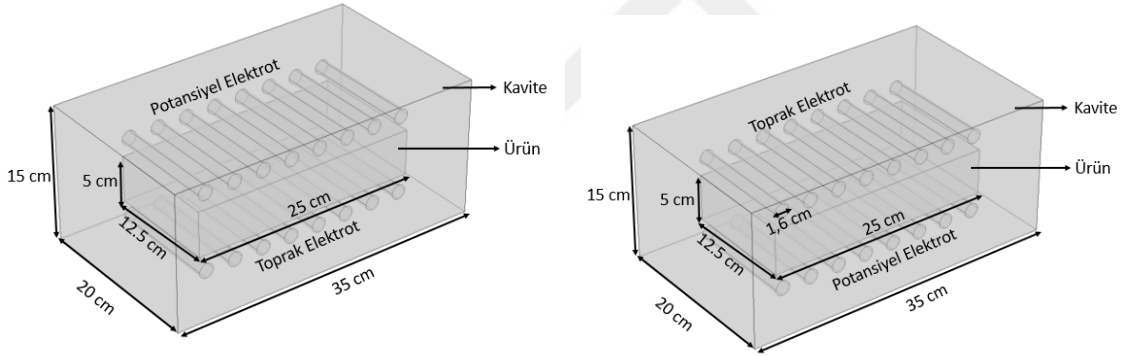
RF uygulama düşük frekans yüksek dalga boyunda gerçekleştiğinden büyük hacimli ürünlerin endüstriyel ölçekte prosesine imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda şekil 3.8’de gösterilen yaklaşık 6 kg ağırlığında blok olarak dondurulmuş ton balığı türü örneklerine Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği’nde bulunan 27,12 MHz frekansında 10 kW güç ile çalışan sistemde çözündürme prosesi uygulanmıştır. Kullanılan RF sistemde bulunan beş kademeli güç seviyesinden ilk güç kademesi bu deneyler için yapılan ön denemeler ile seçilmiştir. Daha yüksek güç kademelerinde yüksek elektrik potansiyeli değerlerinden dolayı ürün köşe ve kenar noktalarında sıcaklık hızlı yükselmiş ve yanmış kararmış bölgeler meydana gelmiştir. Serbest salınım prensibiyle çalışan RF sistemlerde iki elektrot arasına yerleştirilen ürün miktarı arttıkça sistemin uyguladığı güç değeri artmaktadır. Qu vd. (2020) yapmış olduğu çalışmada plakalı radyo frekans sisteminde elektrotlar birbirine yaklaştırıldığında uygulanan güç değerinin arttığını göstermişlerdir. Deneysel çalışmalardan önce bloklarda iki farklı noktadan ince matkap ucu ile fiber optik sensörlerin yerleştirilmesi amacıyla delikler açılmıştır (Şekil 3.9). Her bir üründe farklı iki noktadan ölçüm alınarak ürün içi sıcaklık tekdüzeliği de bu bağlamda kontrol edilmiştir. Ürünlerin kalınlığı yaklaşık olarak 10 cm olsa da ince matkap uçlarının uzunluğu sınırlı olduğundan ve olası kırılma problemlerinden dolayı fiber optik sensörler ancak üst yüzeyden 2 cm derinliğe yerleştirilebilmiştir. Kalın matkap ucu kullanılması durumunda çözündürme sırasında açılan deliğe, çözündürme işlemi sırasında, buzun suya dönüşmesine bağlı olarak deliğe su birikmesinden dolayı (çözünme işlemine bağlı olarak) yanlış sıcaklık ölçümü durumu meydana gelmiştir. Geniş matkap ucu ile açılan deliklerde biriken suyun dielektrik özelliklerinin donmuş üründen çok farklı olmasından dolayı ve delikte su birikmesi gerçekleştiğinde fiber optik suyun sıcaklığını ölçtüğünden yüksek sıcaklık verileri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra ürün blok üst yüzey sıcaklık dağılımı da termal kamera ile belirlenmiştir. Deneyler sırasında üst elektrotun yüksekliği ürünün üst yüzeyinden 5 cm mesafe olacak şekilde kullanılmış ve elektrotlar arası uzaklık da 15 cm olarak uygulanmıştır. Proses sırasında uygulanacak elektrot yüksekliğine yapılan ön denemeler ile karar verilmiştir. Bu aşamada fiber optik

sensörlerin de deney başlangıcında rahat bir şekilde ürüne yerleştirilebilmesi için ürüne yakın bir elektrot mesafesi tercih edilmemiştir. Dondurucudan çıkarılan ürünler hızlı bir şekilde elektromanyetik alana geçirgen polipropilen bir tabağa yerleştirilerek RF sistem içerisinde alt elektrotun merkezine yerleştirilmiştir. Fiber optik sensörler ölçüm alınacak noktalara yerleştirilmesi ile birlikte proses hızlı bir şekilde başlatılmıştır.

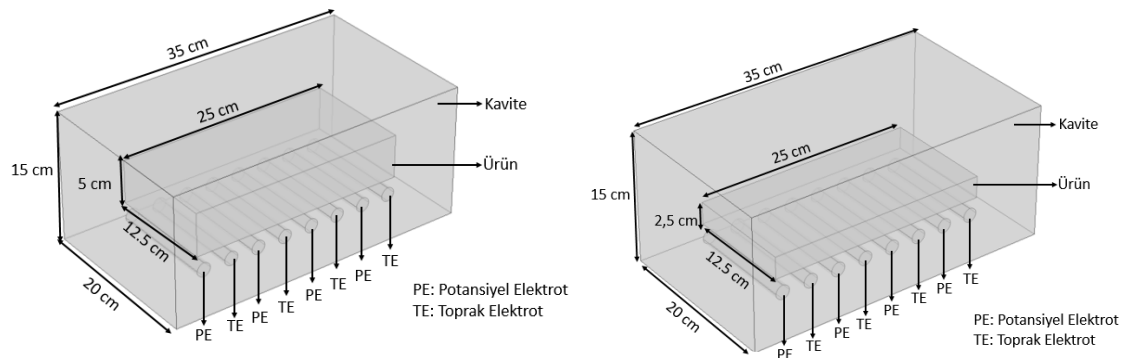
Plakalı Elektrot



Çapraz Elektrot



Püskül Elektrot



Şekil 3.10 Plakalı ve çapraz elektrot geometrisinde potansiyel elektrotun üst ve alt olduğu konumda, püskül elektrot geometrisinde tüm ve yarım ürün koşullarında geliştirilen matematiksel model geometrileri ve uzunluk birimleri

3.2 Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

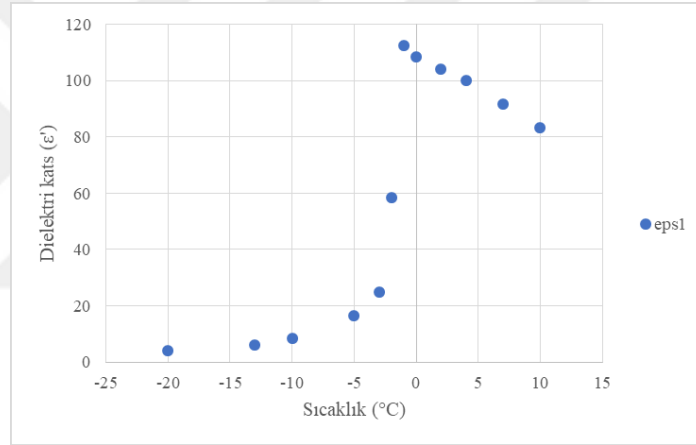
3.2.1 Farklı elektrot geometrileri temelinde gerçekleştirilen matematiksel model çalışmaları

RF uygulama sırasında ürün sıcaklık değişimleri ve RF sistem içi elektromanyetik alan değişiminin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen matematiksel model geliştirme çalışmalarında Comsol çoklu-fizik programı V5.6 (Comsol AB, Stockholm, İsveç) kullanılmıştır. Şekil 3.1’de gösterilen bölüm 1 çalışmalarında, farklı elektrot geometrilerinin etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen modellerde kullanılan RF sistem geometrisi Şekil 3.10’da verilmiştir. Farklı RF sistemlerde dondurulmuş bir ürünün çözdürülmesi kapsamında gerçekleştirilen matematiksel model çalışmalarında, ürün olarak, üçüncü bölümde de kullanılan dondurulmuş ton balığı örnekleri $25 \times 12.5 \times 5$ cm boyutlarında bir blok olarak kullanılmıştır. Plakalı ve çapraz elektrot geometrilerinde potansiyel elektrotun üst ve alt konumda olduğu durumlar için matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Püskül elektrot geometrisinde ürün kalınlığının etkisini incelemek için ürün kalınlığı yarıya indirilerek de ek bir model çalışması yapılmıştır. Huang vd. (2016) plakalı elektrot dizaynında ürünü alt elektrotun hemen üstüne ve iki elektrotun tam arasına yerleştirerek elektromanyetik alan dağılımını göstermişlerdir. Ürün üst ve alt elektrottan eşit uzaklıktaki konuma yerleştirildiğinde ürün merkezinde daha yüksek yoğunlukta elektrik enerji elde edilmiştir. Aynı zamanda ürün bu konumda iken ürün sıcaklık dağılımında tekdüzelik anlamında pozitif etkisi olmuştur. Ürün dielektrik özelliklerinin, dielektrik katsayısı ve kayıp faktörü, sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 3.11’de verilmiştir (Llave vd. 2014, 2015). Çözdürme işlemi sırasında faz değişim bölgesi ve bu bölge sıcaklık değişimini belirleyebilmek amacıyla sıcaklığa bağlı özgül ısı kapasitesi, ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluk değerleri kullanılmıştır (Şekil 3.12). Faz değişim sıcaklığından (-1 °C) yüksek sıcaklıklarda ise özgül ısı kapasitesi- c_p 3650 (J/kg-K), ısı iletkenlik katsayısı- k 0.523 (W/m-K), yoğunluk- ρ 1070 (kg/m³) olarak kullanılmıştır. Ürünün yüzeylerinde konvektif ısı transfer sınır koşulu uygulanmış olup, konvektif ısı transfer katsayısı değeri- h 20 (W/m²-K) ve ortam hava sıcaklığı ise 20 °C olarak kullanılmıştır:

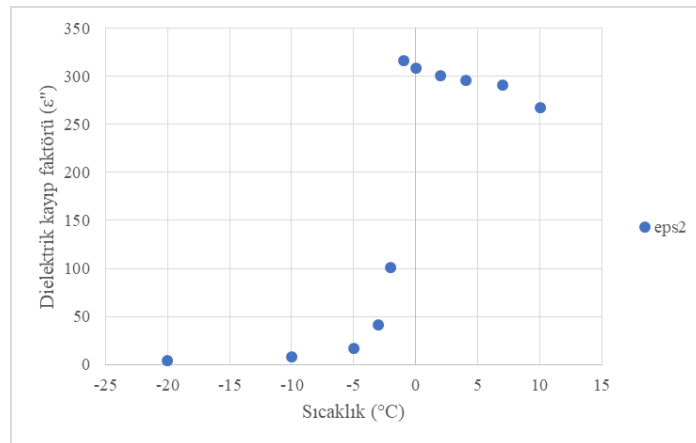
$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\sigma} = h \cdot (T|_{\sigma} - T_{\infty}) \quad (4)$$

Bu denklikte h 20 (W/m²-K) konveksiyon ısı transfer katsayısını, $T|_{\sigma}$ (K) ürün – hava ara yüzey sıcaklığını ve T_{∞} (K) ortam sıcaklığını göstermektedir. Ürün başlangıç sıcaklığı tekdüze kabul edilip -18 °C olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Erdogdu vd. (2017) tarafından da endüstriyel skalada RF sistem tasarımı ve proses geliştirme kapsamında yapılan bir çalışmada da kullanılmıştır. Bu koşullarda, sistem içi elektromanyetik alan dağılımı ve ürün içi sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla, Comsol yazılımında elektrostatik (Eşitlik 5) modülleri ve katılarda ısı transferi (Eşitlik 6, 7) modülleri kullanılmıştır.

(a)

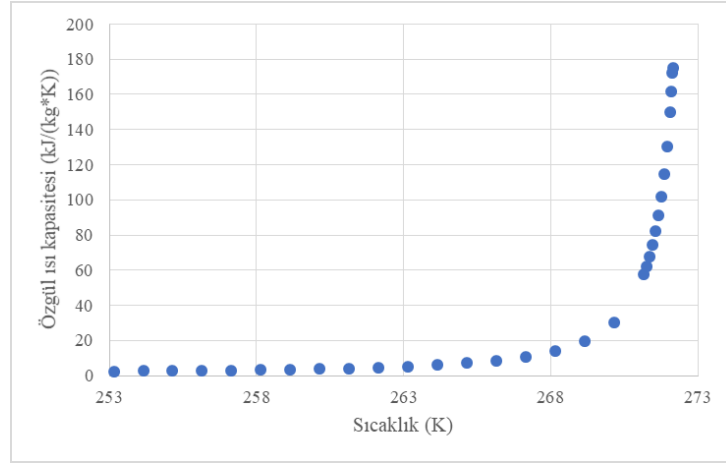


(b)

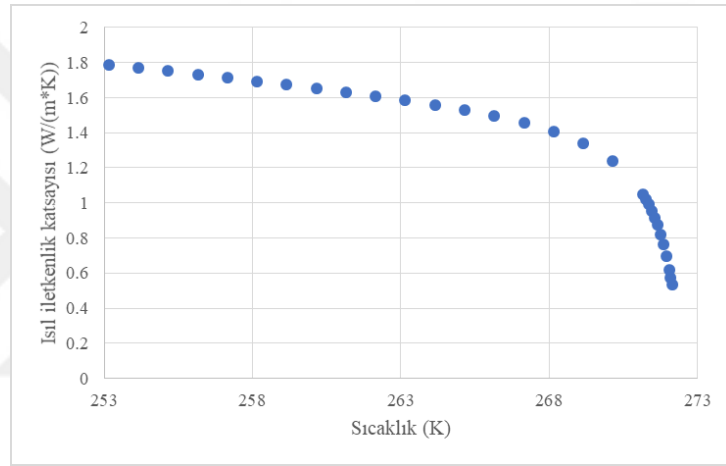


Şekil 3.11 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan ürünün sıcaklığa bağlı (a) dielektrik katsayısı; (b) dielektrik kayıp faktörü değerleri (Llave vd. 2014, 2015)

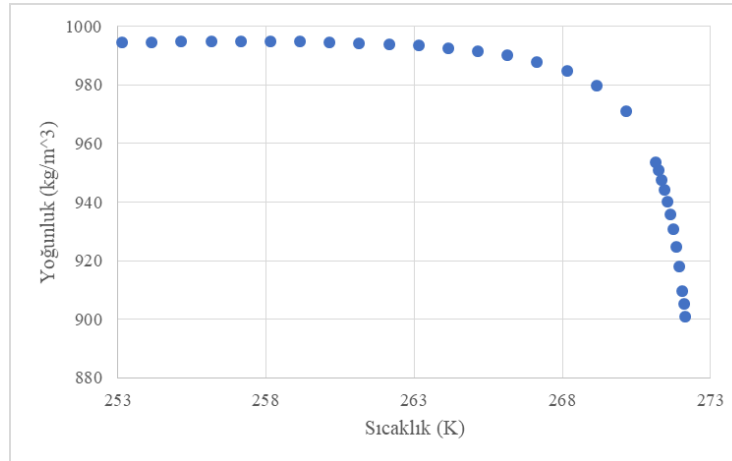
(a)



(b)



(c)



Şekil 3.12 Matematiksel model çalışmalarında kullanılan ve ürün faz değişimi sıcaklığının (-1°C) altındaki (a) özgül ısı kapasitesi- c_p ; (b) ısı iletkenlik katsayısı- k ; (c) yoğunluk – ρ değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2014, 2015)

Uygulanan modellerde potansiyel elektrota 1000 V elektrik potansiyeli değeri tanımlanırken, kavitenin duvarları ve topraklama elektrotuna $V=0$ sınır koşulu tanımlanmıştır. Özellikle üründe sıcaklığın doğru çözümlenmesi amacıyla, çapraz ve püskül elektrot sistemlerde silindirik şeklin de korunması (kaba ağ kullanımına bağlı olarak geometrik özelliklerin kaybedilmemesi) amacı ile yoğun ağ yapısı tercih edilirken RF sistem içerisinde orta yoğunlukta ağ yapısı kullanılmıştır. Proses süresi olarak 3600 s seçilirken, faz değişim bölgesinde meydana gelen sıcaklık değişimlerinin doğru olarak belirlenebilmesi amacıyla, Δt değeri maksimum 1 saniye olarak ayarlanmıştır. Matematiksel model çalışmalarının bir tanesinin tamamlanması ortalama 1 gün sürmüştür olup kullanılan modüllere bağlı olarak kullanılan denklemler aşağıda açıklanmıştır. Model çalışmaları, Win7-Pro işletim sistemine sahip Intel(R) Xeon(R) CPU W-2123-3,60 GHz, 64 Gbyte Ram ile çalışan bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir.

27,12 MHz frekansta kullanılan dalga boyu (vakumda) ~ 11 m 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 çıkartılan Gauss denkliğinin çözülmesiyle elde edilmiştir (Marra vd. 2007):

$$\nabla(\varepsilon \cdot \vec{E}) = 0 \quad (5)$$

Bu denklikte ε ürünün geçirgenliğini ve $\vec{E}$ ise elektriksel alanı değerini göstermektedir. Elektrotlar arası oluşan elektromanyetik alana maruz kalan üründe sıcaklık artışı gerçekleşmekte olup katılarda ısı transferi modülü kullanılarak sıcaklık dağılımının belirlenmesi genel enerji denkliği çözülmektedir:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) + Q_{abs} \quad (6)$$

Bu denklikte ρ ürünün yoğunluğunu (kg/m^3), c_p ısı kapasitesini (J/kg-K), k ısı iletim katsayısını (W/m-K), t (s) zamanı, T (K) ürün sıcaklığını ve Q_{abs} (W/m^3) elektriksel alanla oluşan ve ürün tarafından absorbe edilen enerjiyi göstermektedir (Chen vd. 2016):

$$Q_{abs} = \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot |\bar{E}|^2 \quad (7)$$

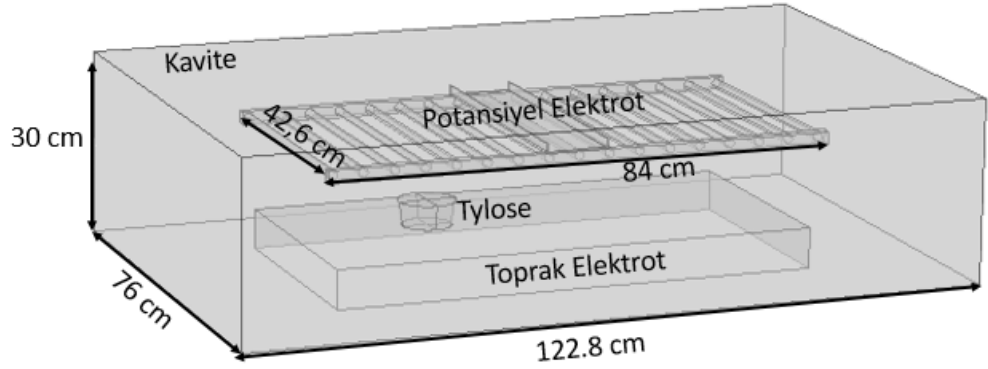
Bu denklikte f (27.12 MHz) RF jeneratörün frekansını, ϵ_0 ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m) serbest uzay geçirgenlik sabiti değerini, ϵ'' ürünün bağıl dielektrik kayıp faktörünü ve $|\bar{E}|$ (V/m) ise elektriksel alan modülü değerini göstermektedir.

Sınır koşulları olarak elektrostatik modülü altında potansiyel elektrot yüzeyi seçilerek sistemde uygulanan güç değeri tanımlanmış olup diğer elektrot ve RF kavite duvarları topraklama yaklaşımı ($V=0$) uygulanmıştır. Ürün başlangıç sıcaklığının ise tekdüze bir dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır.

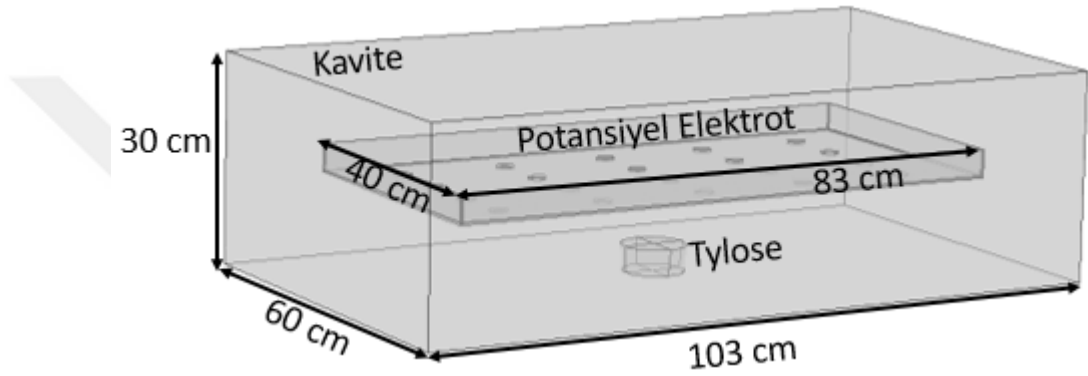
3.2.2 Üç farklı radyo frekans sistemde matematiksel model geliştirme çalışmaları

Tylose hamuru kullanılarak üç farklı RF sistemde üç farklı elektrot yüksekliğinde gerçekleştirilen RF ısıtma işlem deneyleri kapsamında, tylose hamuru sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmalarda sistemlerde uygulanan elektrik potansiyel değerleri belirlenmiştir. Bu kapsamda matematiksel model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılarak, tersine mühendislik yaklaşımı kullanılarak deneme yanılma metodu ile sistemlerde farklı elektrot uzaklıklarında elde edilen elektrik potansiyel değerleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği üç RF sistemde serbest salınım prensibi ile çalışmakta olup, buna bağlı olarak elektrik potansiyel uygulanan elektrot voltaj değeri; elektrotlar arası uzaklık ve ürün miktarına göre değişiklik göstermektedir. Matematiksel model sonuçları hem fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık değişimleri hem de tylose hamuru üst yüzey sıcaklık dağılımı sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Deneyler sırasında RF sistemlerde uygulanan güç değerinin belirlenmesi ile kullanılan elektrot yüksekliğinin elde edilen elektrik potansiyeli-voltaj değerine etkisi de belirlenmiştir. Tylose hamurunun dielektrik özellikleri Bedane vd. (2021) yapmış olduğu çalışmadan sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmıştır (Çizelge 3.1). Şekil 3.13 kullanılan farklı RF sistem geometrilerini göstermekte olup, tylose hamuru örneği sistemlerin orta noktasına yerleştirilmiştir. Yukarıda da açıklandığı üzere, katılarda ısı transferi ve elektrostatik modülleri kullanılmıştır.

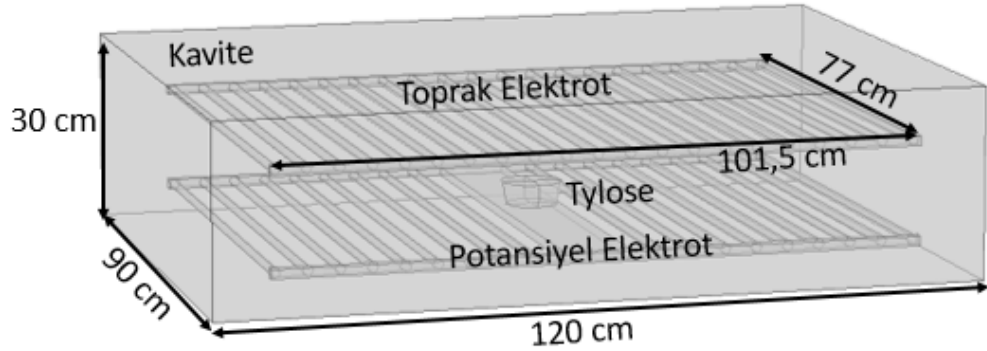
(a) RF Sistem 1



(b) RF Sistem 2



(c) RF Sistem 3



Şekil 3.13 Üç radyo frekans (RF) sistemde farklı elektrot yüksekliğinde tylose ısıtma deneylerinin matematiksel modellenmesi için oluşturulan üç boyutlu sistem boyutları; (a) RF sistem 1, (b) RF sistem 2 ve (c) RF sistem 3

Yukarıda da açıklandığı üzere elektrostatik modülü altında potansiyel elektrot yüzeyi seçilerek sistemde uygulanan güç değeri tanımlanmış olup diğer elektrot ve RF kavite duvarları topraklama yaklaşımı ($V=0$) uygulanmıştır. Ürün başlangıç sıcaklığının tekdüze bir dağılıma sahip olduğu varsayılarak, başlangıç sıcaklık değerleri, deneysel

verilere göre tanımlanmıştır. Ürün yüzeyinden gerçekleşen konveksiyon ısı transferi için ortam sıcaklığı sabit 20 °C tanımlanırken ısı transfer kat sayısı 20 (W/m²-K) olarak kullanılmıştır (Eşitlik 4). Proses süresi elektrotlar arası mesafeye göre değişkenlik gösterirken model çalışması süresi birkaç saat ile bir gün aralığında değişmiştir. Ürün, çapraz ve püskül elektrotlarda yoğun bir ağ yapısı tercih edilirken kavitelerde orta yoğunlukta bir ağ yapısı oluşturulmuştur.

3.2.3 Dondurulmuş ton balığı örneklerinin radyo frekans uygulama ile çözündürme prosesi için geliştirilen matematiksel model çalışmaları

Tezin üçüncü bölümünde Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünde bulunan RF sistemde gerçekleştirilen dondurulmuş ton balıklarının çözündürülmesi prosesi için de matematiksel model çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalarda, 3.2.1 ve 3.2.2 bölümlerinden farklı olarak RF sistem içerisinde doğal konveksiyonla ısı transferi mekanizmasına bağlı olarak gerçekleşen ısı transferi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan hava hız değişimlerinin belirlenmesi de ayrıca belirlenmiştir. Bu kapsamda sabit ısı transfer katsayısı ve doğal konveksiyon koşulu olmak üzere iki farklı durumda model geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Ton balığının termal ve dielektrik özellikleri 3.2.1’de açıklandığı şekilde kullanılmıştır (Şekil 3.11, 3.12). Sabit ısı transfer katsayısı koşulunda 3.2.1 ve 3.2.2 numaralı bölümlerde açıklanan belirtilen sınır koşulları (Eşitlik 4) ve denklikler kullanılmıştır. Doğal konveksiyon durumunda ise kavite içerisindeki hava sıcaklık ve hız değişimlerinin belirlenmesi amacıyla laminar akış modülü ile birlikte hem katı hem de akışkanlarda ısı transferi modülü kullanılmıştır. Ürün ve kavite içerisindeki havanın sıcaklık değişimi aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır:

$$\left[\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{abs} \right]_{ürün} \quad (8)$$

$$\left[\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \right]_{hava} \quad (9)$$

Bu denkliklerde u (m/s) sistem içerisinde konveksiyona bağlı olarak meydana gelecek olan hava hız profil değişimini göstermektedir.

$$\rho_f \nabla(u) = 0 \quad (10)$$

$$\rho_f \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_f (u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \quad (11)$$

Hava hız profili yukarıda verilen momentum ve süreklilik denklemleri (Eşitlik 10 ve 11) kullanılarak çözülmüştür. ρ_f (kg/m³) kavite içerisindeki havanın yoğunluğu, $F = \rho \times g$ yerçekimi kuvvetini, p (Pa) basıncı temsil etmektedir. Ürün başlangıç sıcaklığı deneyler sırasında elde edilen sıcaklığa göre karar verilerek tekdüze bir dağılım olduğu varsayılmıştır. Ankara Üniversitesi RF sistemde uygulanan elektrik potansiyel değeri alt elektrotta, potansiyel görevi gördüğünden, tanımlanmıştır. Üst elektrot ve kavite duvarları ise topraklama yaklaşımı ile $V = 0$ sınır koşulu girilmiştir. Laminer akışın doğru çözümlenebilmesi için kavitenin alt yüzeyinde referans basınç noktası ek bir sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında elde edilen veriler ile geliştirilen matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması için kök ortalama kare hatası (RMSE) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır (Karatas vd. 2023).

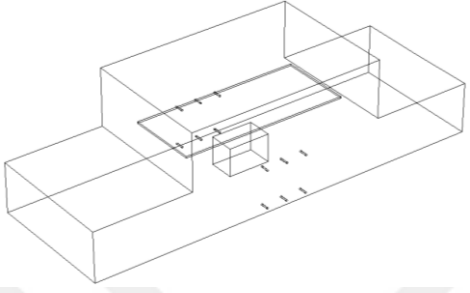
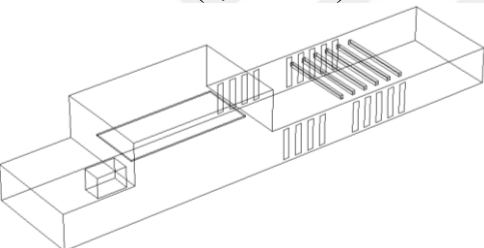
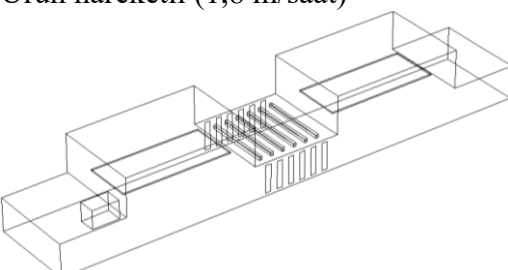
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{deney} - T_{model})^2} \quad (12)$$

Matematiksel modellerden elde edilen ürün sıcaklık dağılımının tekdüzeliğinin karşılaştırılması için sıcaklık tekdüzelik indeksi (TUI) değeri kullanılmıştır (Alfaifi vd. 2014).

$$TUI = \frac{\frac{1}{V} \int_V \sqrt{(T - T_{ortalama})^2} dV}{T_{ortalama} - T_{başlangıç}} \quad (13)$$

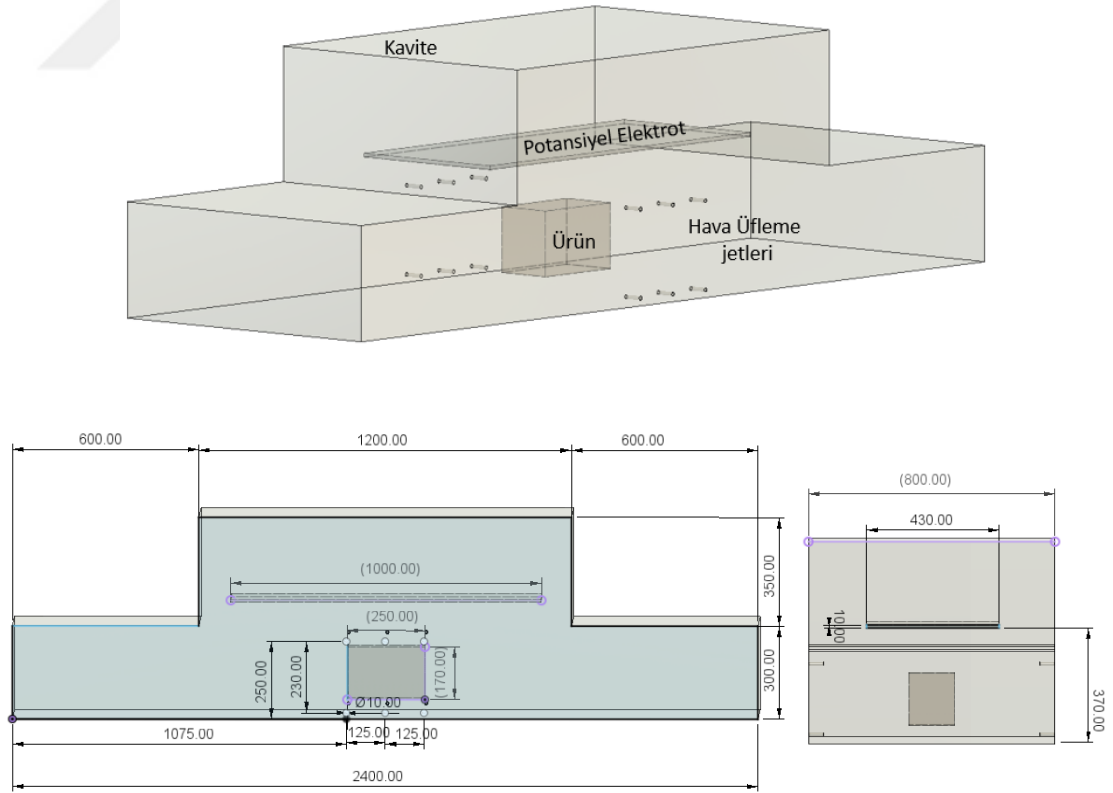
Bu denklikte V ürün hacmini, T ürün sıcaklığını, $T_{ortalama}$ ürünün proses boyunca ortalama sıcaklığını, $T_{başlangıç}$ ürün başlangıç sıcaklığını göstermektedir.

Çizelge 3.2 Proses tasarım çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen vurgulu hava jeti uygulama modelleri ve sınır koşulları

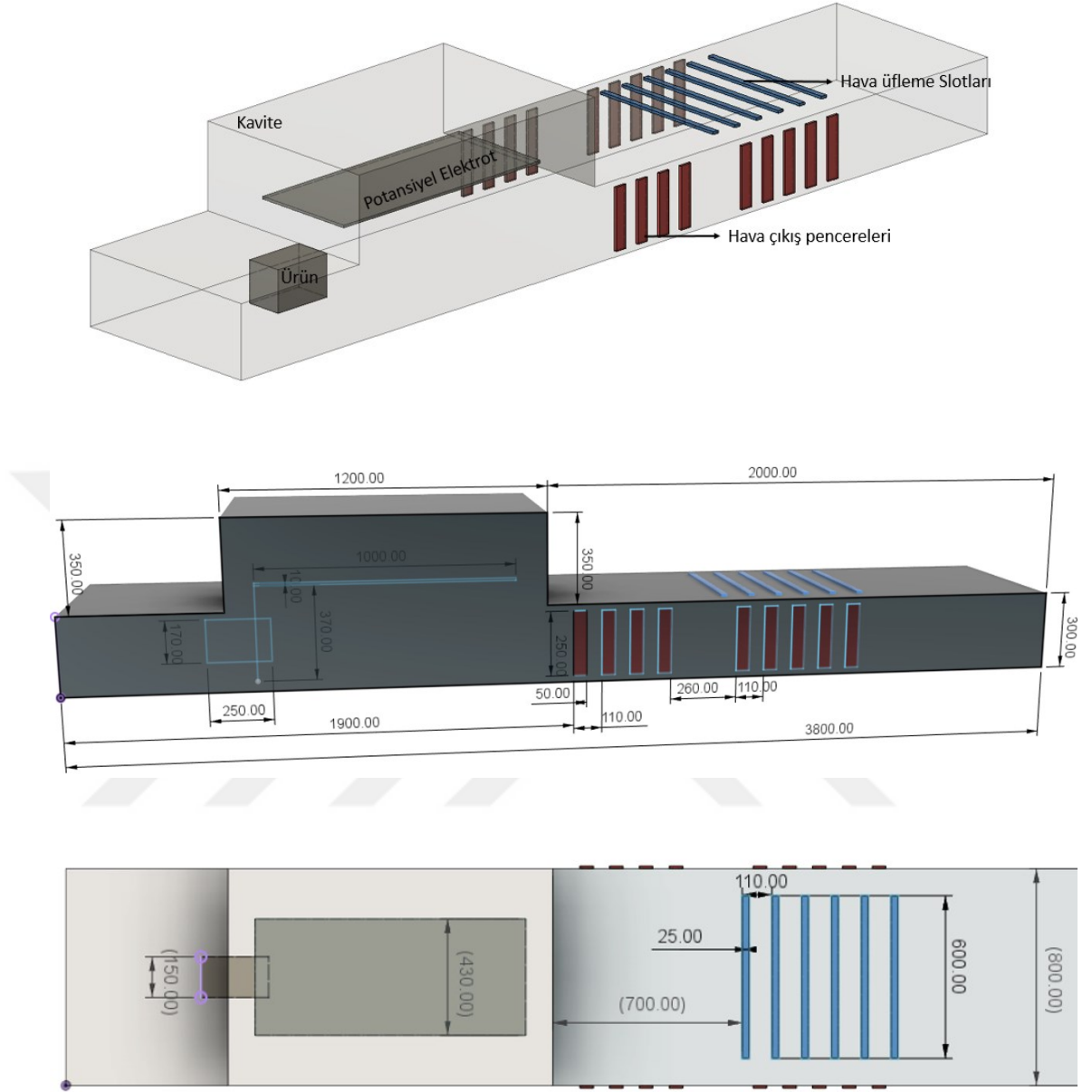
Radio frekans sistem ve ürün hareketi	Proses Süresi (s)	Elektrot Potansiyel Değeri (V)	Proses Koşulları
Tek kavite kesikli RF sistem 	7000	1000 2750	Ürün yüzeyinde sabit konvektif ısı transfer katsayısı $h = 20(\text{W/m}^2\text{-K})$ Doğal konveksiyon
		1000	Vurgulu hava jet hızı: 0.25-1-5 m/s
Tek kavite uzatılmış sürekli RF sistem Ürün hareketli (1,8 m/saat) 	5400	1000	Ürün yüzeyinde sabit konvektif ısı transfer katsayısı $h = 20(\text{W/m}^2\text{-K})$ Vurgulu hava jet hızı: 1 m/s
		2750	Ürün yüzeyinde sabit konvektif ısı transfer katsayısı $h = 20(\text{W/m}^2\text{-K})$ Vurgulu hava jet hızı: 1-5 m/s
	2700	5500	Vurgulu hava jet hızı: 5 m/s
İki kavite sürekli RF sistem Ürün hareketli (1,8 m/saat) 	7000	1000	Ürün yüzeyinde sabit konvektif ısı transfer katsayısı $h = 20(\text{W/m}^2\text{-K})$ Vurgulu hava jet hızı: 1 m/s
		2750	Ürün yüzeyinde sabit konvektif ısı transfer katsayısı $h = 20(\text{W/m}^2\text{-K})$ Vurgulu hava jet hızı: 1-5 m/s
	3500	5500	Vurgulu hava jet hızı: 5 m/s

3.2.4 Dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesi amacıyla endüstriyel ölçekte radyo frekans sistem tasarımı

Matematiksel model çalışmaları olarak yürütülen RF tünel tasarımlarında yukarıda bahsedilen sabit konvektif ısı transferi katsayısı koşulunun yanında doğal konveksiyonun ürün sıcaklık dağılımında etkisini görmek için ısı transferi ve laminar akışın birlikte çözüldüğü modellerde yapılmıştır. Tek kavite kesikli RF sistemde yan duvarlara hava üfleme jetleri, sürekli tünel RF sistemlere hava üfleme slotlar eklenerek model çalışmaları yapılmıştır. Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere tek kavite kesikli RF sistemde (şekil 3.14) 1000 ve 2750 V güç uygulanarak 7000 s’lik sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumu altında çözündürme işlemi uygulanmıştır. Hava üfleme hızının etkisi sadece 1000 V güç uygulanan ve hava hızının 0,25, 1 ve 5 m/s olduğu durumlarda modeller yapılmıştır.



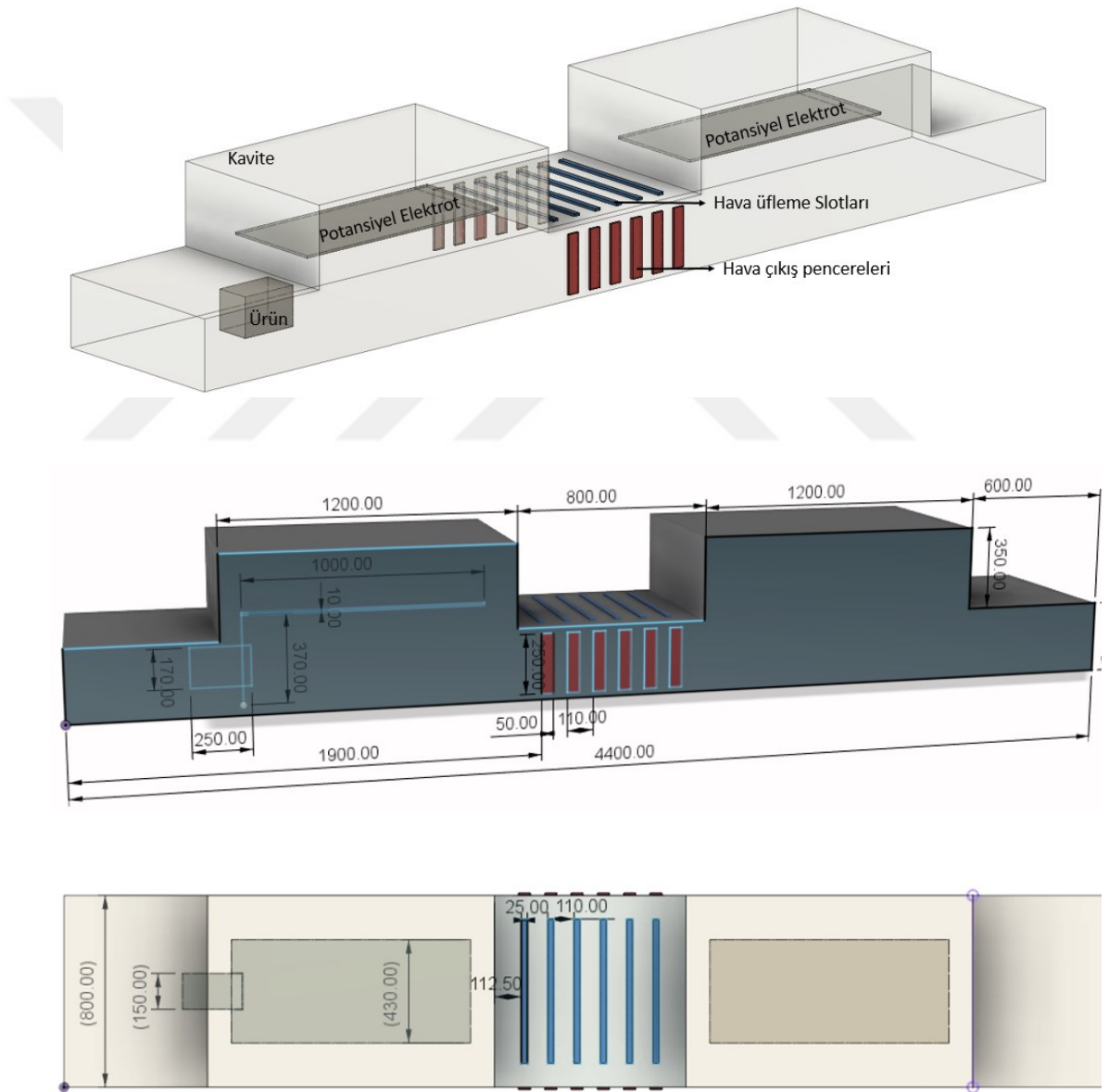
Şekil 3.14 Tek kaviteli kesikli radyo frekans sisteminin yan duvarlara eklenen hava üfleme jetleri kombineli sistem tasarımı



Şekil 3.15 Tek kavite uzatılmış sürekli üretime uygun radyo frekans ve hava üfleme slotlarıyla kombine edilmiş sistem tasarımı ve boyutları

Hava üfleme slotlarıyla (dörtgen kesitli yivler) kombineli iki farklı RF tünel sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk tasarım şekil 3.15’de gösterilen tek kavite RF sistem uzatılarak prosesin son bölümüne hava üfleme slotları yerleştirilmiştir. Kavite sonuna eklenen hava üfleme bölümü ile ürün sıcaklık dağılımının özellikle de ürün yüzeyinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilmesi hedeflenmiştir. İki kavite tünel RF sistemde hava üfleme slotları iki kavitenin arasına yerleştirilerek tasarım çalışmaları yapılmıştır

(Şekil 3.16). Yapılan ön çalışma modellerinde ilk kavite sonunda ürün köşe ve kenar sıcaklıkları faz değişimi sıcaklığını aştığından ikinci kavitede elektromanyetik enerji ile birlikte sıcaklık istenmeyen derecede yükselmekteydi. Bu amaçla iki kavite tünel RF sistemde slot jetler iki kavite arasına yerleştirilerek üründe soğuma sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda kullanılan ve revize edilen RF sistem geometrisi halen endüstriyel proseslerde kullanılan bir geometri olup literatür çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.16 İki kavite sürekli üretime uygun radyo frekans ve hava üfleme slotlarıyla kombine edilmiş sistem tasarımı ve boyutları

Çözdürme prosesi sırasında sistem içerisinde kullanılan ürün hacmine bağlı olarak sistem içi hava sıcaklığının düşmesi sistem içerisinde özellikle de elektrot yüzeyinde kondensasyon (yoğuşma) problemi meydana getirmekte ve buna bağlı olarak proses veriminde düşmeler meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, şekillerde görüldüğü gibi RF kavite yan duvarlarına hava çıkış pencereleri yerleştirilmiştir. Soğuk havanın kavite dışarısına atılarak potansiyel elektrot üstünde yoğuşma probleminin önüne geçilmesi de potansiyel elektrotun sıcaklığı ile incelenmiştir.

Geliştirilen matematiksel modellerde yukarıda belirtilen başlangıç ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra gerekli çözümlemenin yapılabilmesi için ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluşturulurken özellikle ürüne yüksek yoğunlukta bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Doğal konveksiyonun uygulandığı ve hava üfleli sistemlerin olduğu modellerde kavitenin ağ yapısı hava akışını doğru çözebilmek adına sabit ısı transferi katsayısı koşulunda çalıştırılan modellere göre arttırılmıştır. Ürünün dielektrik ve termal özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden geliştirilen modellerde Δt maksimum 1 saniye olarak sınırlandırılmıştır. Sabit ısı transferi katsayısı modelleri 2 günlük bir zamanda tamamlanırken, doğal konveksiyon ve hava üfleli sistemler ortalama 1 aylık bir zamana ihtiyaç duymuştur. Model çalışmaları, Win10-Pro işletim sistemine sahip Intel(R) Xeon(R) CPU W-2123-3,60 GHz, 128 Gbyte Ram ile çalışan bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir.

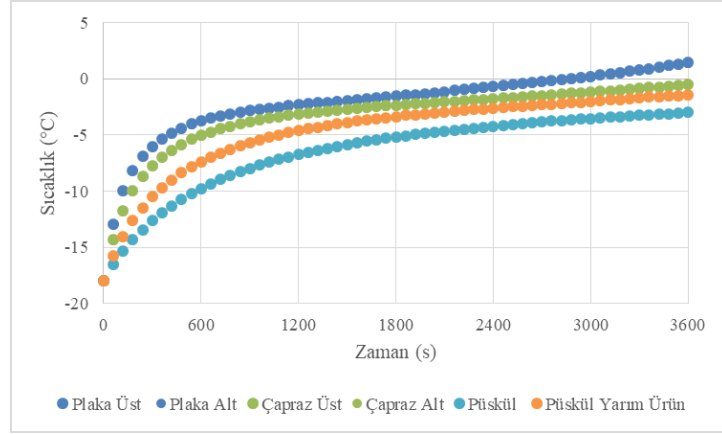
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Farklı Elektrot Geometrileri Temelinde Gerçekleştirilen Matematiksel Model Çalışmaları

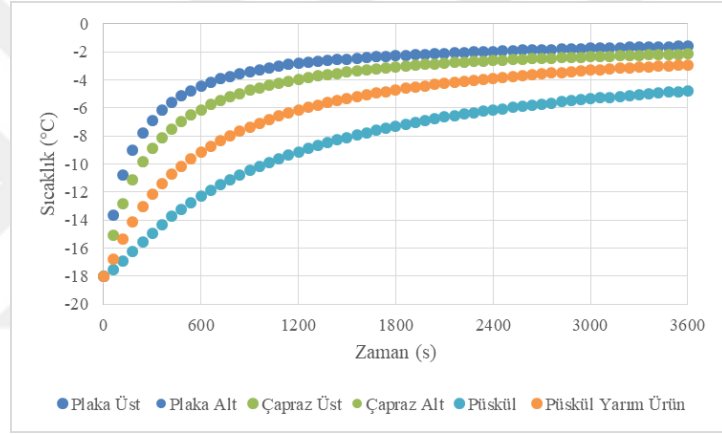
Radyo frekans (RF) prosesinde üretim kolaylığından kaynaklı olarak plakalı elektrot tipi tercih edilmekte olup bu sistemler endüstriyel uygulamalarda da çoğunlukla tercih edilmektedir. Elektrot tiplerinin RF prosesinde ürün sıcaklık dağılımına bir etkisi olup olmadığını incelemek adına bu tez kapsamında üç farklı elektrot tipinde, plaka, çapraz ve püskül, matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu modeller tezin diğer bölümlerinde açıklandığı üzere deneysel olarak doğrulanmış modellerin revize edilmesi ile kullanılmıştır. Matematiksel model çalışmalarında ürün başlangıç sıcaklığının sabit ve tekdüze olduğu varsayımı yapılarak $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ tanımlanmıştır. RF çözdürme prosesi modelleri 1000 V güç ve 3600 s proses süresi kullanılmış olup; ürünün üst ve alt elektrotlara eşit uzaklıkta (1 cm) olduğu varsayımı ile farklı sistemlerde (plaka, çapraz ve püskül elektrot sistemlerinde) hem üst hem de alt elektrotun potansiyel olduğu durum için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı, ortalama ve merkez nokta sıcaklığının değişimi elektrot tiplerine göre karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda kavite ve ürün içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı da incelenmiştir. Ürün ortalama sıcaklık değişim sonuçlarına göre plakalı elektrot geometrisinde ürünlerdeki sıcaklık artışının, çapraz ve püskül elektrot sistemlerin uygulamasına göre, daha etkin olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.1).

Şekil 4.2’de plakalı elektrot dizaynında potansiyel elektrotun üst ve altta konumlandırıldığı durumda ürün yüzey sıcaklık dağılımı, ürün içi polarizasyon ve elektrik alan dağılımı x-z düzleminde kavite merkezinden alınan kesitte gösterilmiştir. Ürün, üst ve alt elektrottan eşit uzaklıkta olduğundan ürün yüzey sıcaklık dağılımında potansiyel elektrotun konumunun kayda değer bir etkisi olmamıştır. İki durumda ürün sıcaklık tekdüzelik indeksi 0,091 olarak aynı bulunmuştur. Ürün içi polarizasyon x-z kesitinde incelendiğinde ürün kenarlarında bir yoğunluk olduğu gözlenmiştir.

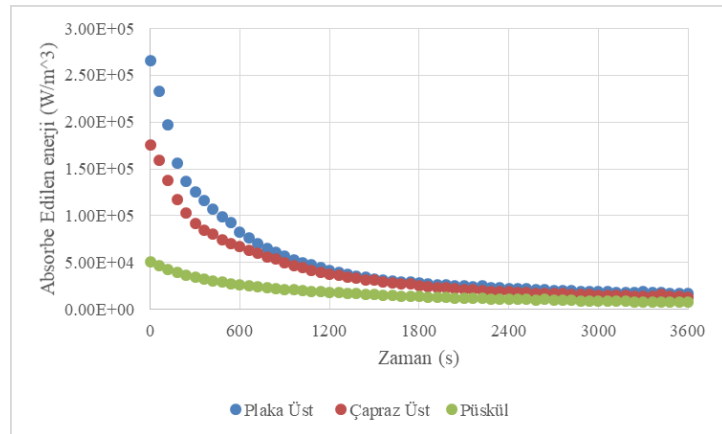
Ürün ortalama



Ürün merkez noktası



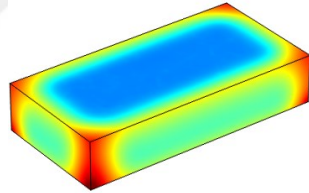
Ürün tarafından absorbe edilen enerji



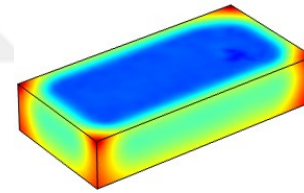
Şekil 4.1 Farklı elektrot tiplerinde gerçekleştirilen çözdürme prosesi sırasında ürünün ortalama sıcaklığı, merkez noktasının sıcaklığı ve ürün tarafından absorbe edilen enerjinin zamana bağlı değişimi

Üst elektrot potansiyel elektrot
Alt elektrot potansiyel elektrot

Ürün yüzey sıcaklık dağılımı

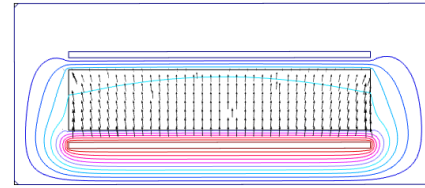
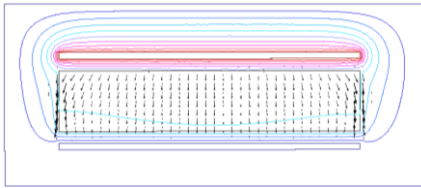


TUI: 0,091

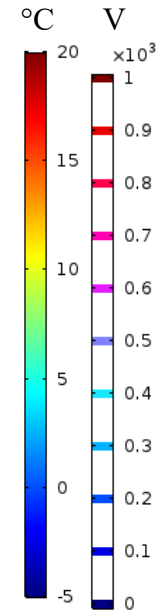
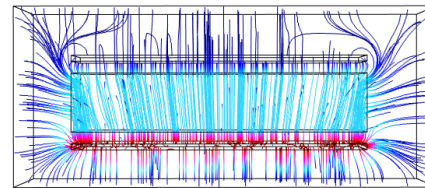
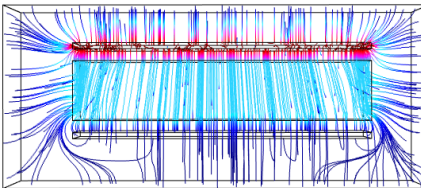


TUI: 0,090

Ürün içi polarizasyon ve elektrik alan

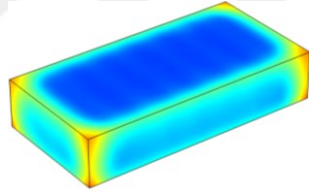


Ürün içi ve kavite elektrik alan



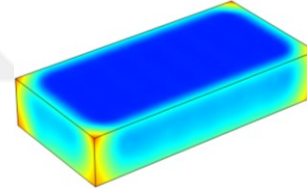
Şekil 4.2 Plakalı elektrot dizaynında üst ve alt elektrotun potansiyel elektrot olduğu iki durum için geliştirilen matematiksel modellerde ürünün yüzey sıcaklık, ürün içi polarizasyon (siyah oklar) ve elektrik alan dağılımı

Üst elektrot potansiyel elektrot
Ürün yüzey sıcaklık dağılımı



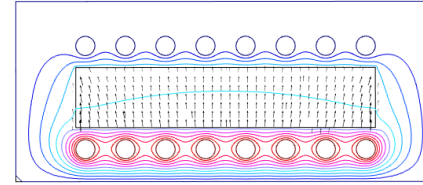
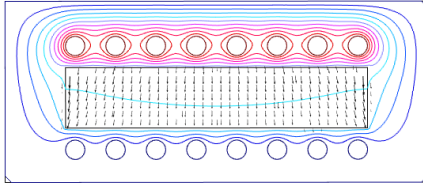
TUI: 0,072

Alt elektrot potansiyel elektrot

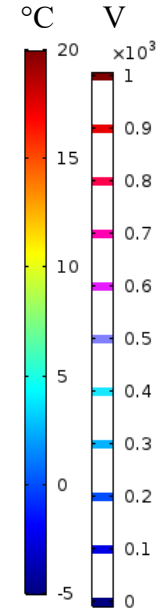
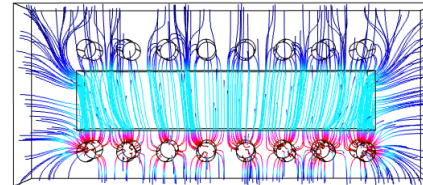
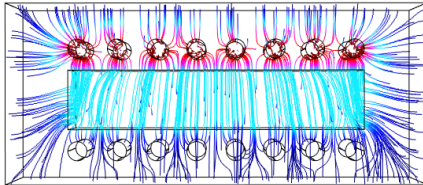


TUI: 0,072

Ürün içi polarizasyon ve elektrik alan

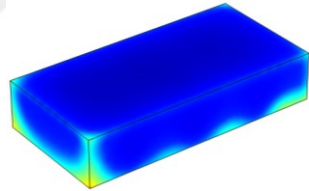


Ürün içi ve kavite elektrik alan



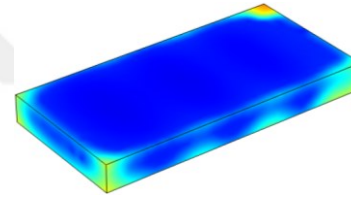
Şekil 4.3 Çapraz elektrot dizaynında üst ve alt elektrotun potansiyel elektrot olduğu iki durum için geliştirilen matematiksel modellerde ürünün yüzey sıcaklık, ürün içi polarizasyon (siyah oklar) ve elektrik alan dağılımı

Püskül tam ürün
Ürün yüzey sıcaklık dağılımı



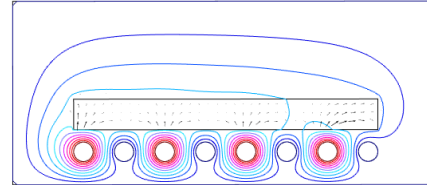
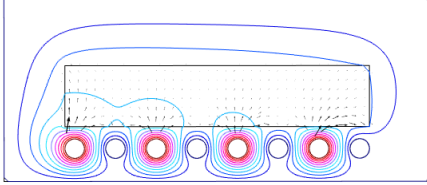
TUI: 0,16

Püskül yarım ürün

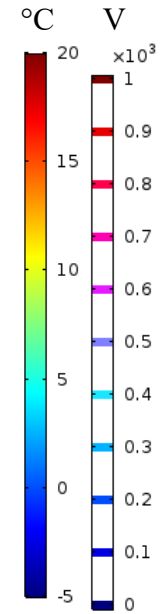
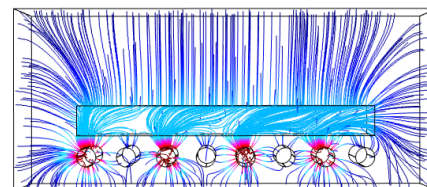
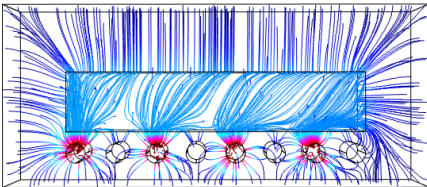


TUI: 0,11

Ürün içi polarizasyon ve elektrik alan



Ürün içi ve kavite elektrik alan



Şekil 4.4 Püskül elektrot dizaynında ürün kalınlığının tam ve yarım olduğu iki durum için geliştirilen matematiksel modellerde ürünün yüzey sıcaklık, ürün içi polarizasyon (siyah oklar) ve elektrik alan dağılımı

Elektromanyetik alan ürün kenar ve köşelerinde kırılıma uğradığından elektromanyetik enerji yoğunluğu oluşmuş ve bu bölgelerde sıcaklık artışının daha hızlı olduğu tespit edilmiştir (Marra vd. 2007). Bu sebeple üründe köşe ve kenar bölgelerde daha hızlı bir şekilde sıcaklık yükselmesi gözlenmiştir. Bu problem nedeniyle RF prosesinde üründe tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilememiş olup bu kapsamda bu tip konfigürasyonların endüstriyel uygulamalarının kısıtlı olduğu düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda bu sorunu çözmek adına ürünün yerleştirildiği kabın şekli ve dielektrik özellikleri farklı materyaller kullanılarak ürün sıcaklık dağılımında iyileşmeler elde edilmiştir. Polipropilen ve strafor materyallerinin dielektrik kayıp faktörünün sırasıyla 0,0003 ve 0,0023 olduğu bilgisi Huang vd. (2016) tarafından paylaşılmıştır. Kayıp faktörü değerinin çok düşük olmasından dolayı RF uygulaması sırasında herhangi bir sıcaklık artışı olmamıştır. Aynı çalışmada soya fasulyesi 2-12 cm kalınlığında değişen strafor kaplarda elektrotlar arası uzaklığın 12 cm olduğu durumda RF ısıtma uygulanmıştır. Kap kalınlığı her 2 cm arttırılarak üst orta ve alt yüzeydeki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en ideal kalınlığın 8 cm olduğu sonucuna varılmıştır. Kap kalınlığını daha fazla arttırılması sıcaklık üzerine ciddi bir etki yapmadığı sonucuna varılmıştır. Kap kalınlığı arttırılarak ürün köşe sıcaklığı 75 °C'den 60 °C'ye düşürülmüştür. Polipropilen kata ise hem kap kalınlığı hem de kap köşe kenarlarının yarıçap eğriliği 0-10 cm arasında değiştirilerek sıcaklık üzerine etkisi incelenmiştir. Yarıçap eğriliğinin 8 cm olduğu durumda köşe sıcaklığında önemli düşüşler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kap kalınlığının RF uygulamasında önemli bir yeri olduğu sonucuna varılmıştır.

Çapraz elektrot dizaynına sahip matematiksel modellere ait ürün yüzey sıcaklık dağılımı, ürün içi polarizasyon ve elektrik alan dağılımı şekil 4.3'de gösterilmiştir. Plakalı elektrotta göre en dikkat çeken sonuç ürün yüzey sıcaklık dağılımında köşe ve kenarlarında daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. Uyar vd. (2016) yaptıkları çalışmada plakalı elektrotta ürün hacmi sabit tutularak ürünün izdüşüm alanı arttırılarak sıcaklık artışına etkisi incelenmiştir. Ürünün elektrot üzerindeki izdüşüm alanı ürün yüksekliği değiştirildikçe ürünün en ve boy uzunlukları ürün hacmi sabit kalacak şekilde ayarlanmıştır. İzdüşüm alanı arttıkça ürün ısınma hızında artış tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bilgi doğrultusunda potansiyel elektrotun ürün görüş açısı olarak bu çalışma için yorumlanırsa

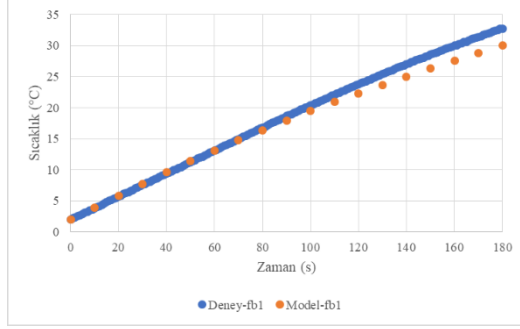
plakalı elektrot dizaynında en yüksek görüş açısı elde edilmiştir. Şekil 4.1’de paylaşılan ürünün absorbe ettiği enerji-zaman grafiği sonuçları bu teoriyi destekler nitelikte olup çapraz ve püskül konfigürasyonlarda plakalı sisteme göre ürün daha düşük elektrik alan yoğunluğu ile etkileşime geçtiği için daha az enerji absorbe etmiştir. Üçüncü elektrot tipi olan püskül elektrot dizaynında tam ürün ve yarım ürün (yüksekliğin yarısı) koşulunda modeller yapılmıştır. Püskül elektrot dizaynında tek sıra elektrotlar bulunduğu ve sırasıyla potansiyel ve toprak olarak belirlendiğinden elektromanyetik enerji ürünün üst tarafına penetre olmakta zorlanmıştır (Şekil 4.4). Ürün sıcaklık dağılımında da tam ürün kalınlığında ürün üst yüzeyinde sıcaklık artışı minimum derece gerçekleşmiştir. Sıcaklık tekdüzelik indeksinin de ince üründe daha düşük yani daha iyi olduğu bulunmuştur. Ancak ürün ince olsa bile elektromanyetik enerji ürünün her tarafına penetre olamamıştır. Püskül elektrot dizaynının kesikli sistemlerden ziyade bantlı sistemlerde ve ince ürünlerde etkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Püskül elektrotun bu dezavantajları ya da gıda prosesinde uygulaması zor olduğundan literatürde araştırması konusu olarak tercih edilmemiştir. Üç farklı elektrot dizaynı olarak geliştirilen matematiksel model sonuçlarına göre elektrot dizaynı ürün sıcaklık dağılımında etkili olmuştur. Ürün elektrotlardan eşit uzaklığa yerleştirildiğinde ve aynı potansiyel güç uygulandığında potansiyel elektrotun konumunun ürün sıcaklık dağılımına bir etkisi olmamıştır. Matematiksel model ortamında ürün ve kavite içerisindeki elektrik alan dağılımı incelenmiş ve ürün köşe ve kenarlarında elektromanyetik alan kırılmaları gösterilmiştir. Literatürde de bahsedilen bu yaklaşımlar ürün içi polarizasyon değerleri ile tezin bu bölümünde pekiştirilmiştir.

4.2 Üç Farklı Radyo Frekans Sisteminde Gerçekleştirilen Deneysel ve Matematiksel Model Çalışmaları

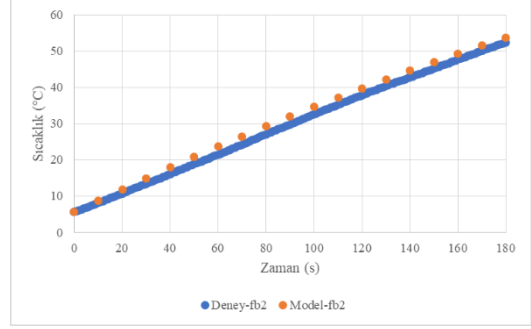
Bir önceki bölümde RF sistemlerde kullanılan farklı elektrot konfigürasyonlarının çözdürme prosesi sırasındaki önemi ve farklılıkları gösterilmiştir. Bu bölümde ise (Şekil 3.3’de gösterilen) üç farklı RF sistemde tylose ısıtma işlem deneyleri ve geliştirilen matematiksel modeller ile RF uygulama sırasında elektrotlar arası yüksekliğin, elektrot konfigürasyonunun ve potansiyel elektrotun konumunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi

incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasıyla RF sistem 1 (Gaziantep Üniversitesi), RF sistem 2 (Georgia Üniversitesi), RF sistem 3 (Ankara Üniversitesi) gerçekleştirilmiştir.

Elektrotlar arası 6 cm-8500 V

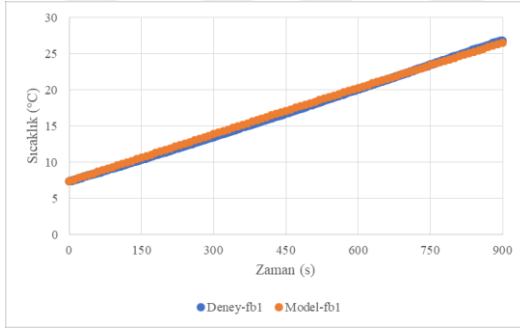


RMSE:1,4 °C

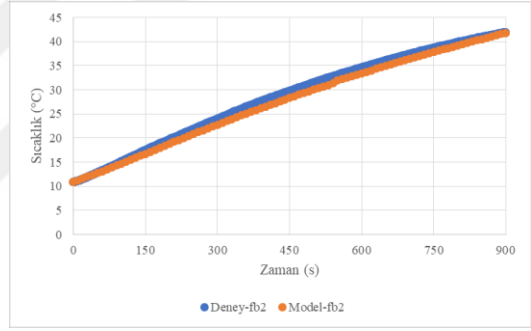


RMSE:1,76 °C

Elektrotlar arası 10 cm-5500 V

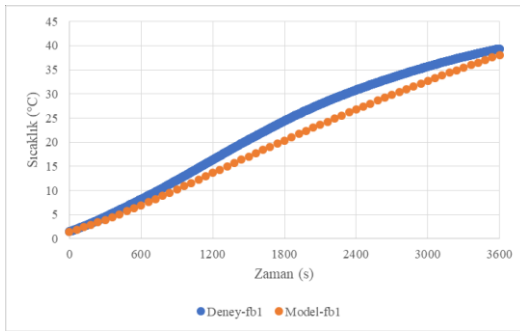


RMSE:0,26 °C

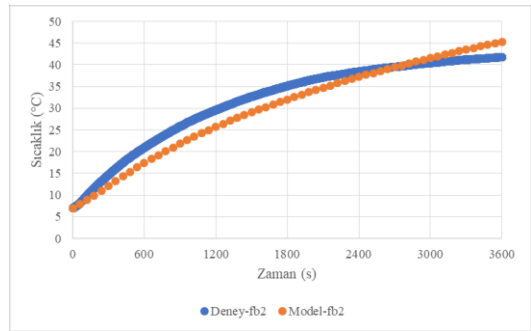


RMSE:1,03 °C

Elektrotlar arası 14 cm-4750 V



RMSE:2,92 °C



RMSE:2,27 °C

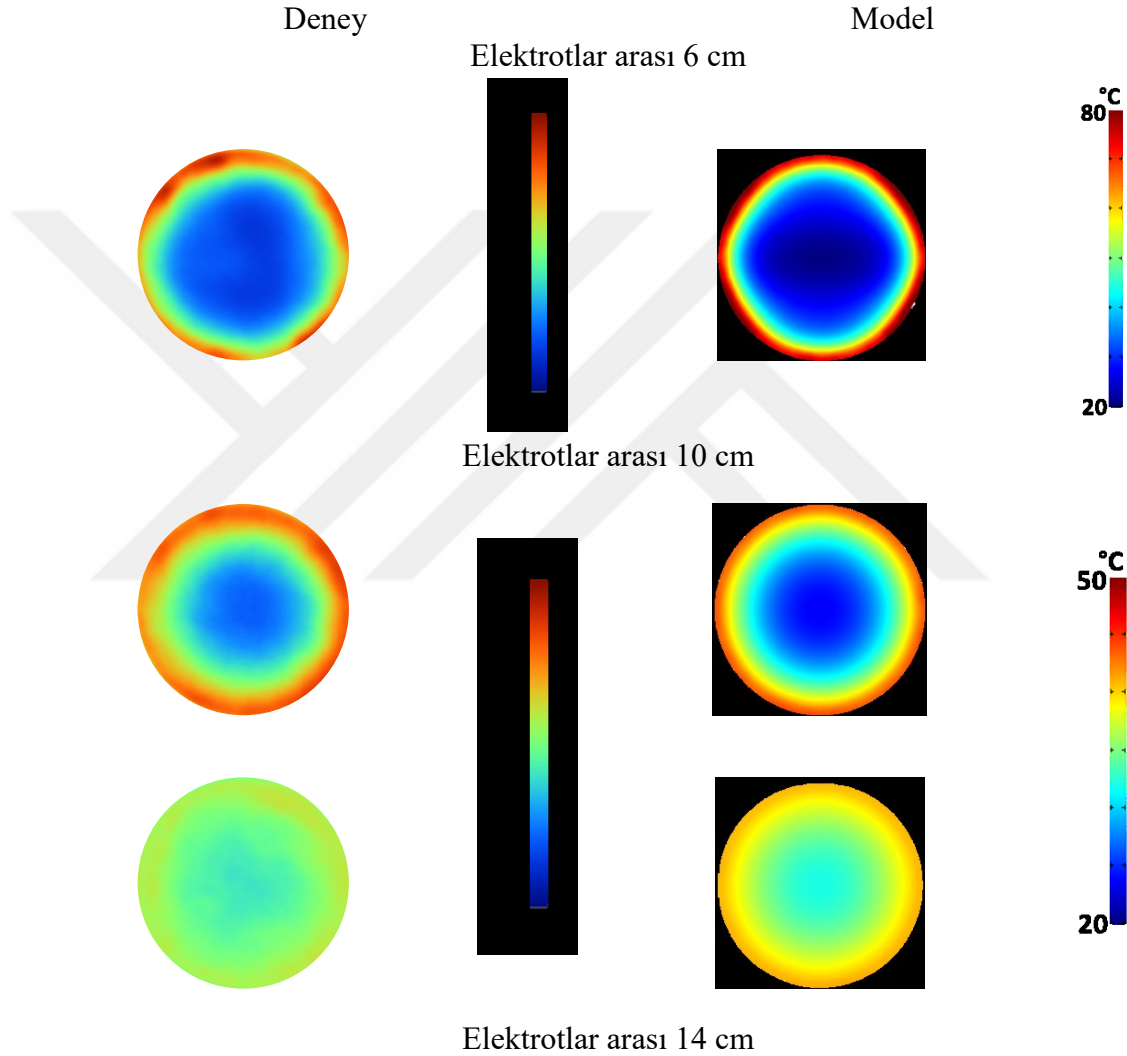
Şekil 4.5 RF sistem 1’de gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model sonuçlarının elektrotlar arası mesafenin 6, 10 ve 14 cm olduğu durumda karşılaştırılması

4.2.1 Tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model çalışmaları

RF sistem 1, çapraz elektrot tipinde olup üst elektrotta potansiyel güç uygulanmaktadır. Bu sistemde elektrotlar arası uzaklık 5-15 cm aralığında ayarlanabildiğinden ısıtma işlemi çalışmaları için 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafeler seçilmiştir. Deneyler sırasında ürün iç sıcaklığını takip edebilmek için iki adet fiber optik kullanılmıştır (Şekil 3.4). Bu sistemde üst elektrot ne kadar çapraz elektrot düzeninde, silindirik geometrilili çubuklar kullanılarak, üretilmişse de elektrotun orta bölümünde elektrik bağlantısı için plaka kısmı bulunmaktadır. Elektrotlar arası mesafe azaldığında fiber optik sensörlerin kırılması ve yerleştirilememesi durumuna karşı tylose örneği kavitenin sol yarısının merkezinde konumlandırılarak deneyler yapılmıştır. Şekil 4.5’ te üç farklı elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık sonuçları ve geliştirilen matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Elektrotlar arası mesafe 6 cm olduğu durumda iki numaralı fiber optik sensör 180 saniye proses süresinde 50 °C’ye ulaşmıştır. Fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık sonuçları ile matematiksel model çalışmasından, deneme yanılma yoluyla elektrotlar arası kullanılan potansiyel fark, elde edilen sıcaklık değişim değerleri karşılaştırıldığında 8500 V güç uygulaması durumunda RMSE değerleri iki fiber optik sensör için sırasıyla 1,4 ve 1,76 °C olarak hesaplanmış ve sonuçların birbirine yakın olduğu gösterilmiştir. Elektrotlar arası mesafe 10 cm’e artırıldığında 900 s’lik proses sonunda iki numaralı fiber optik 40 °C’lere ulaşmıştır. Modelde ise 5500 V değerinde güç uygulandığında RMSE değerleri iki fiber optik için sırasıyla 0,26 ve 1,03 °C gibi düşük değerler elde edilerek model sonuçlarının deneysel veri ile benzerlik gösterdiği bulunmuştur. En uzun tylose ısıtma proses süresi ise deneyler için seçilen en uzak elektrotlar arası mesafede olmuştur. Geliştirilen modelde potansiyel elektrotta 4750 V uygulandığında iki fiber optik sensör için sırasıyla RMSE değeri 2,92 ve 2,27 °C ile model sonuçları ile deneysel veriler benzerlik göstermiştir. Deneysel sonuçlara göre elektrotlar arası mesafe arttıkça uygulanan voltaj değeri azalmakta ve proses süresi artmaktadır.

Qu vd. (2020) RF sistemde uygulanan voltaj değerini elektrotlar arası mesafeye bağlı olarak belirlemek amacı ile beş farklı elektrotlar arası mesafede dört farklı nem içeriğinde

soya fasulyesi ve soya fasulyesi ununa ısıtma prosesi uygulanmıştır. Bu çalışmada serbest salınım prensibi ile çalışan plakalı elektrot dizaynına sahip üst elektrotun potansiyel elektrot olduğu bir RF sistem kullanılmıştır. Proses sırasında anot akımının ölçülmesi ve hesaplanan akım değerleri kullanılarak uygulanan voltaj değerinin hesaplanması için bir denklem elde edilmiştir. Elektrotlar arası mesafe azaldıkça uygulanan güç değerinin arttığı bu çalışmada da belirtilmiştir.



Şekil 4.6 RF sistem 1’de elektrotlar arası mesafenin 6, 10 ve 14 cm olduğu durumda gerçekleştirilen deney ve matematiksel modellerde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması

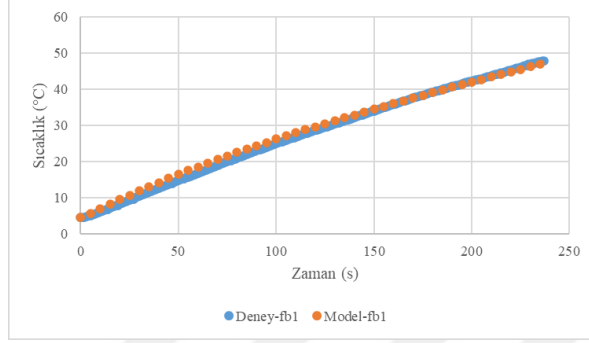
RF sistem 1’de çapraz elektrot konfigürasyonu kullanılmış olsa da bu sistemin elektrotlar arası mesafe ile uygulana güç değeri arasındaki ilişki bakımından plakalı elektrot

sistemleri gibi davrandığı belirlenmiştir. Şekil 4.6’da tylose ısıtma sonunda ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı incelendiğinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı elektrotlar arası mesafenin en uzak olduğu durumda elde edildiği gözlenmiştir. Elektrotlar birbirine yaklaştırıldığında şekil 4.5’de proses süresinde kısalma gözlenirse de ürün kenarlarında yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Elektrotlar arası mesafe ve elektrot konfigürasyonunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi daha detaylı olarak diğer iki RF sistemde gerçekleştirilen tylose ısıtma sonuçları paylaşıldıktan sonra yapılmıştır. Matematiksel model çalışmasından elde edilen sonuçlara göre ürün üst yüzey sıcaklık dağılımında sıcak ve soğuk bölgelerin deneysel sonuçlarla benzerlik gösterdiği ve genel dağılımın her bir elektrot mesafesinde benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Bu bağlamda geliştirilen matematiksel modeller deneysel veriler ile hem fiber optik sensör hem de proses sonundaki ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı verileri ile doğrulanmıştır. Elektrotlar arası mesafe 14 cm olduğu durumda ürün sıcaklık dağılımı diğer koşullara göre daha tekdüze bir yapı olduğundan proses süresi uzun olsa da dondurulmuş tavuk göğsü çözdürme proseslerinin 14 cm’de yapılmasına karar verilmiştir.

Gıda endüstrisinde plaka tipi elektrot konfigürasyonu gıda endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak hem deneysel hem de matematiksel model çalışmaları için Georgia Üniversitesi (UGA) kurumunda bulunan plakalı elektrot düzeneğine sahip RF sistem 2 tercih edilmiştir. Potansiyel gücün üst elektrota uygulandığı ve 6 kW güce sahip 27,12 MHz frekansta çalışan RF sistemde 2’de elektrotlar arası mesafe 5-20 cm aralığında ayarlanabilmektedir. Sistemler arasında karşılaştırılmanın yapılabilmesi için RF sistem 1’de seçilen 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafede deneylerin yapılması planlanmıştır. Ancak RF sistem 1’de farklı güç ayarlaması mevcutken RF sistem 2’de böyle bir ayar bulunmadığından tam güçle çalıştığı düşünülmüştür. Bu durumda elektrotlar arası mesafenin 6 cm olduğu durumda deney başladığı an RF sistem 2, yüksek elektrotlar arası potansiyel fark değeri ile ilişkili olarak olası bir elektrik boşalmasını önlemek amacıyla, güvenlik açısından kendini kapatmıştır. Potansiyel elektrotun alanına göre tylose örneğinin alanı çok düşük olduğundan elektriksel boşalma yaşanması da bu koşullarda gözlenmiştir. Bu nedenle tylose ısıtma deneylerinde en düşük elektrotlar arası mesafe için yapılan ön denemeler sonucunda 8 cm kullanılmasına karar verilmiştir. RF sistemde üst elektrot plakalı olduğundan elektrot

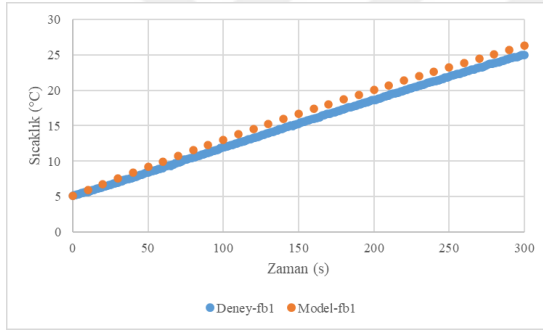
yüksekliği 8 cm olduğu durumda fiber optik sensörlerin kırılma riskinden kaynaklı olarak tek fiber optik sensör elektrot yüzeyinde bulunan küçük delikten geçirilerek ürün merkezine yerleştirilmiştir.

Elektrotlar arası 8 cm-14000 V

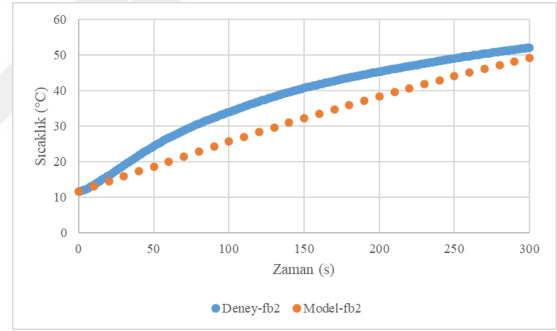


RMSE:1,08 °C

Elektrotlar arası 10 cm-10500 V

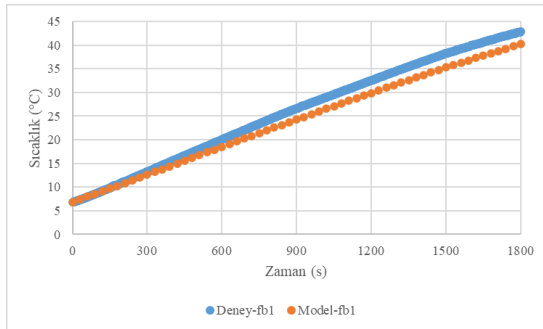


RMSE:1,17 °C

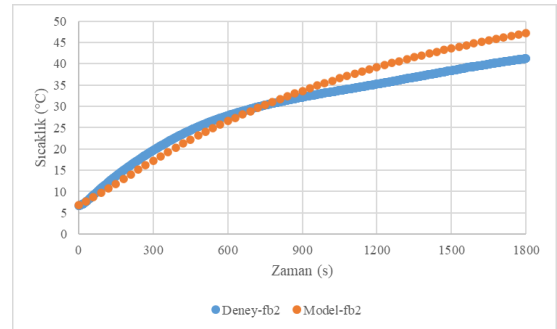


RMSE:6,39 °C

Elektrotlar arası 14 cm-7500 V

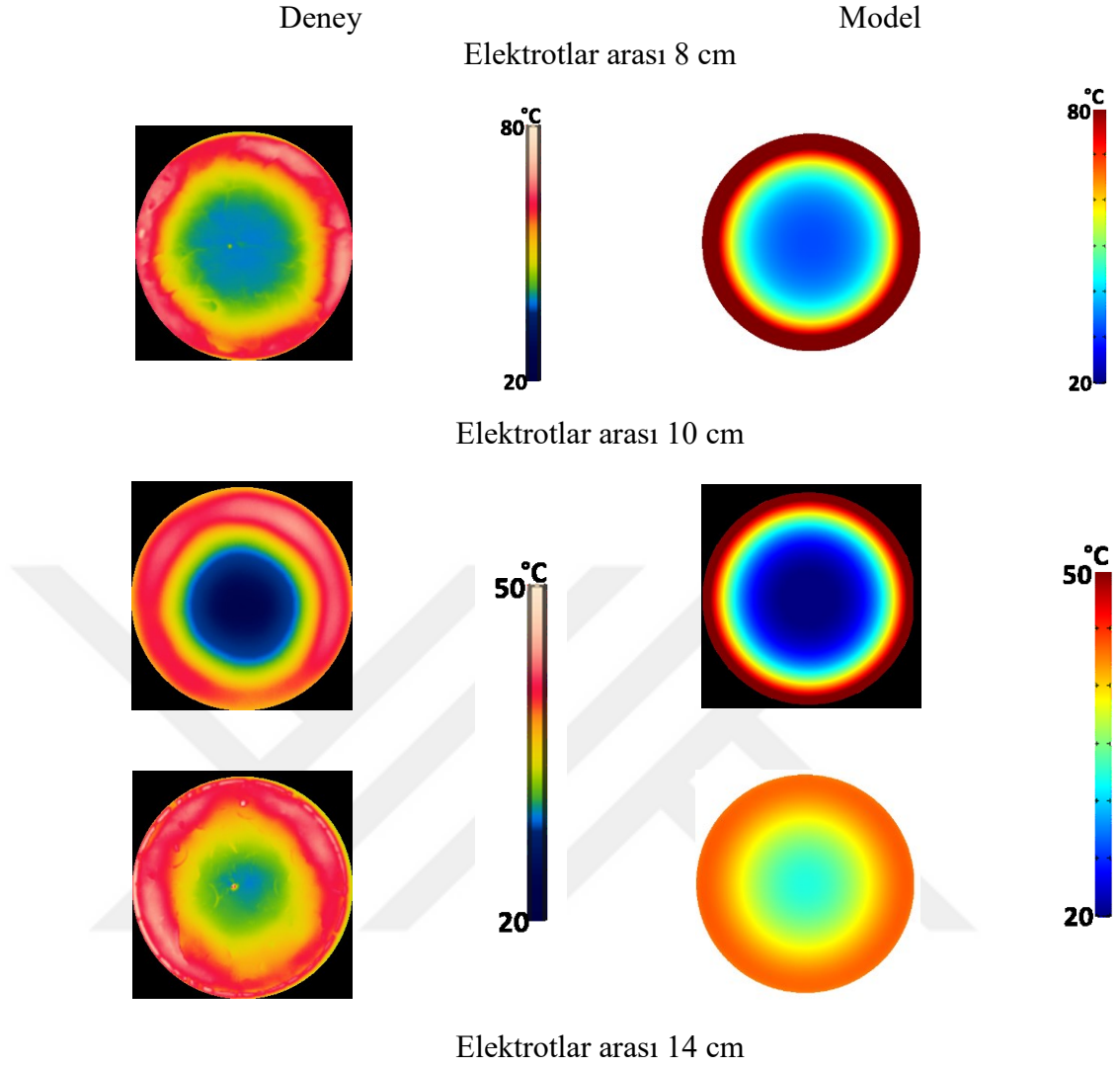


RMSE:2,13 °C



RMSE:3,41 °C

Şekil 4.7 RF sistem 2’de gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model sonuçlarının elektrotlar arası mesafenin 8, 10 ve 14 cm olduğu durumda karşılaştırılması



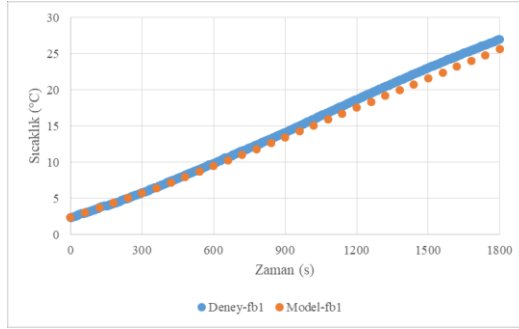
Şekil 4.8 RF sistem 2’de 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilen deney ve matematiksel modellerde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması

Ürün merkez sıcaklığı 235 s’de yaklaşık 50 °C’lere ulaşmıştır (Şekil 4.7). Geliştirilen matematiksel model uygulamasında ise 14000 V elektrik potansiyel değeri uygulandığında deneyden elde edilen sonuca benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki RMSE değeri 1,08 olarak belirlenmiştir. Elektrotlar arası mesafe 10 cm’e arttırıldığında iki numaralı fiber optik sensör 300 s’de 50 °C’lere ulaşmıştır (Şekil 4.7). İki fiber optik sensör arasında yaklaşık iki kat sıcaklık farkı bulunsa da iki fiber optik için RMSE değerleri sırasıyla 1,17 ve 6,39 °C olarak tespit edilmiştir. Elektrotlar arası mesafe arttırıldığında, uygulanan elektrik potansiyeli (14 cm – 7500 V) ve fiber optik sensörler arasındaki sıcaklık farkı da

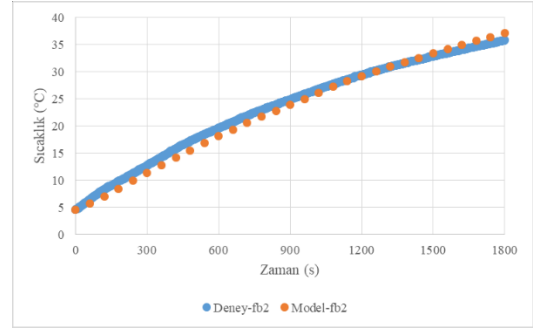
azalmaktadır. Yaklaşık yarım saatlik bir sürede iki fiber optik sensöründe 40 °C'yi aştığı gözlenmektedir. Proses tamamlandığında ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı termal kamera ile belirlenmiştir (Şekil 4.8). Elektrotlar arası mesafe azaldığında üründe daha yüksek sıcaklıklar elde edilmesine rağmen tekdüze bir sıcaklık dağılımı elektrotlar arası mesafe 14 cm olduğu koşulda gözlenmiştir. Geliştirilen matematiksel modellerden elde edilen sonuçlar deneysel sırasında alınan iki fiber optik sensör için RMSE değerleri karşılaştırıldığında sırasıyla 2,13 ve 3,41 °C ile paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak ürün yüzey sıcaklık değişimleri ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması da elde edilen düşük RMSE değerlerini desteklemiştir (Şekil 4.7).

Tylose ısıtma deneyleri RF sistem 3'de 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Bu RF sistemde hem üst hem de alt elektrotlar çapraz elektrot tipinde olup alt elektrot potansiyel elektrot olarak kullanılmaktadır. Deneyler sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sonuçlar ve modeller ile karşılaştırılması Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Yarım saatlik bir proses süresinde elektrotlar arası mesafenin 6 cm olduğu koşulda iki numaralı fiber optik sensörün 35 °C'ye ulaştığı gözlenmiştir. Elektrotlar arası mesafenin en uzak olduğu 14 cm durumunda ise 3300 s sonunda iki fiber optik sensör en az 40 °C'ye ulaşmıştır. Alt elektrota uygulanan güç değerleri elektrotlara arası mesafe arttıkça sırasıyla 2300, 4000 ve 5000 V olarak matematiksel model sonuçlarına göre tespit edilmiş olup deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması sonucu elde edilen RMSE değerleri de Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.10'da ise proses sonunda elde edilen ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının model sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu sistemde farklı elektrotlar arası mesafe koşullarında elde edilen elektrik potansiyel değerleri yukarıda açıklanan (ve elektrik potansiyel uygulanan elektrotun üst elektrot olduğu) iki RF sisteme göre daha düşük bulunduğundan ürün üst yüzey sıcaklık dağılımında çok yüksek sıcaklıklar elde edilememiştir. Bu bağlamda konveksiyonla ürün yüzeyinde gerçekleşen soğuma da yüzey sıcaklığının artmasını engelleyecek şekilde etki etmiştir. Bu bağlamda elektrotlar arası mesafe 6 cm olduğu durumda ürün üst yüzey merkez bölgesinde sıcaklık artışı olmaması da dikkat çekmektedir. Elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda ise ürün kenar noktalarının 10 cm olan koşula göre daha az ısınarak ürünün daha tekdüze bir sıcaklık dağılımı göstermiştir (Şekil 4.10).

Elektrotlar arası 6 cm-2300 V

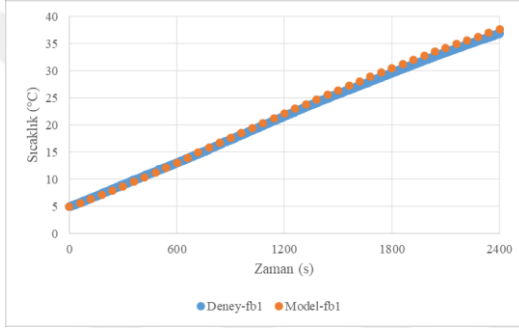


RMSE:0,91 °C

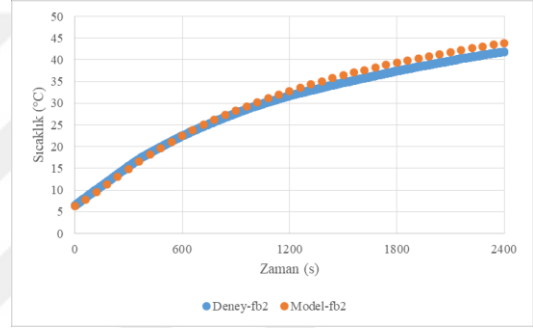


RMSE:1,1 °C

Elektrotlar arası 10 cm-4000 V

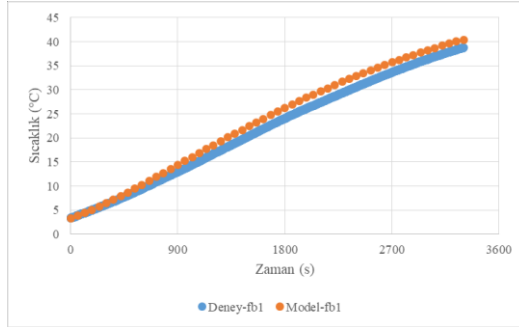


RMSE:0,59 °C

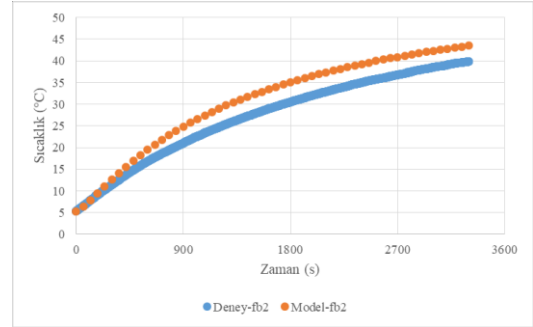


RMSE:1,37 °C

Elektrotlar arası 14 cm-5000V



RMSE:1,77 °C

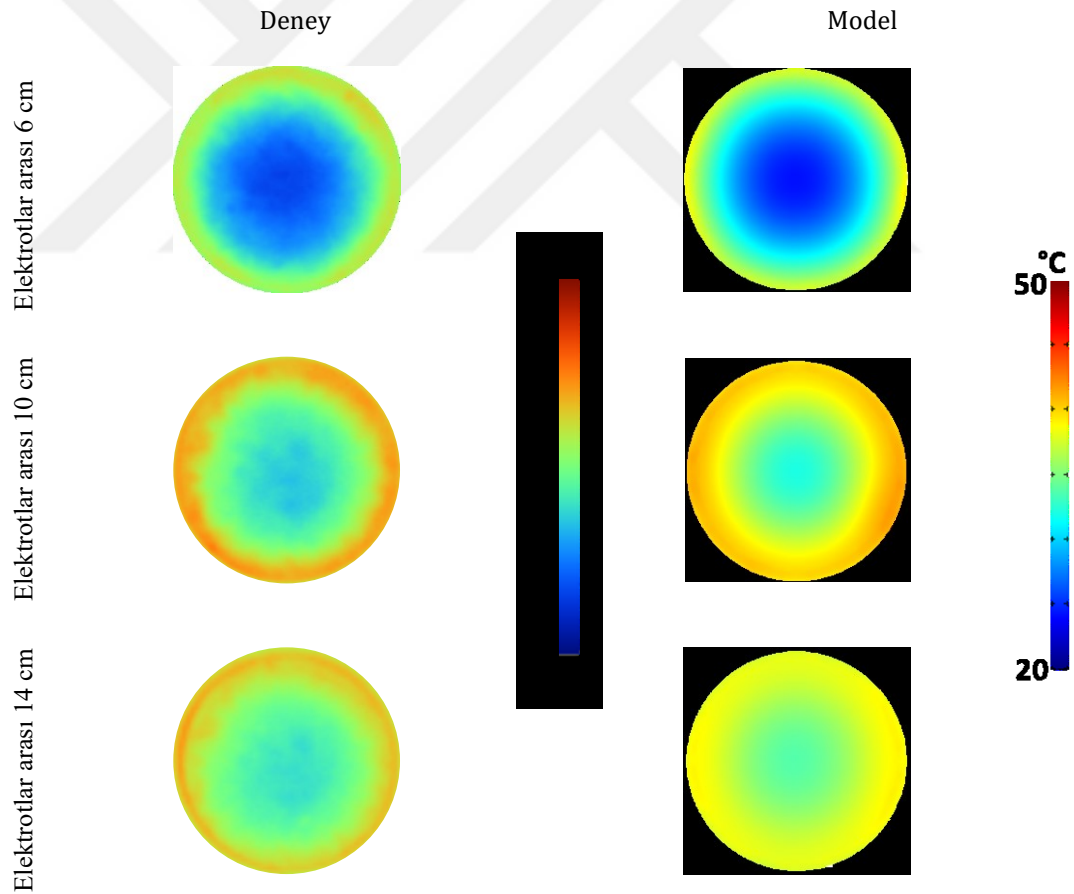


RMSE:3,77 °C

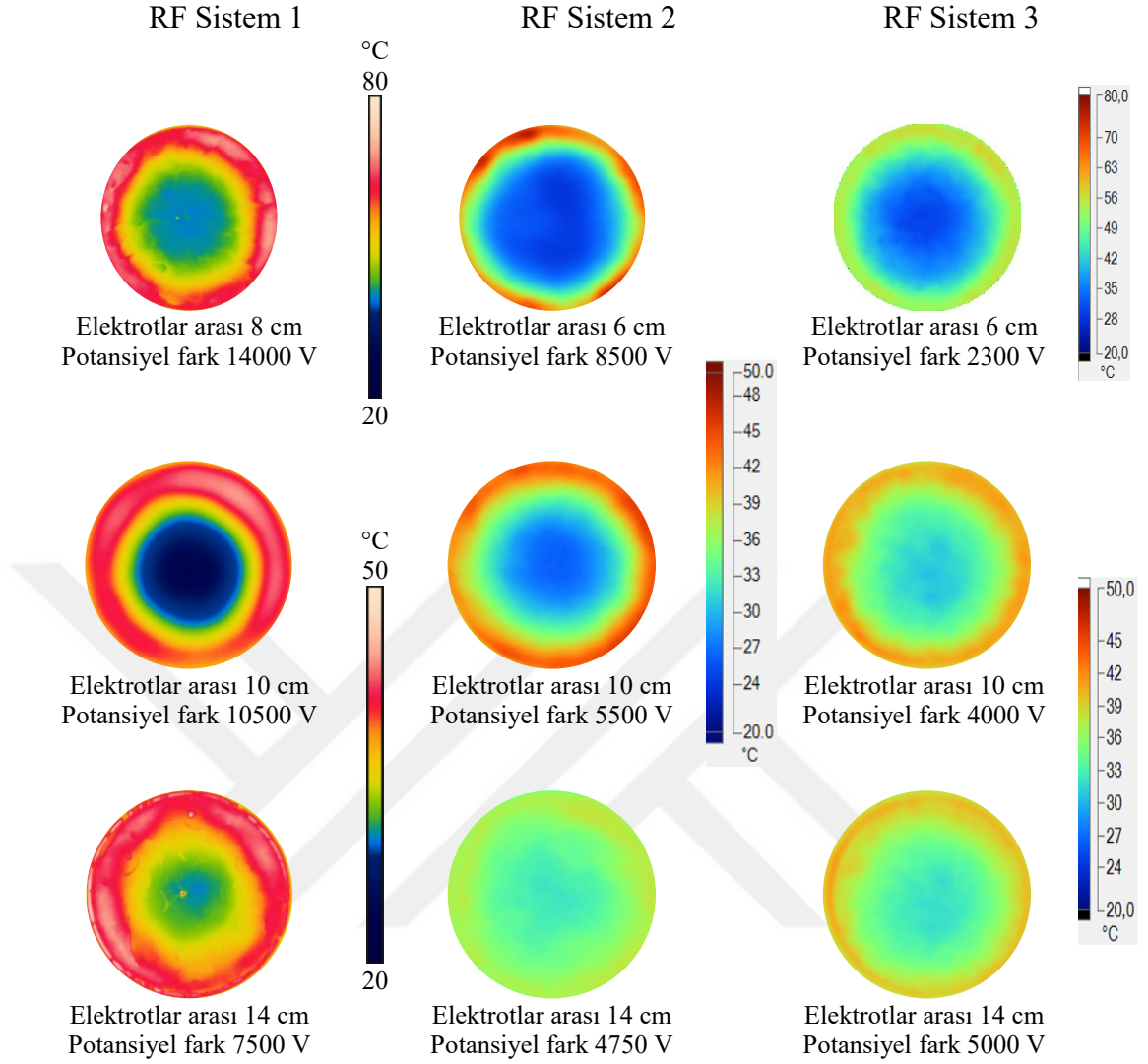
Şekil 4.9 RF sistem 3’de gerçekleştirilen tylose ısıtma deneyleri ve matematiksel model sonuçlarının elektrotlar arası mesafenin 6, 10 ve 14 cm olduğu durumda karşılaştırılması

İki farklı çapraz elektrot sisteminde potansiyel elektrotun konumunun farklı olması ve çapraz ile plakalı elektrot uygulama sırasında meydana gelen ürün sıcaklık dağılımının karşılaştırılması ise şekil 4.11’de gösterilmiştir. Uygulanan güç değeri arttıkça proses

süresinin kısılacağı beklenen bir sonuç olacağından elde edilen sonuçlar proses süresi ve tekdüzelik anlamında karşılaştırılmıştır. Elektrotlar arası mesafe arttığında ürün yüzey sıcaklık dağılımı tekdüzelik göstermektedir. Ancak elektrotlar arası mesafe arttıkça RF sistem 1 ve 2’de uygulanan voltaj değerinin azaldığı matematiksel modeller ile tespit edilmiş olsa da RF sistem 3’de potansiyel elektrotun konumunun farklılığından elektrotlar arası potansiyel fark değeri artmaktadır. Elektrotlar arası potansiyel fark değeri diğer iki RF sisteme göre farklı bir trend içinde olsa da ürün sıcaklık dağılımı elektrotlar arası mesafe ile aynı trendi göstermektedir. Bu durum RF prosesini etkileyen parametrelerin elektrotlar arası mesafe, elektrik potansiyel uygulanan elektrotun konumu ve bu bağlamda elde edilen elektrik potansiyel değeri olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak sistem içerisinde bulunan ürün miktarı da ayrı bir etken olup, bu durumun önemi plakalı sistemlerde Uyar vd. (2014) tarafından detaylı olarak açıklanmıştır.



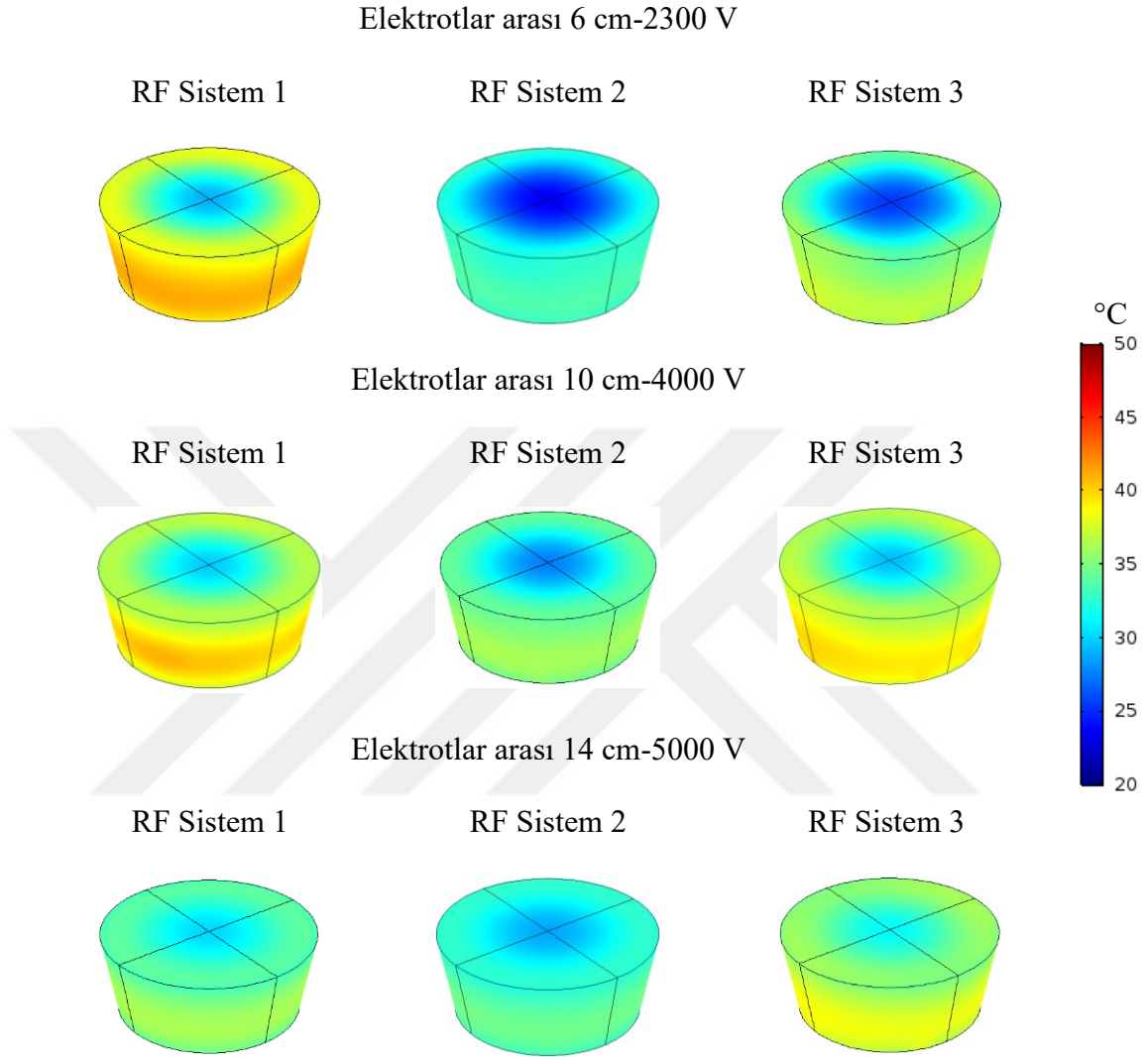
Şekil 4.10 RF sistem 3’de 6, 10 ve 14 cm elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilen deney ve matematiksel modellerde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması



Şekil 4.11 Deneyler sonunda belirlenen ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının üç farklı radyo frekans sistemde karşılaştırılması (Şekil 4.6, 4.8 ve 4.10'daki deneysel veriler kullanılmıştır)

Elektrotlar arası mesafe ile potansiyel fark ve proses süresi ile alakalı benzer sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarda da görülmüştür. Örneğin Ozturk et al. (2017) mısır unu prosesinde 11, 13 ve 15 cm elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilip ürün başlangıç sıcaklığı 23 °C'e olup 80 °C'ye kadar proses edilmiştir. Proses süresi elektrotlar arası mesafe arttıkça sırasıyla 4, 9 ve 13 dakikada şeklinde artmıştır. Tian vd. (2023) kıyılmış tavuk göğsü örneklerini küçük, orta ve büyük olarak adlandırdıkları boyutlarda 80, 90 ve 100 mm elektrotlar arası mesafede RF uygulamasında temperleme prosesi uygulamışlardır. Elektrotlar arası mesafenin etkisi orta boyuttaki örnekte yürütülerek en kısa proses süresi 80 mm elektrotlar arası mesafede elde edilirken 10 dakikalık proses

süresi ile en uzun RF temperleme uygulaması 100 mm elektrotlar arası mesafede elde edilmiştir. İki santimlik elektrot mesafesinin proses süresine iki katlık bir etkisi olmuştur.



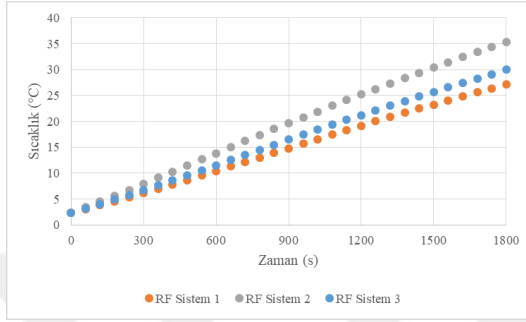
Şekil 4.12 Üç radyo frekans sisteminde eşit potansiyel güç uygulandığı zaman tylose ısıtma prosesinde yüzey sıcaklık dağılımı

Elektrik potansiyelinin uygulandığı elektrotun konumunun değiştiği durumlarda, üst elektrot potansiyel işlevi gördüğüne ürün ile belli bir uzaklığı bulunmaktayken alt elektrota potansiyel güç uygulandığında ürün direk olarak elektrotun üzerinde durmaktadır. İki koşul arasındaki ürün-potansiyel elektrot arasındaki mesafe farklılığından RF sistem 3’de elektrotlar arası potansiyel fark değerinin elektrotlar arası mesafe arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır. Üç RF sistemden elde edilen tylose ısıtma

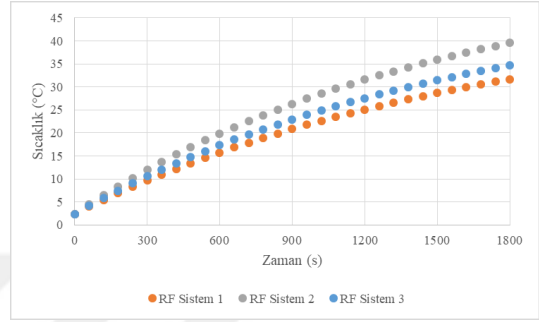
deney sonuçlarına göre tekdüze bir sıcaklık dağılımı elektrotlar arası mesafe 14 cm olduğu durumda elde edilmiştir.

Elektrotlar arası 6 cm

Ürün hacimsel

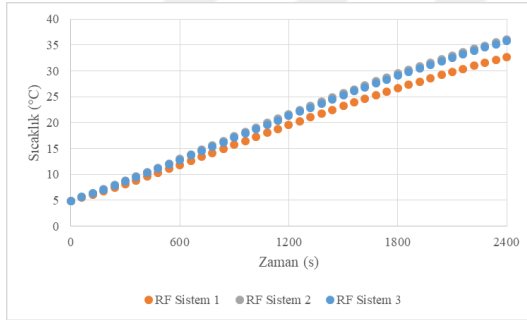


Ürün merkez

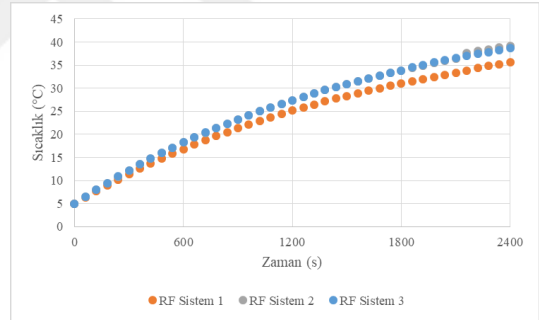


Elektrotlar arası 10 cm

Ürün hacimsel

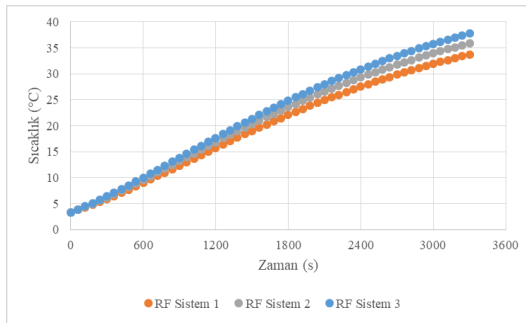


Ürün merkez

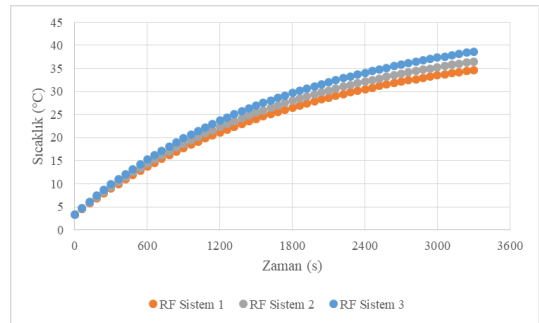


Elektrotlar arası 14 cm

Ürün hacimsel



Ürün merkez



Şekil 4.13 Üç radyo frekans sisteminde eşit potansiyel güç uygulandığında ürün hacimsel sıcaklık ve merkez noktası sıcaklığının proses süresi ile değişimi

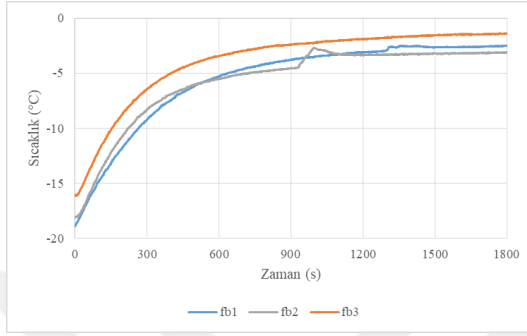
Teknik olarak deneyler sırasında RF sistemler serbest salınım prensibi ile çalıştığından elektrotlar arası potansiyel fark değerini ayarlama imkânı olmasa da matematiksel model üzerinden aynı potansiyel fark uygulandığında elektrot tipi ve potansiyel elektrot konumunun etkisi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Modellerden elde edilen tylose yüzey sıcaklık dağılımı şekil 4.12’de gösterilmiştir. Plakalı elektrot geometrisine sahip olan RF sistem 1’de elektrotlar arası 6 cm olduğu durumda ürün yüzey sıcaklığının diğer çapraz elektrot düzeneğine sahip RF sistemlere göre daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı gözlenmiştir. Potansiyel elektrotun ürünü gören yüzeyinin plakalı elektrotta daha geniş olması, ürünün güç anlamından ziyade etrafını çevreleyen enerji anlamında etkinliğini arttırdığından böyle bir sonuç elde edildiği düşünülmektedir. Elektrotlar arası mesafe 10 cm olduğu durumda alt elektrotun potansiyel olduğu RF sistem 3 ile RF sistem 2’de hem şekil 4.13’de paylaşılan ürün hacim ve merkez noktaları sıcaklığının çok benzer olduğu dikkat çekmiştir. Potansiyel elektrot ürünün altında konumlandırıldığında elektrotlar arası mesafe arttıkça ısınma hızının plakalı elektrotta göre daha verimli ya da hızlı olduğu gözlenmektedir. Ürün hacim ve merkez sıcaklığı plakalı elektrotta (RF sistem 2) elektrotlar arası mesafe 6 cm olduğunda daha yüksek iken mesafe açıldığında önce bir eşitlenme daha sonra da çapraz elektrot ve potansiyel elektrotun ürünün altında konumlandırıldığı çapraz elektrot geometrisinin geçtiği gözlenmiştir. Potansiyel elektrot ürünün altında konumlandırıldığında üretilen elektromanyetik enerji doğrudan ürüne nüfus etmektedir ancak üst elektrotta oluşturulan enerji belli bir mesafe aldıktan sonra ürüne ulaşmakta ve absorbe edilmektedir. RF sistem 1’de ise üç farklı elektrotlar arası mesafede en az ısınma hızı ve ürün yüzey sıcaklık dağılımının tekdüzelikten en uzak olduğu sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda sonuçlara göre elektrotlar arası mesafe arttıkça proses süresinin uzadığı ama tekdüze sıcaklık dağılımında iyileşme olduğu bir kez daha aynı koşullarda matematiksel modeli yapılan farklı RF sistem geometrilerinde kanıtlanmıştır.

4.3 Üç Farklı Radyo Frekans Sisteminde Gerçekleştirilen Dondurulmuş Tavuk Göğsü Örneklerine Uygulanan Deneysel Çalışmalar

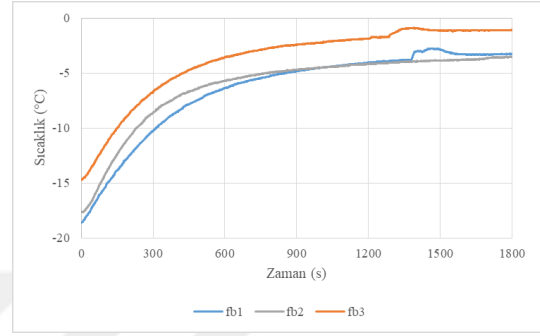
Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda taze bir şekilde satın alınan derisiz ve kemiksiz tavuk göğsü örnekleri -18 °C’de dondurulmuştur. Örnekler dondurulduktan

sonra fiber optik sensörlerin yerleri belirlenerek ince uçlu bir matkap ile gerekli delikler açılmıştır. Bu işlemden sonra örneklerin sıcaklığının tekrar dengeye gelmesi için 12 saat boyunca -18°C 'de bekletilmiştir.

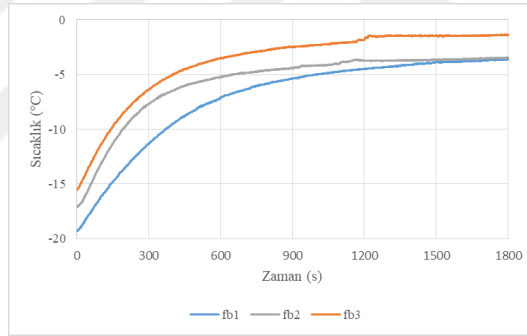
Dondurulmuş tavuk göğsü örneği 1



Dondurulmuş tavuk göğsü örneği 2



Dondurulmuş tavuk göğsü örneği 3



Şekil 4.14 RF sistem 1’de gerçekleştirilen dondurulmuş tavuk göğsü örneklerinin elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda uygulanan çözündürme prosesi sırasında ölçüm alınan fiber optik sensörlerin sıcaklık değişimi

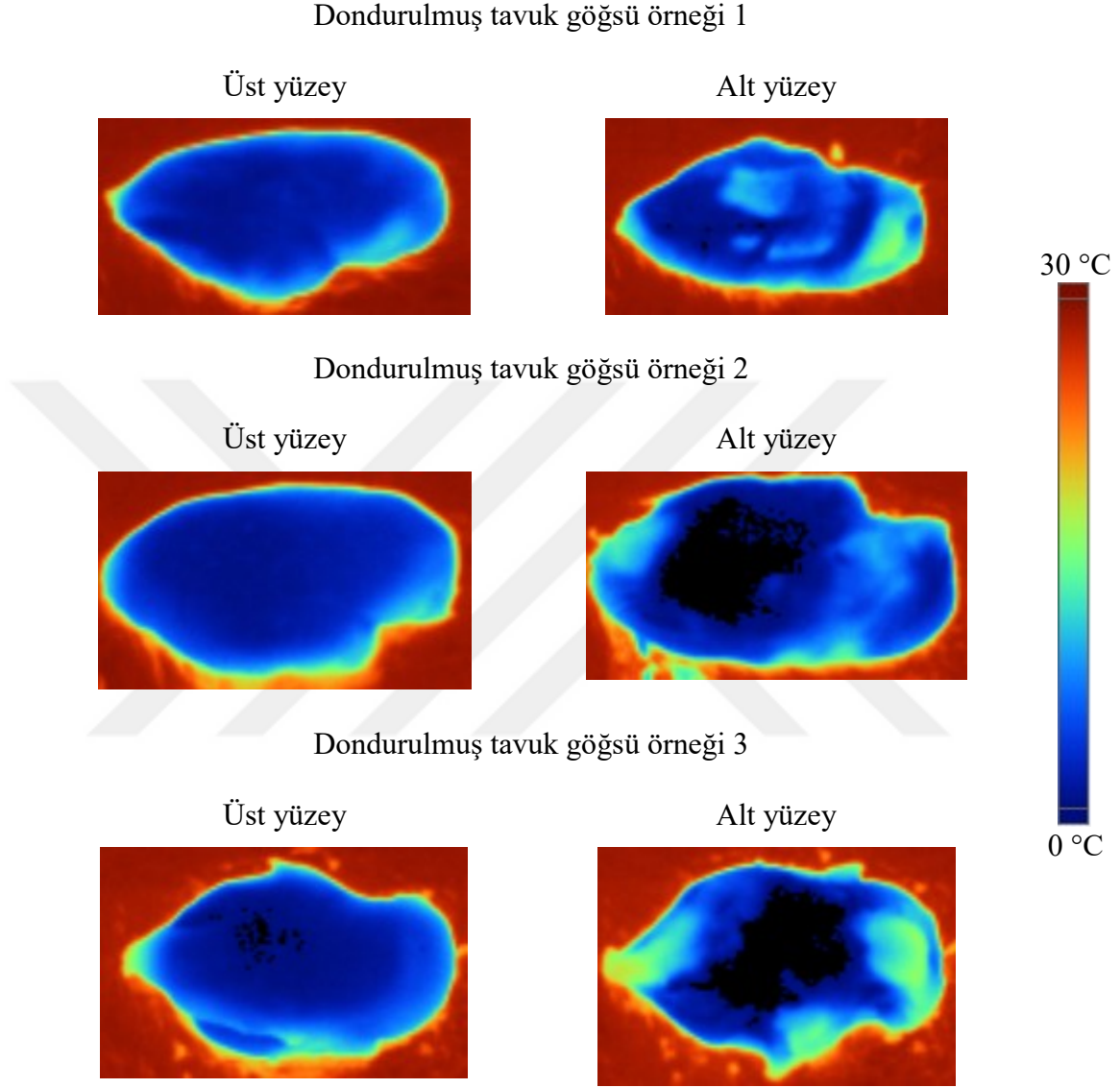
4.3.1. Radyo Frekans Sistem 1

Bu kapsamda çalışmalar ilk olarak Gaziantep Üniversitesi’nde bulunan RF sistem 1’de gerçekleştirilmiştir. RF sistem 1’de gerçekleştirilen deneyler pandemi dönemi geldiğinden kısıtlı bir zamanda deneylerin tamamlanması gerekmiştir. Bu yüzden yalnızca tylose ısıtma ve üç adet dondurulmuş tavuk göğsü çözündürme deneyleri bu RF sistemde yapılabilmektedir. Tylose ısıtma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanacak temperleme/çözündürme prosesinin

elektrotlar arası 14 cm mesafede 4750 V potansiyel güç ile yapılmasına karar verilmiştir. Örneklere yerleştirilen üç fiber optik sensör ile proses süresince elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri şekil 4.14’de gösterilmiştir. Üç fiber optik sensörün de yarım saatlik bir RF prosesi sonunda -4 °C’den daha yüksek bir sıcaklığa ulaşmıştır. Fiber optik sensör sıcaklıkları -4 ile -1 °C aralığında değişirken ürün yüzey sıcaklık dağılımında +10 °C’den yüksek sıcaklıkta bölgeler oluşmuştur. (Şekil 4.15). Üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı verileri incelendiğinde ürün üst yüzey kenarları ve bazı bölgelerin yüksek sıcaklık değerlerine ($T > 10$ °C) ulaştığı belirlenmiştir. Örneklerin alt yüzeyinde farklı sıcaklık profillerinin oluşmasının sebebi ürün yüzey yapısından kaynaklandığı ve girinti çıkıntı olan bölgelerde elektrik alan yoğunlaşmasına bağlı olarak sıcaklık artışları meydana gelmiştir. Ayrıca, örneklerin yerleştirildiği polipropilen kaba temas eden yüzeylerde kondüksiyon da bağlı olarak hızlı gerçekleşen çözünme sonucunda sıcaklık artışları olduğu gözlenmiştir. Chen vd. (2021) 27,12 MHz RF sistemde giriş gücü 600 W uygulayarak ton balığına çözdürme prosesi uygulamışlardır. Elektrotlar arası 7 cm’de gerçekleştirilen deneyde 10 dakikalık RF uygulaması sonunda ürün köşe noktalarında sıcaklık 25 °C’lere ulaşmıştır. Ürün yüzeyindeki maksimum ve minimum sıcaklık farkının ise 34 °C olduğu belirtilmiştir. Dondurulmuş farklı şekillerdeki et bloklarına 3 kW güce sahip RF sistemde 115 mm elektrotlar arası mesafede çözdürme işlemi uygulanmıştır (Li vd. 2018). Ürünlerin yüzey sıcaklık dağılımında 0 °C’nin altında sıcaklık bölgeleri kadar 30 °C’den yüksek aşırı ısınmış bölgelerin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada keskin kenarların ürün sıcaklık dağılımında tekdüzeliği bozduğuna değinilmiştir.

RF çözdürme prosesinin tamamlanmasından sonra örnekler, tamamen çözülmenin gerçekleşmesi ve gerekli analizlerin yapılabilmesi için, +4 °C’de 24 saat bekletilmiştir. Örneklerin çözme kaybı için tartım işlemi hem RF prosesi bitiminde hem de buzdolabında bekletme işleminin sonunda yapılmıştır. RF prosesi sonunda üç örneğin ortalama çözme kaybı $0,07 \pm 0,02$ hesaplanmıştır. Örnekler 24 saat bekletildikten ve tamamen çözdürüldükten sonra ise çözme kaybı değeri $2,77 \pm 1,19$ olarak belirlenmiştir. Farklı prosesler ile tavuk göğsüne uygulanan temperleme prosesinde çözme kaybı değeri karşılaştırılmıştır (Wang vd. 2022). Ürün merkez noktası -3 °C’ye ulaştığında proses sonlandırılmıştır. RF uygulaması ile hava ile temperleme arasında çözme kaybı açısından

bir fark bulunmazken suda çözdürmede proses süresinin uzun olmasına bağlı olarak istatistiksel olarak fark olup daha yüksek bir çözme kaybı elde edilmiştir.



Şekil 4.15 Radyo frekans sistem 1’de elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda dondurulmuş üç adet tavuk göğsüne uygulanan çözdürme prosesi bitiminde elde edilen ürünün üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı

RF uygulama ile çözdürülmüş üç tavuk göğsü örnekleri kenar ve merkez olmak üzere iki parça kesilerek renk ve tekstür analizinde kullanılmıştır. Kenar parçanın üst ve iç yüzeyi, merkez parçanın üst ve alt yüzeyinde renk ölçümü yapılmıştır (Çizelge 4.1). Renk ölçümü yapılan parçalar daha sonra tekstür analizi için kullanılmış ve sertlik parametresi ölçülmüştür (Çizelge 4.2).

Piştirme kaybı analizi üç farklı tavuk filetosu örneklerinden her birinden yaklaşık 10 g ağırlığında üç parça alınarak gerçekleştirilmiştir. Üç parçadan bir tanesinin merkezine yerleştirilen ısı çifti ile merkez sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Merkez sıcaklık 72 °C'ye ulaştığında üç parça aynı anda sıcak su banyosundan çıkartılmış ve ürün sıcaklık değeri oda sıcaklığına ulaştığında ağırlık değişimleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.1 Radyo frekans sistem 1'de sistemde çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri

	Tavuk örneği 1				Tavuk örneği 2				Tavuk örneği 3			
	Kenar Parça		Merkez Parça		Kenar Parça		Merkez Parça		Kenar Parça		Merkez Parça	
	İç	Dış	Alt	Üst	İç	Dış	Alt	Üst y	İç	Dış	Alt	Üst
L*	53,9	45,56	51,36	53,95	56,65	51,28	53,7	56,1	56,58	55,71	51,86	56,26
a*	7,05	15,63	9,79	8,65	8,49	8,49	9,9	9,95	7,98	9,34	11,73	9,55
b*	17,6	19,97	21,98	18,43	19,8	19,8	22,9	21,4	22,1	24,02	25,43	25,3

Çizelge 4.2 Radyo frekans sistem 1'de çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen sertlik değerleri

	Sertlik (kg)
Tavuk örneği 1- kenar parça	15,9
Tavuk örneği 1- merkez parça	14,1
Tavuk örneği 2- kenar parça	11,8
Tavuk örneği 2- merkez parça	13,9
Tavuk örneği 3- kenar parça	9,7
Tavuk örneği 3- merkez parça	12,2

Çizelge 4.3 Radyo frekans sistem 1'de çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan ortalama 10 gramlık üçer örnek ile hesaplanan pişme kaybı değerleri

	Piştirme öncesi (g)	Piştirme sonrası (g)	Piştirme kaybı (%)
Tavuk örneği 1	10,0±0,3	8,7±0,4	13,3±1,6
Tavuk örneği 2	10,1±0,2	8,3±0,2	17,4±0,6
Tavuk örneği 3	10,2±0,2	8,9±0,2	12,2±0,8

4.3.2 Radyo Frekans Sistem 2

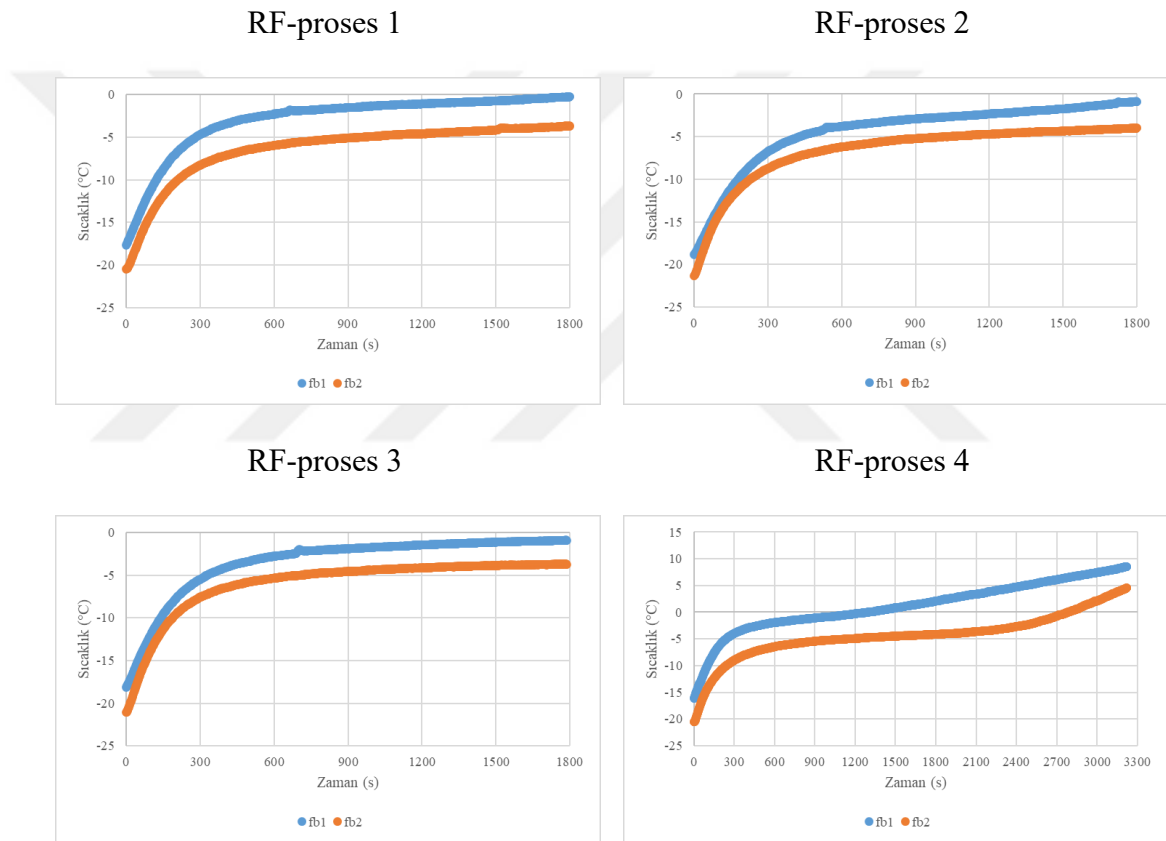
Radyo frekans (RF) sistem 2’de çizelge 4.4’de listelendiği gibi üç adet proses radyo frekans sisteminde, üç adet proses buzdolabı koşulunda ve ekstra bir adet proses daha radyo frekans olmak üzere toplam yedi deney yapılarak sonuçlar birbirleri ile ve taze ürün ile karşılaştırılmıştır. Tylose ısıtma sonuçlarına göre en iyi tekdüze sıcaklık dağılımı elektrotlar arası 14 cm uzaklığında elde edildiğinden dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine aynı mesafede çözündürme işlemi uygulanmıştır. Yapılan ön denemeler ile RF proses süresinin yarım saat olmasına karar verilmiştir. Buzdolabı koşulunda yapılan deneylerde fiber optik sensör yerleştirilerek ürün sıcaklığı kayıt altına alınmıştır. Buzdolabı koşulundaki deney gün sonunda başlanıp bir sonraki gün sabah sonlandırılmıştır. RF proses-4 deneyinde ise ürünün tamamen RF prosesinde çözündürülmesi yani fiber optik sensörlerin en az +4 °C’ye ulaşması hedeflenmiştir. Şekil 4.16’da RF sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsüne uygulanan dört adet çözündürme prosesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Georgia Üniversitesinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmaların uygulandığı koşullar

RF- Proses 1	Radyo frekans Elektrotlar arası 14 cm	1800 s proses
RF- Proses 2		
RF- Proses 3		
Buzdolabı 1	Buzdolabı koşulu +5 °C	1000 dakika
Buzdolabı 2		
Buzdolabı 3		
RF-Proses 4	Radyo frekans Elektrotlar arası 14 cm	Tamamen çözündürme– 3300 s

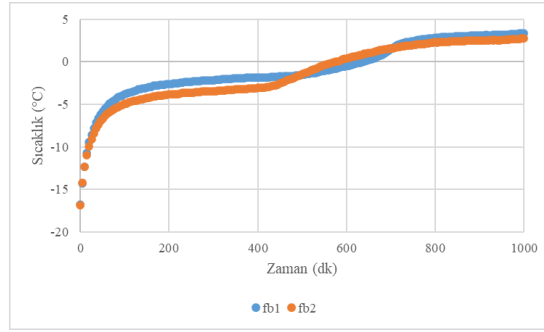
Elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda uygulanan RF çözündürme prosesinde yarım saatlik prosesin sonunda iki numaralı fiber optik yani ürünün kalın olduğu kenar kısımdaki en az -4 °C’ye ulaşmıştır. Proses öncesi ürünün tartılması ve ürün üst yüzey sıcaklık dağılımının belirlenmesi işlemleri olabildiğince hızlı yapılsa da fiber optik sensörler farklı sıcaklıklarda prosese başlamıştır. Ürün merkezine yerleştirilen bir numaralı fiber optik sensör bütün deneylerde ürün kenar bölgesine yerleştirilen iki

numaralı fiber optik sensörden daha yüksek bir sıcaklıkta başladığından proses sonunda yaklaşık 0 °C'lere ulaşmıştır. Ürün kalınlığının sıcaklık artışına bir etkisi olacağı düşünülse de proses öncesi ürün sıcaklığını sabit ve tekdüze tutmak imkânsız olduğundan bu görüş hakkında bir sonuca varılamamıştır. RF-proses 4 deneyinde elektrotlar arası 14 cm durumunda fiber optik sensörler en az +4 °C'ye ulaşana kadar çözdürme prosesi uygulamıştır. İki numaralı fiber optik probun 3175 s'de istenilen sıcaklığı ulaştığı gözlenmiştir. Bu deneyde bir numaralı fiber optik probun sıcaklığı diğer deneylere göre yüksek bir sıcaklıkta başladığı için yaklaşık 1300 s'lerde 0 °C'nin üstüne çıkmıştır.

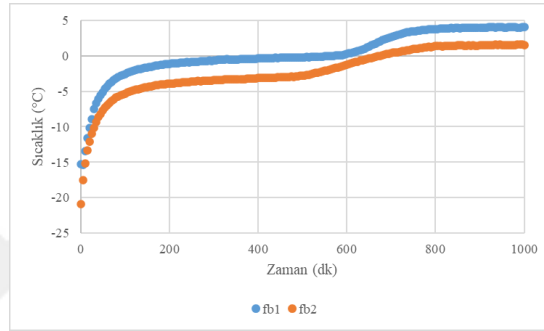


Şekil 4.16 Radyo frekans sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri

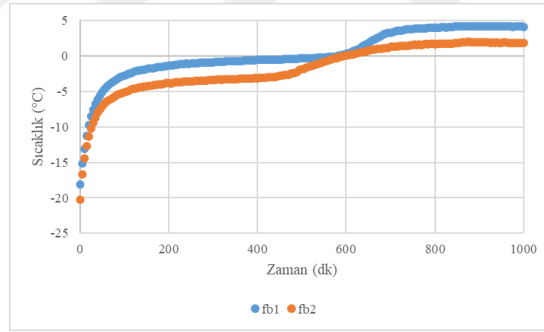
Buzdolabı 1



Buzdolabı 2



Buzdolabı 3

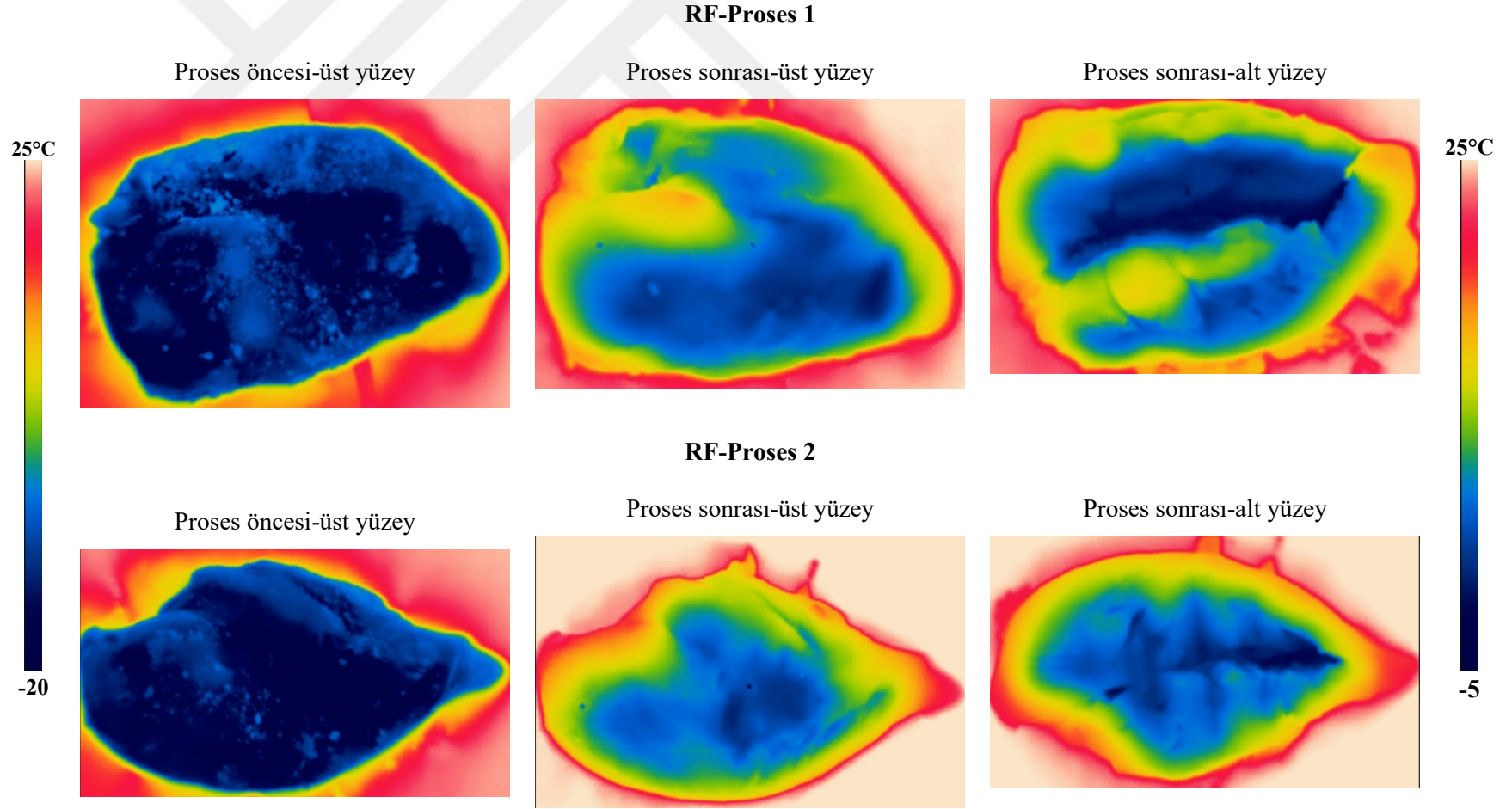


Şekil 4.17 Georgia Üniversitesi kurumunda üç adet dondurulmuş tavuk göğsü örneğinin buzdolabı koşulunda çözündürülmesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri

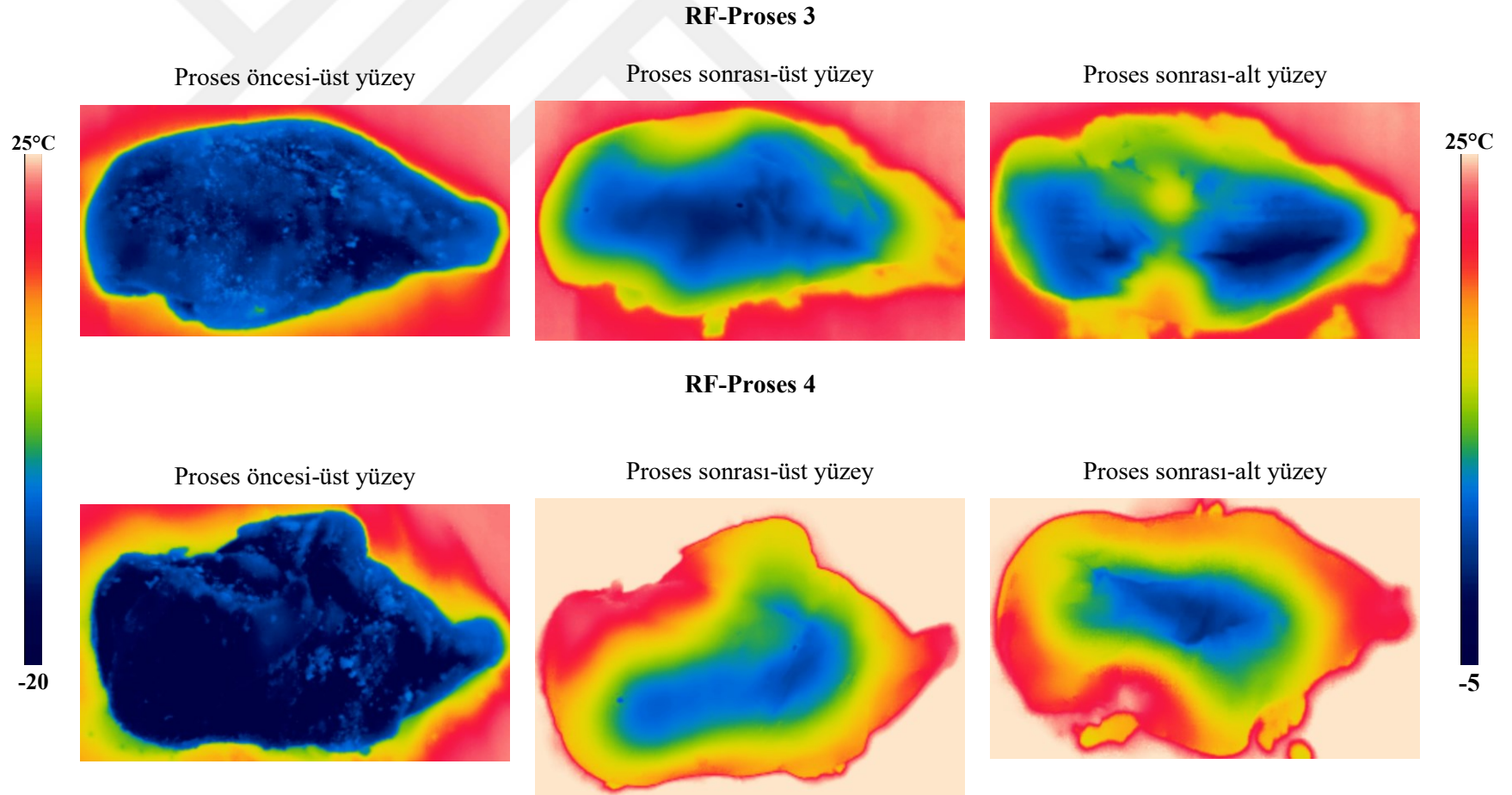
Ürünlerin proses öncesi üst yüzey ve proses sonrası üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı termal kamera ile belirlenmiştir (Şekil 4.18, 4.19). Proses sonrası üst yüzey sıcaklık dağılımında kenar ve köşelerde sıcaklığın aşırı yükseldiği tespit edilmiştir. Ürünün orta kısmı ise soğuk bölge olarak karşımıza çıkmıştır. Ürünlerin alt yüzeyinin girintili çıkıntılı bir yapıda olmasından kaynaklı olarak alt kısmın orta bölümlerinde de sıcaklığın arttığı gözlenmiştir. RF-proses 4 deneyinde ise ürün tamamen çözünürken dielektrik özelliklerin

faz değişim sıcaklığı üzerinde radikal bir şekilde arttığından ürün köşe ve kenarlarında sıcaklığın istenmediği kadar yükseldiği gözlenmiştir. Buzdolabı koşulunda çözödürölen dondurulmuş tavuk göğsü örneklerinde fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık değişimi şekil 4.17’de paylaşılmıştır. Yapılan üç çözödüröme prosesinde yaklaşık 600 dakikadan sonra fiber optik prob sıcaklıklarının 0 °C’nin üstüne çıktığı gözlenmiştir. Buna karşılık RF ile ürünün tamamen çözödüröölme prosesi bir saatten az sürmüştü. Buzdolabı koşulunda çözödüröme süresi uzun olsa da ortam sıcaklığının +5 °C ile sınırlandırılmış olmasından ürün yüzeyinde istenmeyen sıcaklık yükselmeleri yaşanmamıştır (Şekil 4.20). Ancak proses süresinin uzun sürmesinden dolayı çözme kaybının şekil 4.21’de göröldüğü gibi daha yüksek olduğu hesaplanmıştır.

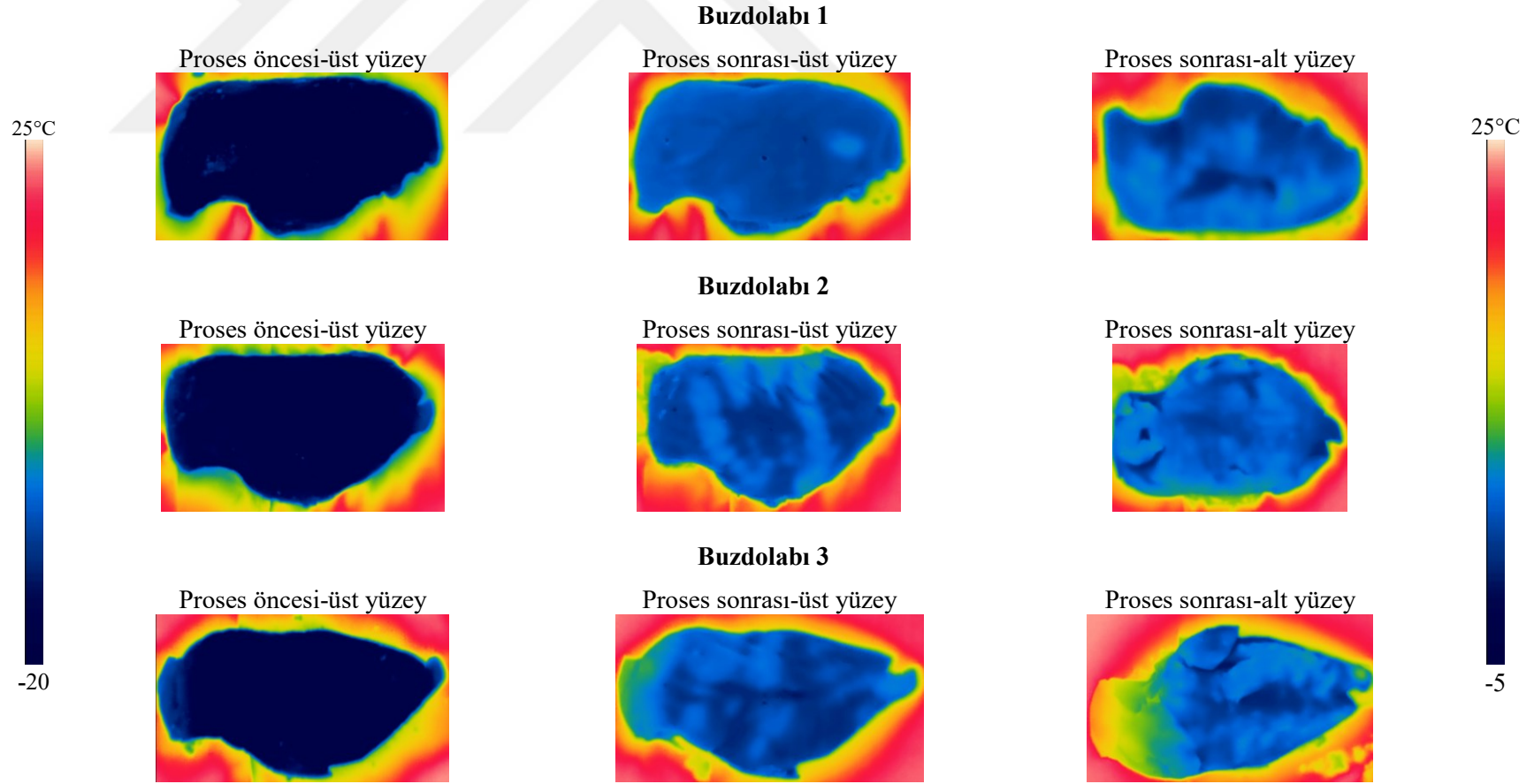
RF sistemde proses edilen örneklerin proses sonrası ağırlık değişimi belirlendiği gibi; ürünler, tamamen çözöölme amacıyla buzdolabında bir gün bekletildikten sonra da ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Çözme kaybı açısından her iki sonuçta paylaşılmıştır. RF proses ve RF prosten 24 saat sonrası arasında istatistiksel olarak bir fark bulunmazken, buzdolabı çözödürömede çözme kaybı değeri diğer iki durumdan istatistiksel olarak farklı bulunmuş ve daha yüksek olduğu saptanmıştır (Şekil 4.21). Ürünler analize hazır duruma geldiğinde ürün kalınlığı eşit bir dağılım göstermediğinden özellikle tekstür ölçümü düşünöülerek her bir üründen iki silindirik parça kesilmiştir. Silindirik parçalar, merkez ve kenar, ilk önce renk ölçümünde kullanılmıştır. Renk ölçümü kenar parçanın üst ve yan (iç) yüzeyinde; merkez parçada ise üst ve alt yüzey olmak üzere ölçüm yapılmıştır. Çizelge 4.5, 4.6’da marketten taze olarak alınan ve hiç dondurma işlemi uygulanmayan kontrol grubu da dahil olmak üzere tüm proses sonuçlarının renk değeri paylaşılmıştır. Renk değişiminin anlamlı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için her proste her bir parça bloğunda ΔE değeri kontrol örneği değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde kontrol yani hiç proses edilmemiş ürüne göre renk değerlerinin ne kadar saptığı tespit edilmiştir. Bazı sapmalar hariç, örneğin RF proses-2 örneğinin üst köşe parçası gibi, genel olarak RF prosesi sonrasında elde edilen renk değerlerinin buzdolabı ortamında çözödüröölölen örneklere göre kontrol grubundan daha az bir sapma göstermiştir. Proses için alınan tavuk göğsü örnekleri aynı gün aynı firmadan aynı marketten temin edilse bile bir paketin içinde farklı tavukların filetoalarının yer almış olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.18 Radyo frekans sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 1 ve 2



Şekil 4.19 Radyo frekans sistem 2’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözündürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 3 ve 4



Şekil 4.20 Georgia Üniversitesinde üç adet dondurulmuş tavuk göğsü örneğinin buzdolabı koşulunda çözündürülme prosesinin öncesinde üst yüzeyin ve çözündürülme işleminin tamamlanmasından sonra üst ve alt yüzeyin sıcaklık dağılımı

Çizelge 4.5 Georgia Üniversitesinde kontrol ve radyo frekans sistemde çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri

	Kontrol	RF Proses 1	RF Proses 2	RF Proses 3	RF Proses 4
Köşe parça üst					
L*	76,47±1,56 ^a	77,64±1,93 ^{ab}	81,35±3,14 ^{ab}	77,25±2,47 ^b	81,62±2,97 ^{ab}
a*	24,89±2,45 ^{ab}	27,08±0,57 ^a	19,02±2,83 ^b	24,7±1,93 ^{ab}	27,93±2,24 ^a
b*	47,32±1,49 ^{cd}	49,47±0,82 ^{bc}	43,67±3,61 ^d	45,27±0,45 ^{cd}	48,66±1,19 ^c
ΔE		5,39	35,84	2,42	18,77
Köşe parça iç					
L*	81,25±2,17 ^{bc}	80,52±2,89 ^c	81,82±1,48 ^{bc}	79,32±0,56 ^c	82,63±2,09 ^{abc}
a*	26,62±1,60 ^a	29,61±0,32 ^a	25,91±1,94 ^a	30,26±1,07 ^a	29,8±4,56 ^a
b*	34,44±2,55 ^a	33,49±3,49 ^a	37,63±3,46 ^a	37,87±3,3 ^a	35,47±3,22 ^a
ΔE		5,19	5,48	14,33	6,54
Merkez parça üst					
L*	81,82±1,47 ^{bcd}	80,95±1,44 ^d	82±1,11 ^{bcd}	81,19±0,98 ^{cd}	83,63±0,83 ^{abcd}
a*	20,36±0,95 ^{bc}	23,83±0,87 ^{ab}	19,66±1,1 ^c	22,18±0,61 ^{abc}	24,62±2,42 ^a
b*	49,72±1,08 ^{bc}	47±0,89 ^{bc}	42,69±0,35 ^c	44,48±2,16 ^{bc}	46,67±2,56 ^{bc}
ΔE		6,44	8,34	4,34	10,69
Merkez parça alt					
L*	80,83±1,29 ^{bc}	83,96±1,98 ^{bc}	80,97±0,97 ^{bc}	78,47±1 ^c	81,05±2,09 ^{bc}
a*	27,39±2,69 ^{ab}	26,80±2,15 ^{ab}	25,39±0,45 ^{ab}	28,35±0,41 ^a	29,79±0,84 ^a
b*	40,48±0,41 ^b	41,16±0,86 ^b	41,35±1,19 ^b	42,09±2,96 ^b	41,18±4,17 ^b
ΔE		5,31	2,40	4,52	3,14

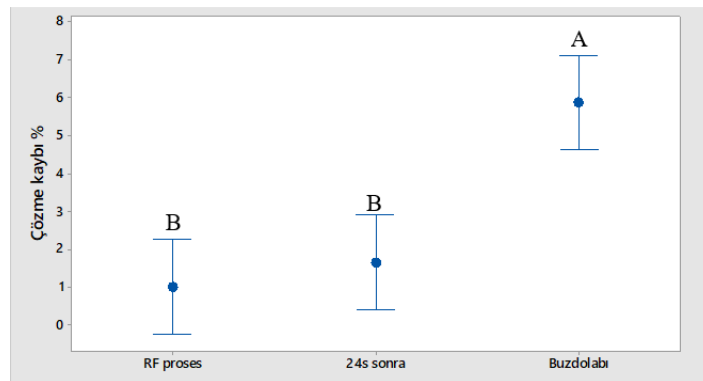
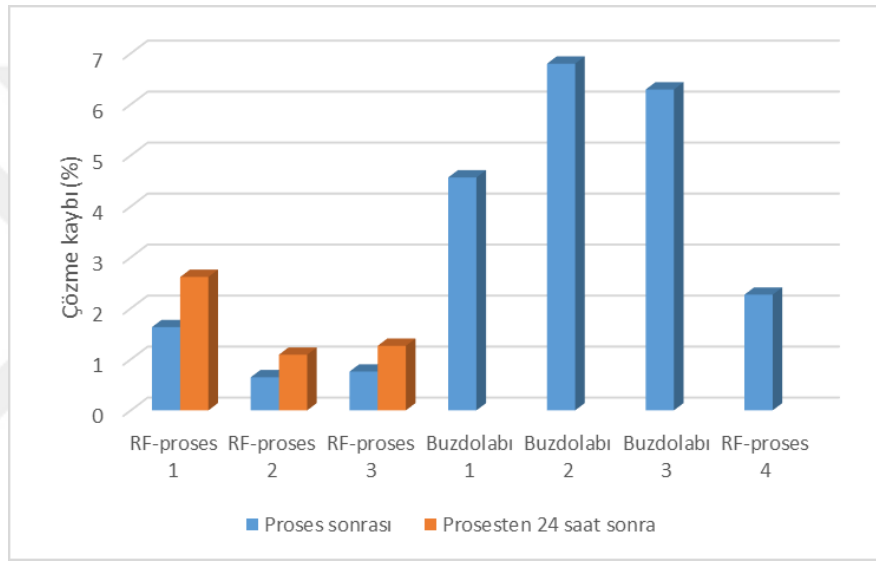
*Her parçada her renk değeri kendi içinde istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.6 Georgia Üniversitesi buzdolabı ortamında çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri

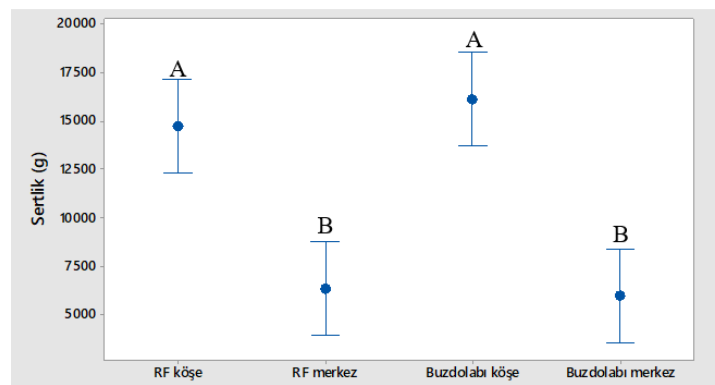
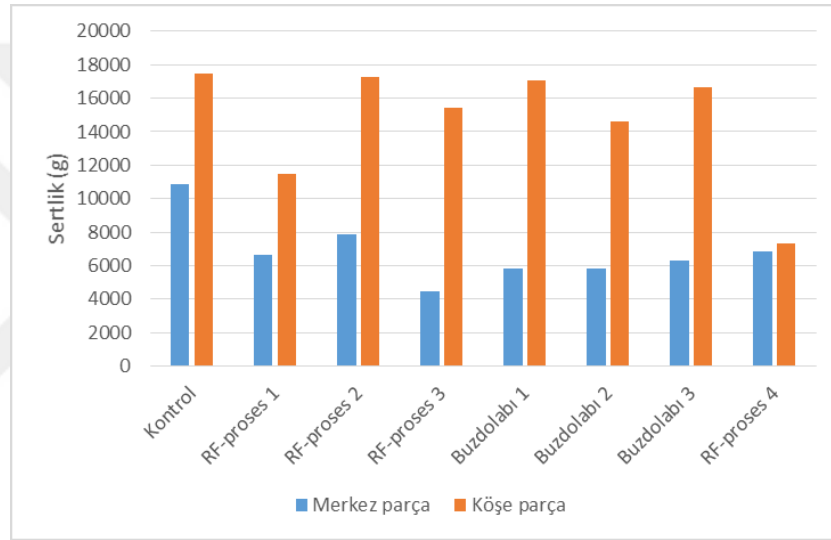
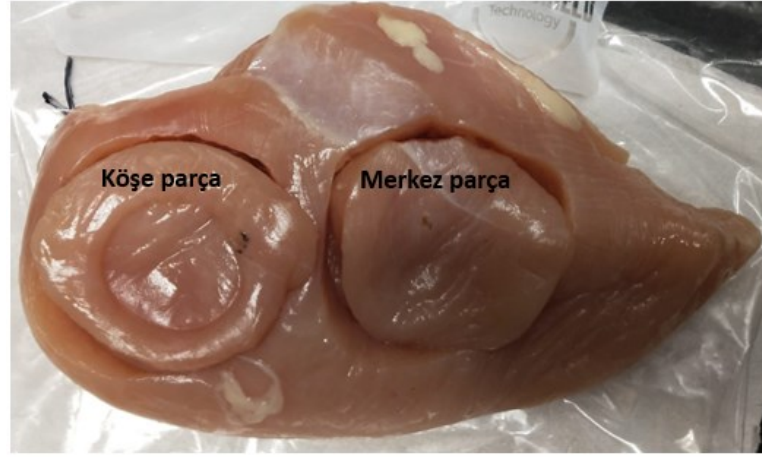
	Buzdolabı 1	Buzdolabı 2	Buzdolabı 3
Köşe parça üst			
L*	84,21±1,93 ^a	81,74±2,48 ^{ab}	81,89±2,28 ^{ab}
a*	27,25±1,7 ^a	24,62±1,59 ^{ab}	27,88±2,86 ^a
b*	61,77±1,37 ^a	53,72±1,18 ^b	49,04±0,33 ^c
ΔE	137,16	34,44	20,62
Köşe parça iç			
L*	85,79±0,69 ^{ab}	86,8±0,92 ^a	83,82±0,8 ^{abc}
a*	27,88±3,49 ^a	27,3±1,59 ^a	29,06±2,08 ^a
b*	58,61±1,03 ^b	41,91±0,89 ^a	40,43±6,09 ^a
ΔE	303,04	43,55	24,22
Merkez parça üst			
L*	91,4±1,29 ^{ab}	88,98±1,3 ^a	87,64±2,7 ^{abc}
a*	22,17±0,96 ^{abc}	19,16±0,77 ^c	21,83±2,55 ^{abc}
b*	59,14±0,62 ^a	56,28±3,35 ^a	49,27±1,64 ^b
ΔE	124,65	72	21,26
Merkez parça alt			
L*	91,98±5,63 ^a	85,04±1,66 ^{bc}	86,28±1,26 ^{ab}
a*	21,51±5,03 ^b	28,12±2,05 ^{ab}	24,79±1,71 ^{ab}
b*	57,71±6,43 ^a	50,63±1,03 ^{ab}	45,22±5,76 ^b
ΔE	277,88	60,57	29,47

*Her parçada her renk değeri kendi içinde istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

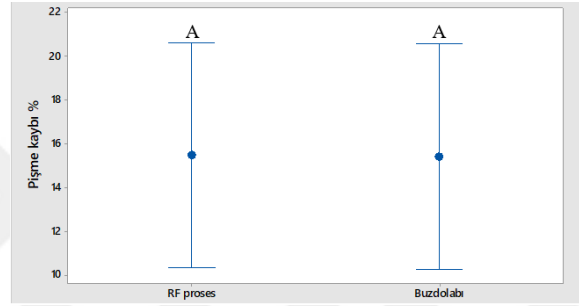
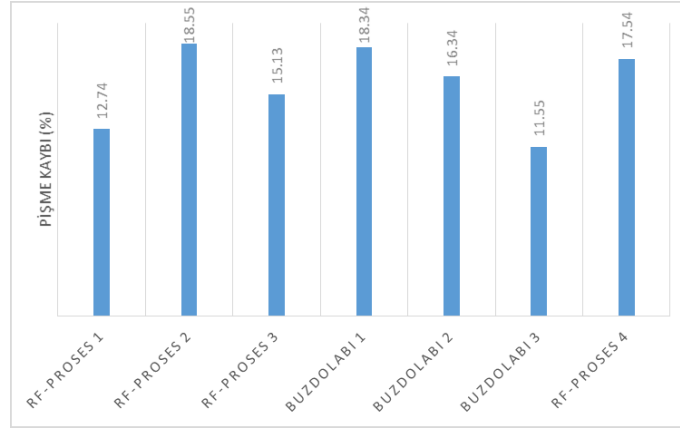
Li vd. (2021) dondurulmuş sığır eti çözündürme prosesi için RF ve buzdolabı yöntemlerini uygulamışlardır. Taze ürün ile proses sonunda ürünün renk değerleri ürünün merkez ve kenar bölgeleri olarak karşılaştırılmıştır. Proses sonunda ürün ortalama -4°C 'de ve taze ürünün $+20^{\circ}\text{C}$ 'de olmasından kaynaklı olarak L^* , a^* ve b^* değerlerinde istatistiksel olarak fark tespit edilmiştir. Buzdolabı çözündürme ile RF uygulaması arasında renk bakımından sadece ürün köşesinde a^* ve b^* değerleri açısından istatistiksel olarak fark gözlenmiştir. Ancak renk değişim değeri (ΔE) ürün köşesi iki proses için karşılaştırıldığında bir fark gözlenmemiştir.



Şekil 4.21 Georgia Üniversitesinde radyo frekans sistem 2 ve buzdolabı koşulunda dondurulmuş tavuk örnekleri ile gerçekleştirilen çözündürme proseslerindeki çözme kaybı değerleri ve karşılaştırılması



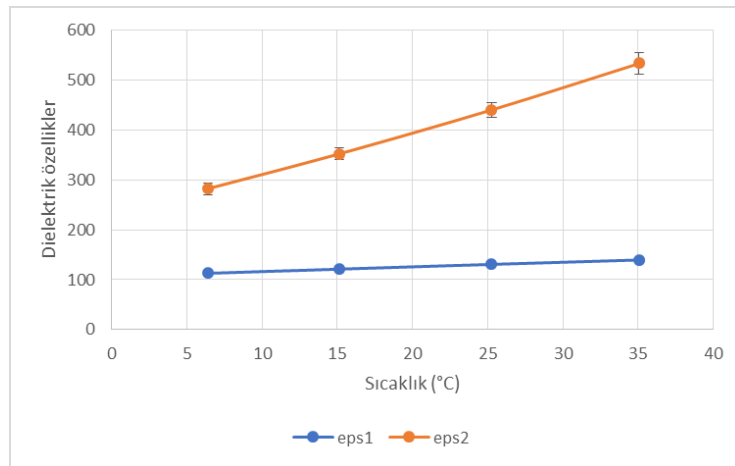
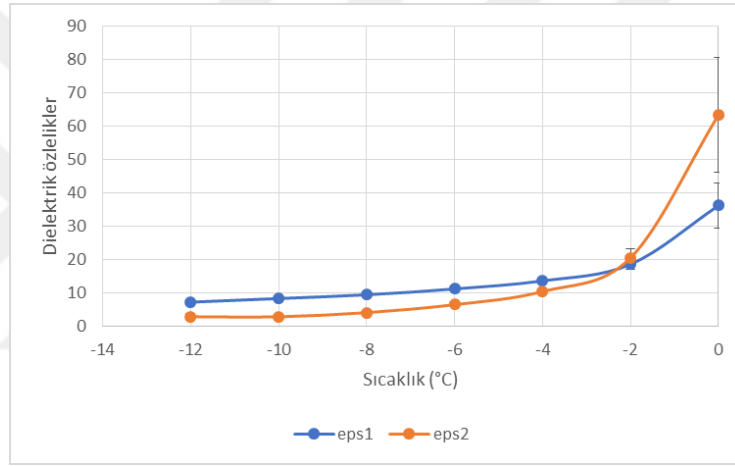
Şekil 4.22 Georgia Üniversitesi radyo frekans sistem 2’de ve buzdolabı koşulunda çözündürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde iki parçada gerçekleştirilen tekstür analizi ve sertlik değerinin karşılaştırılması



Şekil 4.23 Georgia Üniversitesinde radyo frekans sistem 2 ve buzdolabı koşulunda çözdürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde üç adet ile gerçekleştirilen pişme kaybı analizi

Her bir üründen elde edilen iki parçada tekstür profil analizi ile sertlik değerleri belirlenmiştir. Çözme kaybının buzdolabı koşulunda daha yüksek bulunmasına karşın sertlik parametresinde RF ve buzdolabı koşulları arasında aynı bölgeden alınan parçalar arasında istatistiksel olarak bir fark tespit edilmemiştir. Pişme kaybı analizi her bir çözdürülmüş örnekten alınan yaklaşık 10 gramlık üç adet parça ile yapılmıştır (Şekil 4.23). Farklı çözdürme proses uygulamalarının pişme kaybına istatistiksel olarak herhangi bir fark bulunmamıştır. Tavuk göğsü örneklerinin dielektrik özellikleri taze ve donmuş olarak 0 °C'nin altında ve üstünde belirli sıcaklıklarda ölçülmüştür. Dielektrik katsayısı ve kayıp faktörünün 0 °C'nin altında çok düşük değerlerde olduğu ancak faz değişimi yani buzun suya dönüşmesi ile birlikte özellikle kayıp faktöründe aşırı bir yükselme tespit edilmiştir. Dielektrik özelliklerinin çözdürme prosesi sırasında bu önemli artışından dolayı dondurulmuş tavuk örneklerinin çözdürülmesi sırasında köşe ve kenar kısımlarda yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Şekil 4.24'de tavuk göğsü örneklerinin hem

taze olduğu hem de dondurulmuş halinde dielektrik özellikleri ölçümü iki grafik ile gösterilmiştir. Temperleme sıcaklığından (-4 ile -2 °C) sonra dielektrik özelliklerin hızlı bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Taze üründe ise kayıp faktörü sıcaklıkla birlikte artmaya devam ederken dielektrik katsayısında hafif bir artış olmuştur. Temperleme sıcaklığının altında ve üstünde dielektrik özelliklerde ciddi bir farklılık olmasından dolayı çözündürme prosesinde tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde etmek neredeyse imkansızdır. Kıyılmış balığın 27,12 MHz frekansında -15 ile +10 °C sıcaklığı arasında dielektrik özelliklerinin de temperleme sıcaklığının geçilmesiyle dielektrik özelliklerin 12 kat artmıştır (Yang vd. 2019).



Şekil 4.24 Georgia Üniversitesi kurumunda analizi yapılan taze ve donmuş tavuk göğsü örneklerinin dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimi

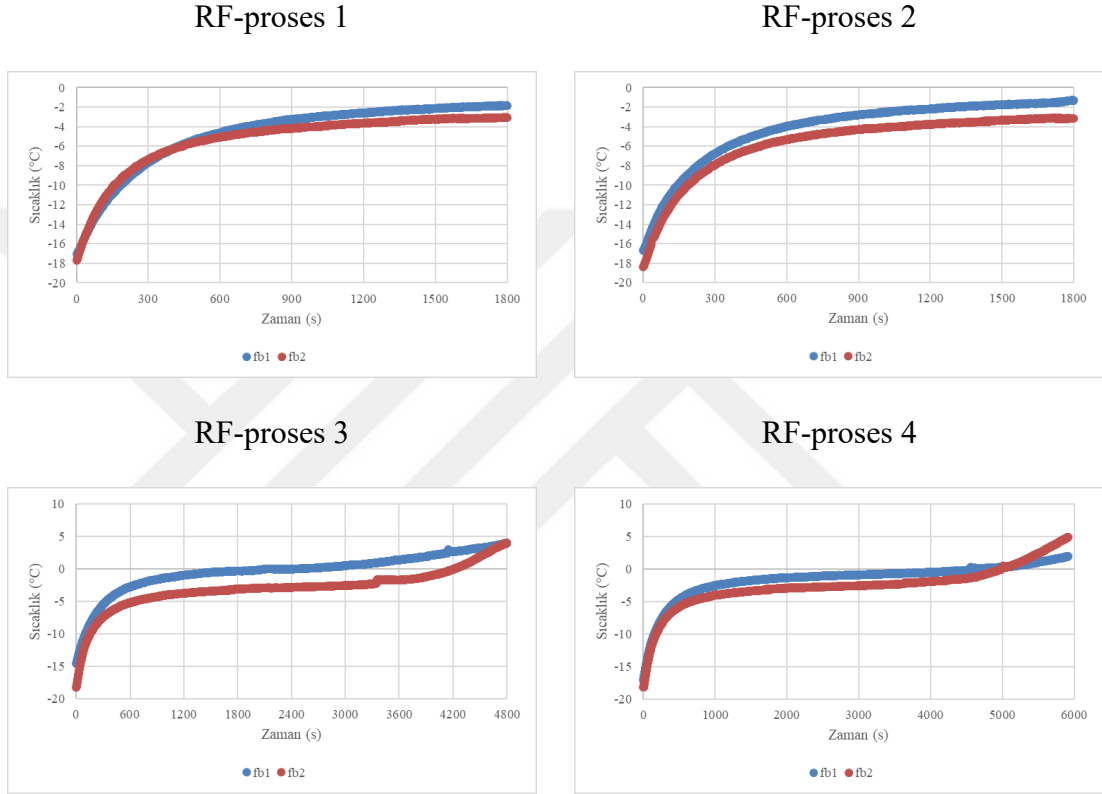
Çizelge 4.7 Ankara Üniversitesi kurumunda gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmaların uygulandığı koşullar

RF- Proses 1	Radyo frekans Elektrotlar arası 14 cm	1800 s proses
RF- Proses 2		
RF- Proses 3	Radyo frekans Elektrotlar arası 14 cm	Tamamen çözdürme– 4800 ve 6000 s proses
RF- proses 4		
Buzdolabı 1	Buzdolabı koşulu +4 °C	Fiber optik sensör kullanılmadı
Buzdolabı 2		

4.3.3 Radyo frekans sistem 3

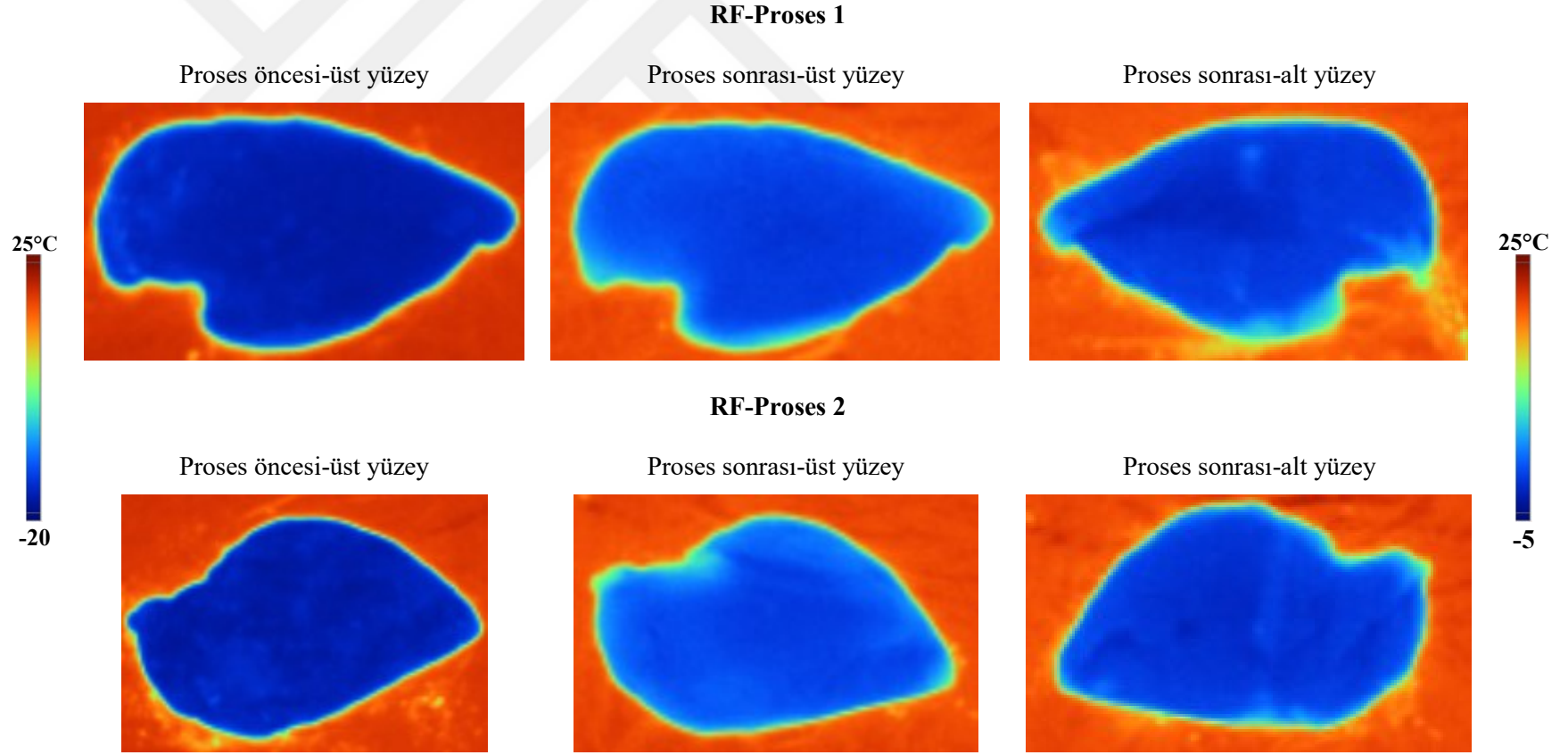
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünde bulunan RF sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesleri ve koşulları çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Deneylerin yapıldığı önceki iki sistemde elektrotlar arası 14 cm olduğu durumda ürünler yarım saatlik bir RF çözdürme prosesine tabii tutulmuştur. Tylose ısıtma deneylerinden en düşük potansiyel uygulanan güç değerinin RF sistem 3’de elde edildiği tespit edilmişti. Deneyler sırasında ürünler farklı market ve firmalardan farklı dönemlerde temin edildiğinden birbirleri ile karşılaştırmak doğru olmamasına rağmen aynı proses süresinin uygulanıp ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmek istemiştir. Aynı zamanda aynı elektrot yüksekliğinde fiber optik sensörler en az +4 °C’ye ulaşana kadar da iki farklı deney yürütülmüştür. Radyo frekans çözdürmenin ürün üzerine etkisini karşılaştırmak amacı ile buzdolabı ortamında da iki adet ürün çözdürülmüştür. Ancak buzdolabı prosesleri sırasında fiber optik sensör kullanılmamıştır. Dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine elektrotlar arası mesafenin 14 cm olduğu durumda yarım saatlik proses uygulandığında fiber optik sensörlerin -4 °C’nin üstünde bir değere ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 4.25). Uygulanan potansiyel fark bu RF sistemde önceki RF sistemlere göre düşük olsa da çözdürme prosesinde ürünün faz değişimi sıcaklığına ulaşması hızlı bir süreç olduğundan uygulanan potansiyel fark değerinin etkisi hissedilmemiştir. Aynı koşullarda ürünün tamamen çözdürülmesi için proses uygulandığında sıcaklığın çok uzun bir süre faz değişimi sıcaklığını geçemediği gözlenmiştir. RF-proses 3 uygulanmasında 4800 s sonunda fiber optik sensörler en az +4 °C’ye ulaşmıştır. Ancak bu proses başlangıcında bir numaralı fiber optik sensörün -14 °C’den başladığı için genel ürün sıcaklığının da -18 °C’den yüksek olacağı düşünülerek proses süresi RF-proses 4’e göre kısa sürmüştür.

Ürünün başlangıç sıcaklığının RF çözündürme prosesinde proses süresi açısından önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Bu açıdan RF uygulamanın endüstriyel prosesinde eğer ürünlerin başlangıç sıcaklıkları benzer olmazsa proses sonunda bazı ürünlerde istenilmeyen yüksek sıcaklıklar görülebilir. Dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan yarım saatlik RF prosesinden önce üst ve proses sonunda üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı şekil 4.26’da gösterilmiştir.

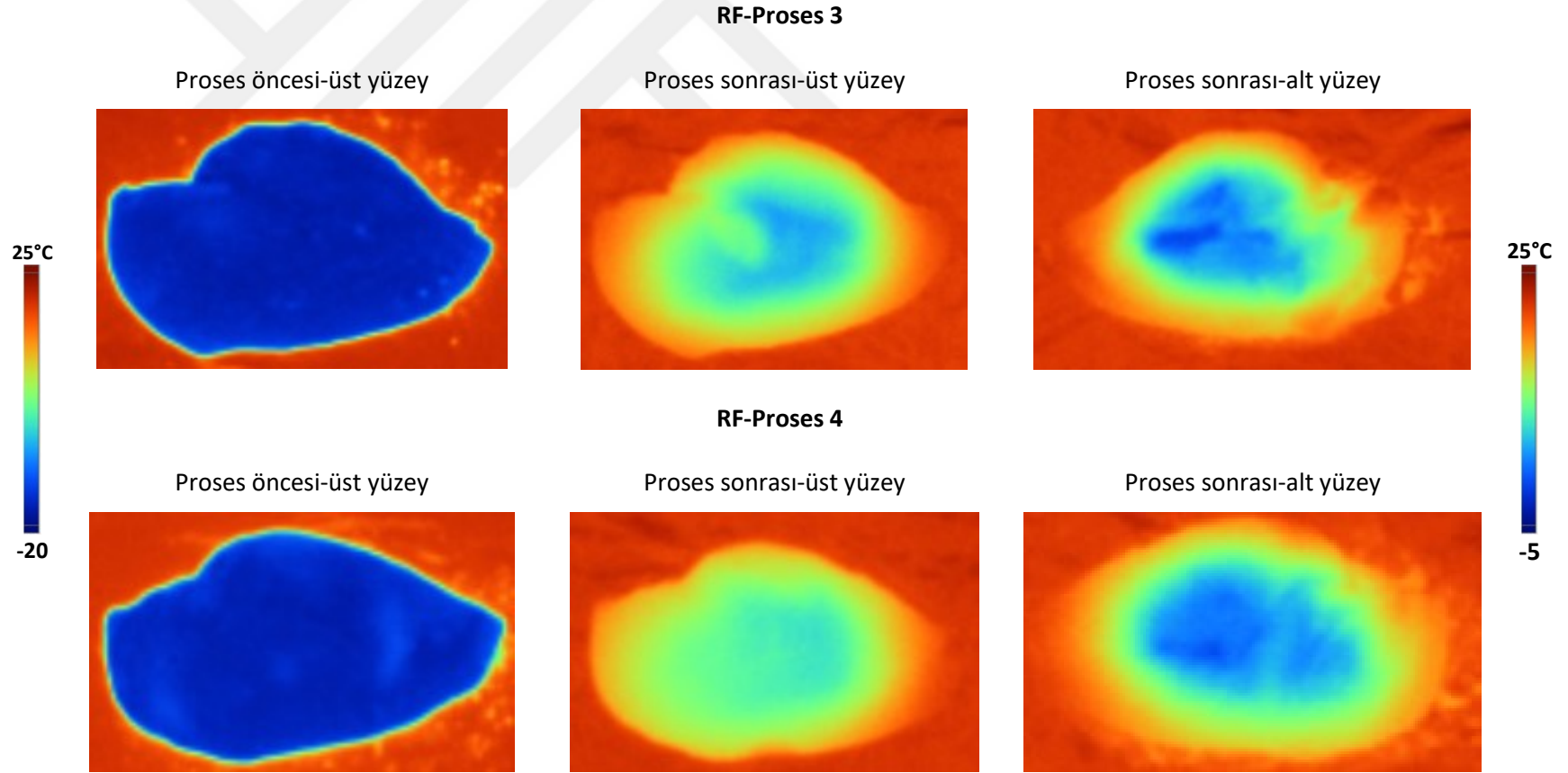


Şekil 4.25 Radyo frekans sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözündürme prosesi sırasında fiber optik sensörlerden elde edilen sıcaklık-zaman grafikleri

Uygulanan güç değerinin düşük olmasının etkisi proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımında da görülmüştür. Hem üst hem de alt yüzey sıcaklık dağılımında herhangi bir bölgede yüksek sıcaklıklar tespit edilmemiştir. Buna karşılık ürünün tamamen çözündürülmesi için uygulanan RF prosesinin uzun bir zaman alması ürün kenar ve köşelerin çözülmesi ve dielektrik özelliklerin değişmesi ile birlikte hızlı bir sıcaklık artışı gerçekleşmiştir (Şekil 4.27).



Şekil 4.26 Radyo frekans sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 1 ve 2



Şekil 4.27 Radyo frekans sistem 3’de dondurulmuş tavuk göğsü örneklerine uygulanan çözdürme prosesinin öncesinde üst yüzey ve proses sonrasında üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımı; RF proses 3 ve 4

Çizelge 4.8 Ankara Üniversitesi kontrol ve buzdolabı ortamında çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri

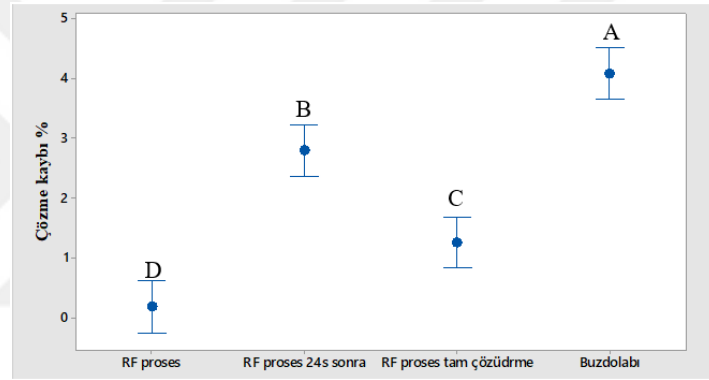
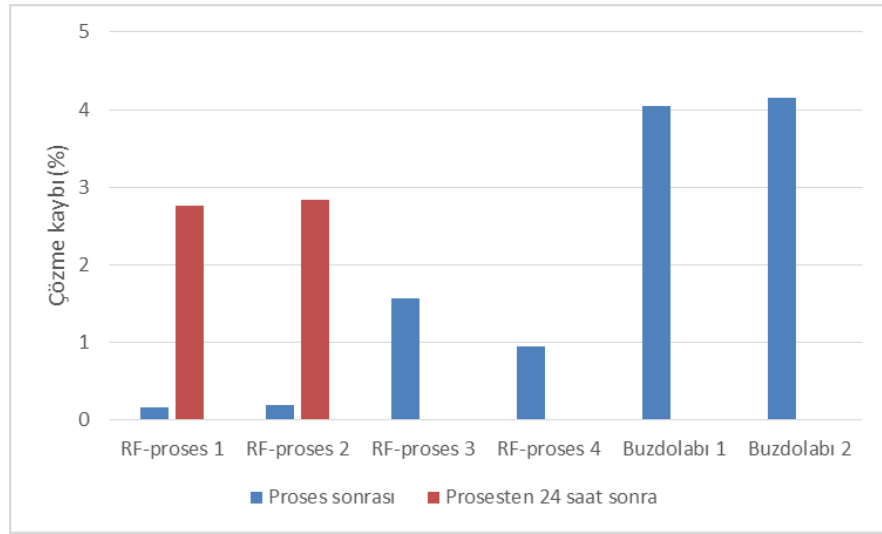
	Kontrol 1	Kontrol 2	Kontrol 3	Buzdolabı 1	Buzdolabı 2
Köşe parça üst					
L*	57,98±0,52 ^{bc}	56,45±1,83 ^c	57,01±2,4 ^c	55,57±1,01 ^c	56,25±1,01 ^c
a*	3,99±0,84 ^{ab}	0,33±0,1 ^c	1,86±1,30 ^{bc}	2,67±0,70 ^{abc}	2,47±0,07 ^{abc}
b*	6,99±0,95 ^{cd}	6,08±0,74 ^d	6,33±0,31 ^{cd}	10,10±0,42 ^a	6,81±0,74 ^{cd}
ΔE				8,05	6,76
Köşe parça iç					
L*	55,50±0,74 ^a	56,97±1,90 ^a	56,02±1,83 ^a	57,46±4,24 ^a	58,86±1,72 ^a
a*	3,26±0,89 ^{ab}	1,89±1,65 ^{ab}	2,17±0,72 ^{ab}	3,48±0,32 ^{ab}	2,39±0,60 ^{ab}
b*	4,41±0,74 ^c	5,8±0,46 ^{bc}	4,29±0,95 ^c	8,82±1,60 ^a	7,64±1,19 ^{ab}
ΔE				9,34	7,58
Merkez parça üst					
L*	57,4±0,16 ^{cde}	57,98±0,77 ^{de}	60,65±0,74 ^{ab}	55,73±0,84 ^c	56,60±1,02 ^{de}
a*	3,52±0,14 ^a	0,32±0,40 ^d	0,48±0,22 ^{cd}	1,06±0,14 ^{bcd}	2,07±0,26 ^b
b*	4,53±0,22 ^c	4,70±0,16 ^c	5,00±0,41 ^c	7,81±0,22 ^a	6,30±0,37 ^b
ΔE				9,10	3,57
Merkez parça alt					
L*	57,95±1,32 ^{abc}	55,5±2,18 ^{abc}	57,45±1,65 ^{abc}	55,00±0,49 ^{bc}	53,40±1,78 ^c
a*	2,79±1,45 ^{ab}	1,73±0,25 ^b	2,76±0,81 ^{ab}	1,50±0,24 ^b	1,72±0,31 ^b
b*	5,3±1,20 ^{cd}	4,62±0,32 ^d	5,63±0,86 ^{cd}	7,64±0,53 ^{bcd}	6,93±1,15 ^{bcd}
ΔE				5,38	8,12

*Her parçada her renk değeri kendi içinde istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.9 Ankara Üniversitesi radyo frekans sisteminde çözündürme prosesi uygulanan tavuk göğsü örneklerinden alınan iki parçadan elde edilen renk değerleri

	RF-proses 1	RF-proses 2	RF-proses 3	RF-proses 4
Köşe parça üst				
L*	61,58±0,68 ^a	57,12±0,41 ^c	61,01±0,55 ^{ab}	59,82±1,00 ^{abc}
a*	2,94±0,43 ^{ab}	4,43±1,89 ^a	2,42±0,22 ^{abc}	1,84±0,37 ^{bc}
b*	7,97±0,48 ^{bcd}	10,07±1,06 ^a	9,67±0,53 ^{ab}	8,26±0,50 ^{abc}
ΔE	11,35	9,27	12,65	5,19
Köşe parça iç				
L*	60,73±0,29 ^a	56,44±1,5 ^a	58,85±2,00 ^a	57,82±1,94 ^a
a*	2,93±2,06 ^{ab}	2,93±1,07 ^{ab}	5,56±1,08 ^a	0,35±0,24 ^b
b*	6,50±0,53 ^{abc}	8,30±0,67 ^{ab}	6,96±1,30 ^{abc}	7,52±1,14 ^{ab}
ΔE	11,96	6,16	8,10	7,17
Merkez parça üst				
L*	61,77±0,40 ^a	57,00±0,18 ^{cde}	61,48±1,03 ^a	58,98±0,70 ^{bc}
a*	1,81±0,57 ^b	1,50±0,56 ^{bc}	1,74±0,26 ^b	0,44±0,36 ^d
b*	6,26±0,278 ^b	8,15±0,40 ^a	7,59±0,15 ^a	4,90±0,73 ^c
ΔE	5,98	7,21	8	0,56
Merkez parça alt				
L*	58,03±1,28 ^{abc}	60,32±1,62 ^a	58,48±2,44 ^{ab}	56,26±2,32 ^{abc}
a*	1,48±0,32 ^b	5,45±2,01 ^a	4,05±1,08 ^{ab}	1,61±0,92 ^b
b*	5,56±0,58 ^{cd}	11,24±0,62 ^a	8,09±0,5 ^{abc}	8,89±2,59 ^{ab}
ΔE	1,08	28,51	6,70	7,46

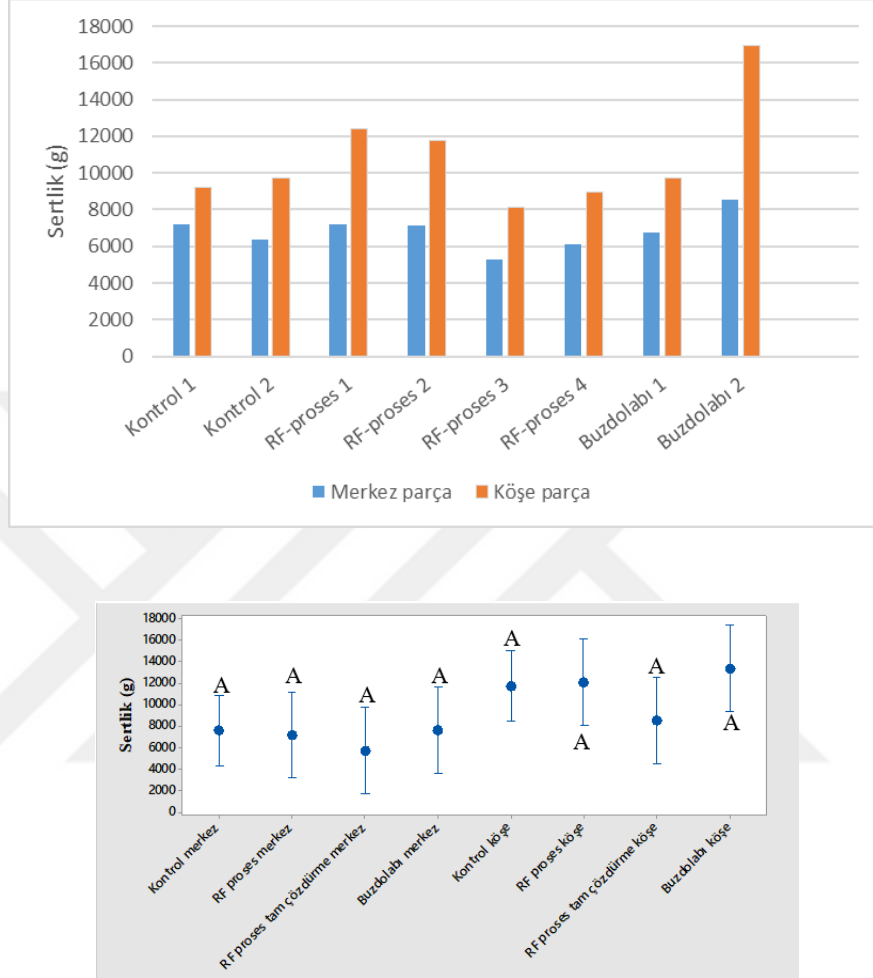
*Her parçada her renk değeri kendi içinde istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.28 Ankara Üniversitesi kurumunda radyo frekans sistem 3 ve buzdolabı koşullarında dondurulmuş tavuk örnekleri ile gerçekleştirilen çözündürme proseslerindeki çözme kaybı değerleri ve karşılaştırılması

Proses öncesi ve sonrası ürün ağırlığı tartılarak çözme kaybı değeri hesaplanmıştır. RF prosesinde üründe çok az bir kayıp olduğu görülmüştür, ancak ürünün faz değişimi sıcaklığına yeni geldiğini ve donuk bölgelerin RF-proses 1 ve 2’de olduğu gözlenmiştir. Aynı ürünler 24 saat buzdolabı ortamında bekletildiğinde çözme kaybında ciddi artış meydana gelmiştir. RF sistemde ürünün tamamen çözündürüldüğü proseslerde ise çözme kaybı beklenildiği gibi yarı saatlik prosesle göre artış gösterirken buzdolabı ortamında çözündürülen örneklerle göre daha az bir çözme kaybı değeri elde edilmiştir (Şekil 4.28). Proses edilen ürünlerde daha önce de anlatıldığı gibi renk ve tekstür analizi için merkez ve köşe olmak üzere iki silindirik parça kesilmiştir. Köşe parçanın üst ve iç

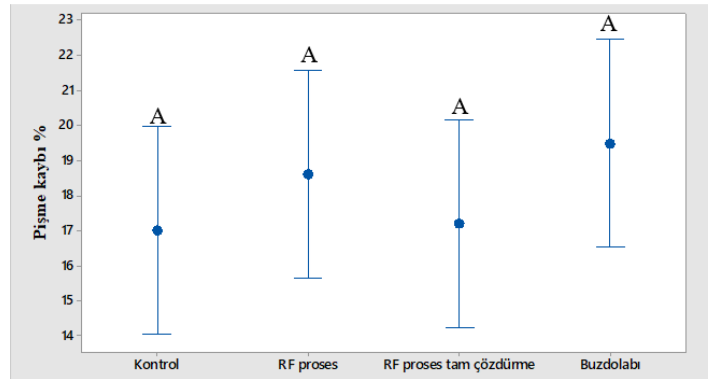
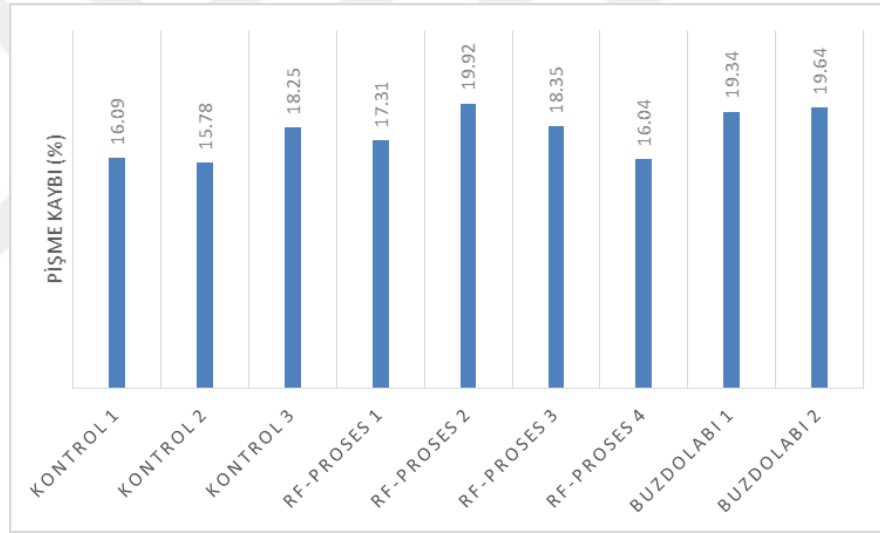
yüzeyi, merkez parçanın üst ve alt yüzeyinde üç farklı noktadan renk ölçümü yapılmıştır (Çizelge 4.8, 4.9).



Şekil 4.29 Ankara Üniversitesi kurumunda çözündürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde iki parçada gerçekleştirilen tekstür analizi ve sertlik değerinin karşılaştırılması

Renk değerlerinin anlamlı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için üç kontrol grubundan elde edilen değerlerin her bir parça için ortalaması alınıp her bir proses için ΔE değeri hesaplanmıştır. RF sistem 2’de gerçekleştirilen deneylerde çözündürülen örneklerin buzdolabı ortamında çözündürülene göre kontrol grubuna daha yakın olduğu belirlenmiştir. RF sistem 3’de elde edilen sonuçlarda buzdolabı ortamında çözündürülen örnekler arasında renk değişimi açısından bazı sapmalar hariç fark gözlenmemiştir. İki farklı kurumda renk değeri açısından farklı sonuçların elde edilmesi RF sistemlerin sahip olduğu farklı

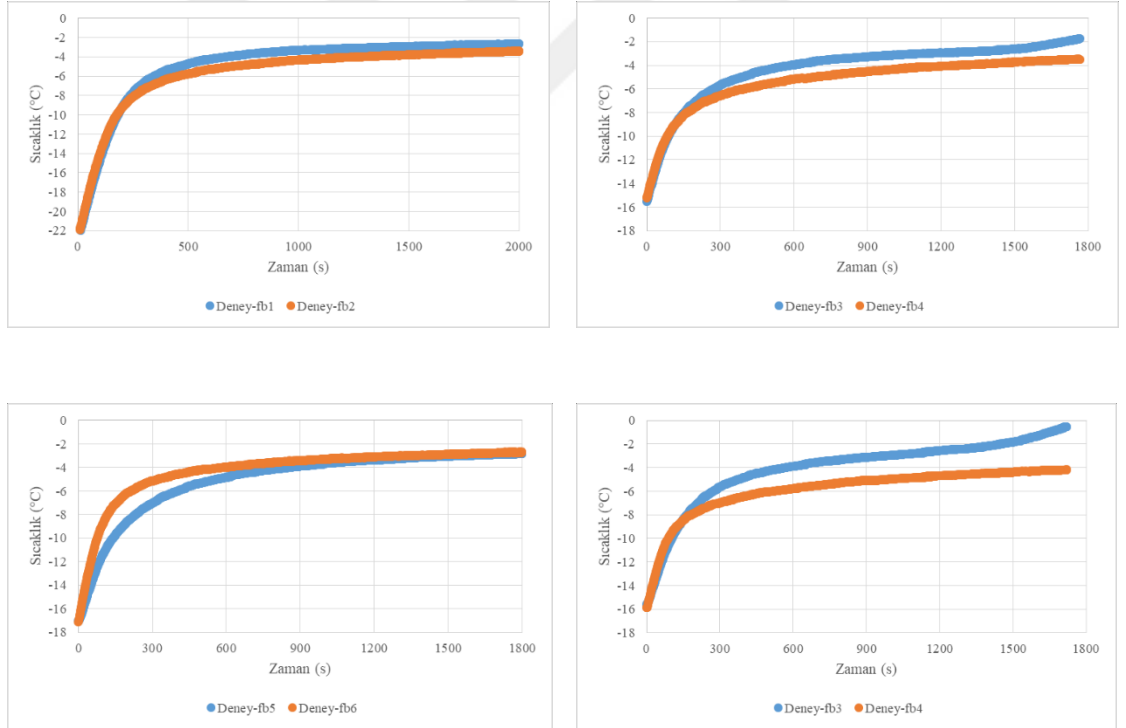
özelliklere ya da buzdolabı çözündürme prosesinin Georgia Üniversitesi kurumunda inkübatör ortamında yapılırken Ankara Üniversitesi kurumunda ev tipi buzdolabı ortamında gerçekleştirilmesi sebep olmuş olabilir. Renk ölçümü için kullanılan parçalarda tekstür profil analizi yapılarak sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik değeri açısından istatistiksel olarak aynı parçalar karşılaştırıldığında bir fark olmadığı bulunmuştur (Şekil 4.29). Proses edilen her bir üründen yaklaşık 10 gramlık üç adet örnek kesilerek 75 °C’de pişirilerek pişme kaybı değeri hesaplanmıştır. Çözdürme prosesinin ürün pişme kaybına bir etkisi olmadığı bulunmuştur (Şekil 4.30). Yu vd. (2005) dondurulmuş tavuk göğsü örneklerini +18 °C’de su içerisinde ve 0°C buzdolabında çözündürme işlemi uygulayıp pişme kaybı değeri karşılaştırılmıştır. İstatistiksel olarak pişme kaybı değeri açısından bir fark bulunmamıştır.



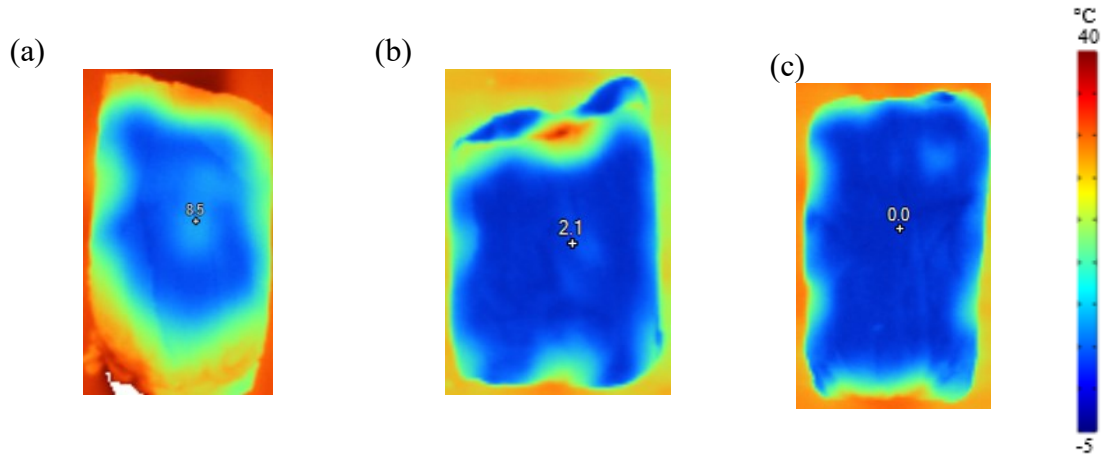
Şekil 4.30 Ankara Üniversitesi kurumunda çözündürme prosesi uygulanmış dondurulmuş tavuk örneklerinde üç adet ile gerçekleştirilen pişme kaybı analizi

4.4 Dondurulmuş Blok Ton Balığı Çözdürme Deneyleri

RF uygulamanın diğer bir dielektrik ısıtma yöntemi olan mikrodalga uygulamadan en önemli farkı düşük frekans-yüksek dalga boyuna sahip olarak geniş hacimli ürünlerin prosesine imkân sağlamasıdır. Bu bölümde blok halindeki ton balığı örneklerine Ankara Üniversitesi RF sistemde çözündürme prosesi uygulanmıştır. Deneyler için üç farklı ≈ 6 kg ağırlığındaki dondurulmuş ton balığı örnekleri kullanılmıştır. Her bir örnekte fiber optik prob lar farklı noktalara yerleştirilerek ürün içi sıcaklık değişimi RF proses süresince takip edilmiştir. Şekil 4.31 ton balığı örneklerinde (Şekil 3.8 ve 3.9) RF uygulama sürecinde meydana gelen sıcaklık değişimini göstermektedir. Ürün yüzeyinde meydana gelen aşırı sıcaklık artışlarından (≈ 35 - 40 °C) dolayı (Şekil 4.32) deneysel çalışmalar ürün iç sıcaklığı en az -4 °C'ye ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Bu koşullar göz önüne alınarak gerçekleştirilen deneylerde proses süreleri 1800 ve 2000 s olmuştur.



Şekil 4.31 Ton balığı filetolarında elde edilen sıcaklık değişimleri (a) fileto-1 – fb1-fb2 noktalarında; (b) fileto-2 – fb3-fb4 noktalarında; (c) fileto-2 – fb5-fb6 noktalarında; (d) fileto-3 – fb3-fb4 noktalarında elde edilen sıcaklık değişimleri

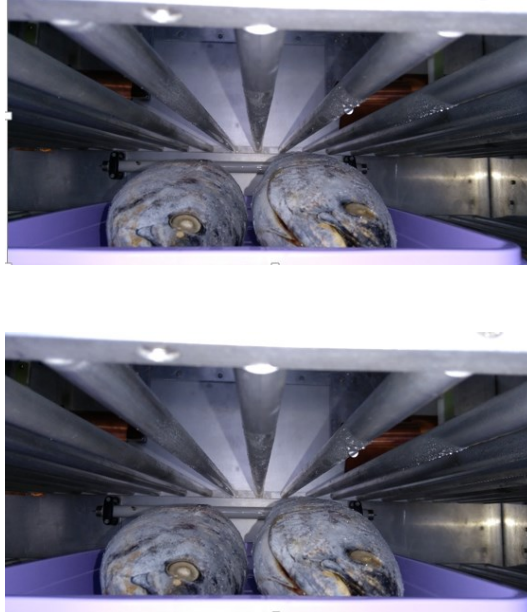


Şekil 4.32 Deneysel radyo frekans çözündürme çalışmalarında ton balığı fileto yüzeylerinde elde edilen sıcaklık değişimi (a) fileto-1; (b) fileto-2; (c) fileto-3

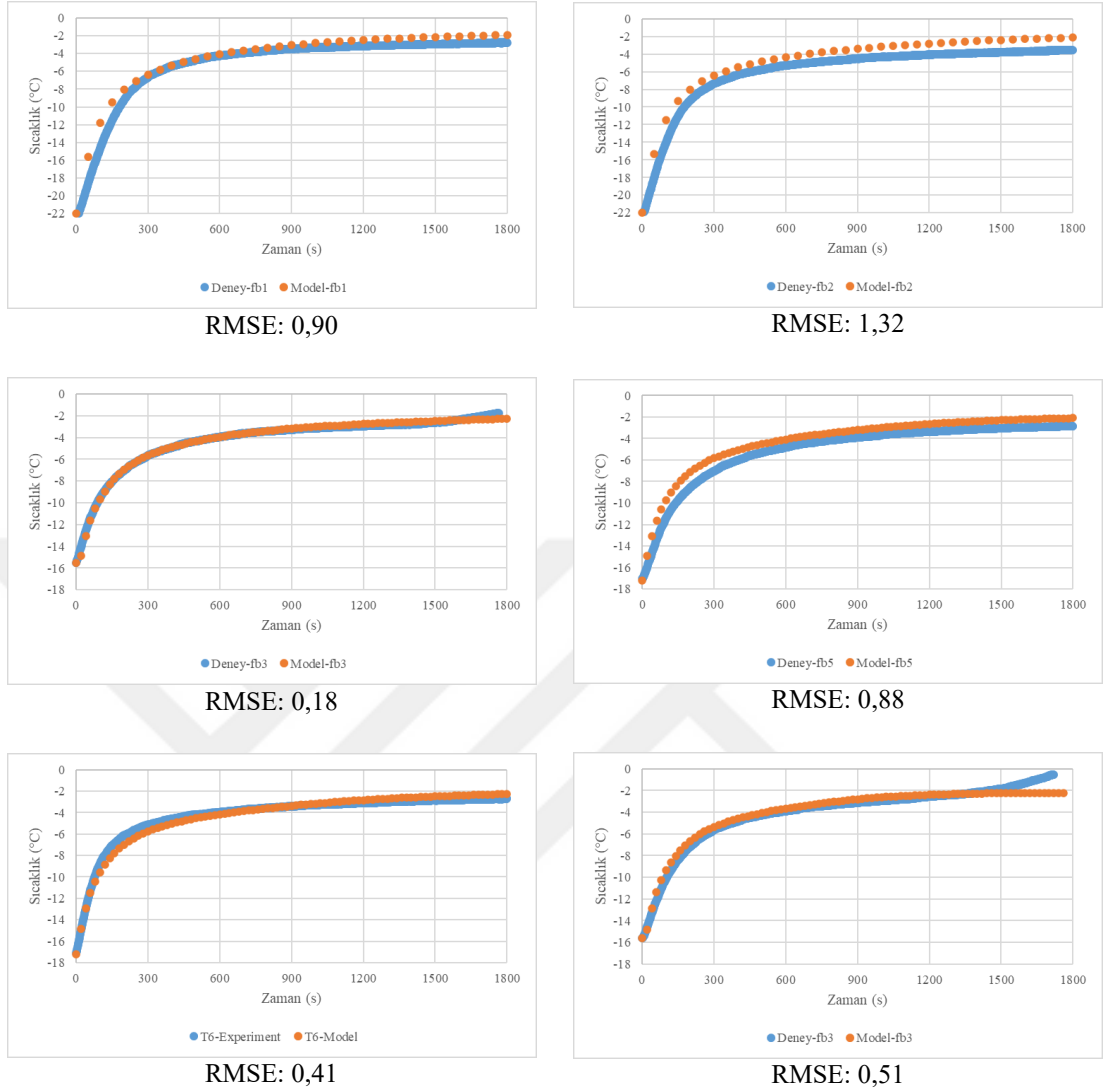
Ürün üst yüzey sıcaklığından görüldüğü gibi ürün kenar ve köşe bölgelerinde çözündürme prosesinde yüksek sıcaklık problemi gözlenmiştir (Şekil 4.32). Proses edilen blok ton balığı ürünlerinin, kenar ve köşe noktalarının girintili ve çıkıntılı olması, düzgün bir geometrik sahip olmaması da bu bölgelerde elektrik alan girişiminden dolayı hızlı sıcaklık artışlarına sebep olmuştur. Deneysel çalışmalar sürecinde elde edilen sonuçlar aynı zamanda devam eden TUBİTAK 1001 projesi-217O070 kapsamında da kullanılmıştır. Bu çalışmalar sırasında ürünün düşük sıcaklığından dolayı sistem içerisinde, hava sıcaklığının azalmasına bağlı olarak, elektrotlar üzerinde bir nem yoğunlaşması olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.33). Buna benzer durum blok ton balığı deneylerinde de belirlenmiştir. Sistem içerisinde doğal konveksiyonla meydana gelen ısı transferine bağlı olarak hava sıcaklığının azalması ve elektrot yüzeylerinde yoğunlaşma olması RF uygulama potansiyelinde azalmalara sebep verebileceği gibi performans düşüklüğünün yanı sıra uzun vadede korozyon gibi problemler de ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, toprak elektrottaki nem yoğunlaşmasına bağlı olarak sistem içerisinde elektrik boşalması gibi problemler de meydana gelebilmektedir. Sistem içi nem oranı ve yoğunlaşmanın elektronik sistemler üzerine etkisi literatürde farklı açılardan çalışma alanı olan önemli bir konu olarak göze çarpmaktadır. Bu durum elektrik boşalmasına bağlı olarak proses sırasında sistem içerisinde kıvılcım oluşumuna da sebep olabilecek tehlikedir. Örneğin psikometrik diyagramda 20 °C kuru hava sıcaklığı ve %70 bağıl nem koşullarında yoğunlaşma sıcaklığı 14,36 °C'dir. Yoğunlaşma durumu ve bu parametre göz

önünde bulundurularak geliştirilen matematiksel modellerin sadece sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulunda değil aynı zamanda doğal konveksiyon durumu içinde yapılmasına karar verilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda konveksiyon ısı transfer katsayısı 5-20 W/m²-K arasında değişen sabit değerler tercih edilmiştir. Jiao vd. (2015) buğday tanesi ısıtmasında 5 W/m²-K, Uyar vd. (2015) çözdürme prosesinde 10 W/m²-K ve Jiao vd. (2014) düşük nemli gıdaların ısıtılmasında 15 W/m²-K konvektif ısı transfer katsayısını sınır koşulu olarak tanımlamışlardır. Liu vd. (2014) ve Llave vd. (2015) yaptıkları çalışmada doğal konveksiyon değerini belirlemek yerine onun muadili olacak şekilde termal iletkenliği on ile yüz kat arası bir değerde arttırmışlardır. Shrestha ve Baik (2019) ve Yu vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda radyo frekans uygulaması modellerine doğal konveksiyonu ekleyerek öncü olmuşlardır. Bu çalışmalarda ürün etrafındaki havanın hareketi ve bunun sıcaklık dağılımına etkisi gösterilmiştir. Ancak doğal konveksiyon tanımlanan matematiksel modellerin çalışma ve tamamlanma süreleri sabit konveksiyon ısı transferi sınır koşuluna göre karşılaştırılamayacak kadar uzun sürdüğünden araştırmacılar genel olarak bu yaklaşımı tercih etmemişlerdir.



Şekil 4.33 Radyo frekans uygulama çözdürme prosesi sırasında sistem içi sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelen yoğuşmanın üst elektrotlarda gözlenmesi

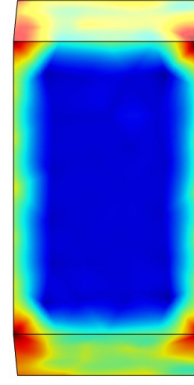
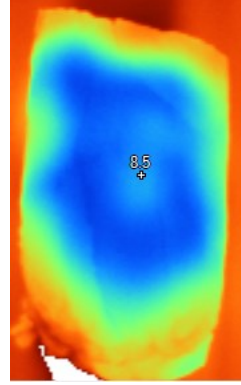


Şekil 4.34 Ton balığı deney sonuçlarının model sonuçları ile karşılaştırılması: (a) fileto – 1, fb1 noktası; (b) fileto – 1, fb2 noktası; (c) fileto – 2, fb3 noktası; (d) fileto – 2, fb5 noktası; (e) fileto -2, fb6 noktası; (f) fileto – 3, fb3 noktası

Doğal konveksiyonun da dahil edildiği matematiksel model çalışmalarında, ürün sıcaklık değişiminin yanı sıra sistem içerisindeki elektrotların ve ürün sıcaklık değişiminin de belirlenecek olması yoğunlaşma problemi ve endüstriyel uygulamalarda bu problemin önlenmesi konusuna dair veri sunacaktır. Bu kapsamda dondurulmuş ton balığı örneklerinin çözündürülmesi prosesine yönelik geliştirilen matematiksel model çalışmalarında ilk önce sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulunda daha sonra da doğal konveksiyon durumu dahil edilerek sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan bu bölümün sonuçları Altın vd. (2022) makalesinde literatürde RF çözündürme

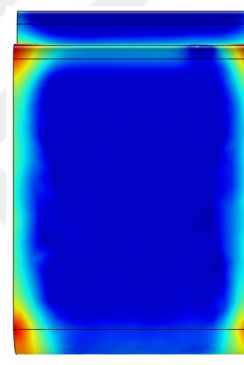
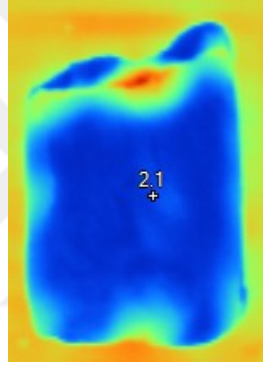
prosesinde doğal konveksiyonun proses sıcaklık değişimlerine etkisinin belirlenmesi kapsamında sunulmuştur.

Fileto 1

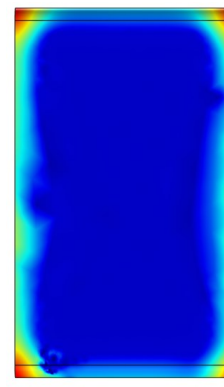
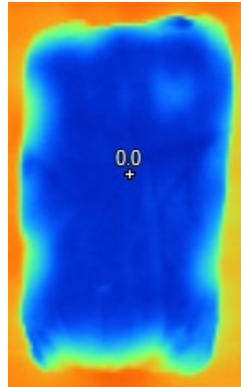


°C
40

Fileto 2

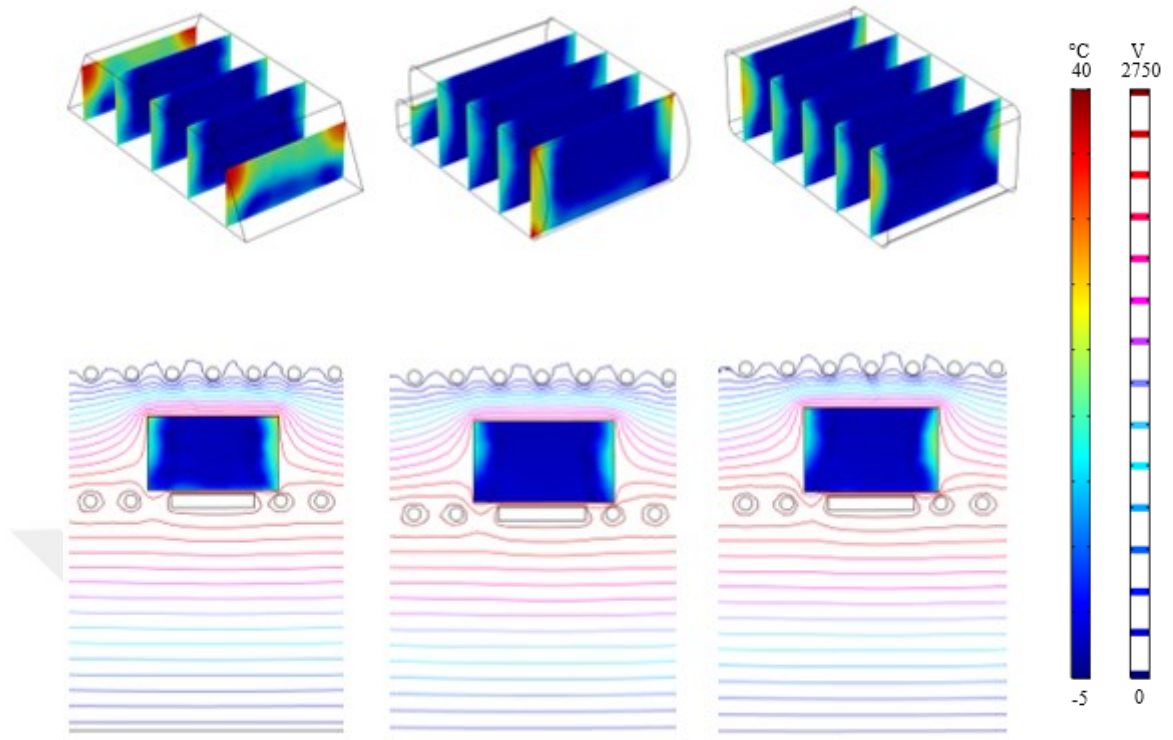


Fileto 3



-5

Şekil 4.35 Dondurulmuş ton balığı filetolarına uygulanan radyo frekans çözündürme işlemi sonucu elde edilen yüzey sıcaklık dağılımının model sonuçların ile karşılaştırılması: (a) fileto-1; (b) fileto-2; (c) fileto 3



Şekil 4.36 (a) x-y düzleminde ürünün farklı kesitlerinden elde edilen sıcaklık dağılımı; (b) x-z düzleminde sistem içerisi elektrik potansiyel (V) değişimi ve ürün içi polarizasyon değişimi (siyah oklar)

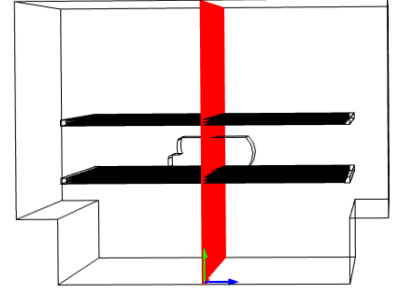
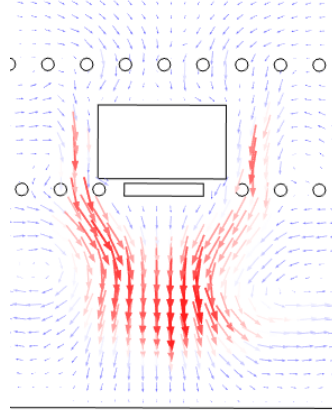
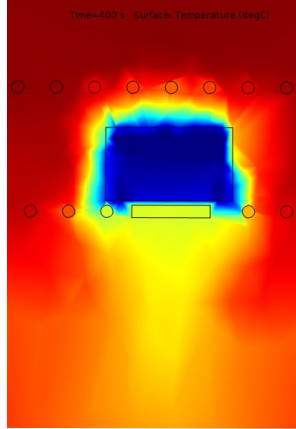
Şekil 4.34’de sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu uygulandığında geliştirilen modellerden elde edilen sıcaklık değişimlerinin fiber optik sensörler ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu bağlamda ton balığı örnekleri içerisine yerleştirilen fiber optik probların yeri Şekil 3.8’de verilmiştir. Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılması kapsamında elde edilen RMSE değerleri de şekil 4.34’de verilmiştir. Lokal sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılmasına ek olarak termal kamera kullanılarak elde edilen ürün yüzey sıcaklık değişimi model sonuçları ile karşılaştırılmış (Şekil 4.35) ve sıcaklık dağılımında sıcak ve soğuk bölge lokasyon ve sıcaklık değerlerinin benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.36’da ürün sıcaklık dağılımı üç farklı ton balığı örneği için farklı kesit alanlarında gösterilmiştir. Kullanılan RF sistemde, potansiyel – voltaj uygulaması alt elektrot grubuna yapıldığından ve üst elektrot topraklama olarak davrandığından sistem – ürün içerisindeki elektrik alan değişimi aşağıdan yukarıya doğru gerçekleşmektedir. Bu çalışmalarda elektrik potansiyel uygulanan alt elektrot potansiyel değeri 2750 V olarak kullanılmıştır Ton balığının

dielektrik özellikleri sırt kası olacak şekilde Llave vd. (2014) yapmış olduğu çalışmadan alınmıştır.

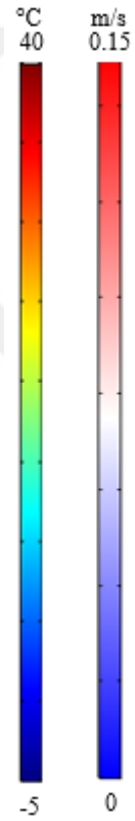
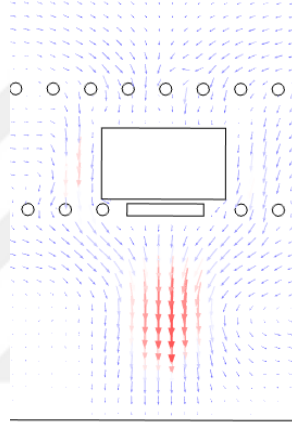
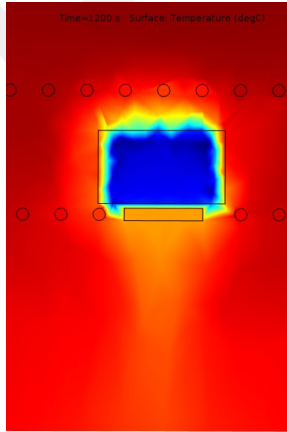
Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi elektromanyetik enerji ürün kenar ve köşelerinde kırılıma uğramakta ve bu bölgelerde enerji yoğunluğundan dolayı sıcaklık artışı hızlı gerçekleşmektedir. Bu durum, sıcaklığın fazla yükseldiği bölgelerde zaman içerisinde mikrobiyal gelişmeye sebep verebilmekte ve görsel ve duyu kalite kayıplarına da yol açmaktadır. Örneğin, ton balıklarının çözündürme prosesinden sonra konserveleme prosesi için işlenmeleri gerekmekte bu nedenle de ürünün yapısal bütünlüğünü koruması tercih edilmektedir. Ancak sıcaklığın $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi temperleme sıcaklığı kabul edilebilecek bir sıcaklığın üstüne çıkması bahsedilen problemleri beraberinde getirmektedir.

Geliştirilen matematiksel modeller sabit ısı transferi sınır koşulu kapsamında deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Ancak yukarıda anlatıldığı gibi geniş hacimli ürünlere RF çözündürme prosesi uygulandığında elektrot yüzeyinde yoğunlaşma problemi gözlenmiştir. RF sistemde çözündürme prosesi uygulanan iki numaralı blok tuna örneği için geliştirilen modele laminar akış modülü eklenerek doğal konveksiyon koşulu altında tekrar çözündürülmüştür. Bu model çalışmasının amacı hem sistem içerisinde doğal konveksiyona bağlı olarak gelişecek olan hava hız profilinin hem de sıcaklık değişiminin belirlenmesi olarak ortaya konmuştur. Bu sistemde dondurulmuş ürünün sistem içerisine yerleştirilmesiyle birlikte ürün etrafında bulunan havanın soğumasıyla doğal konveksiyon hareketi başlamış ve bu durum sistem içerisinde özellikle ürün – hava arayüzünde oluşan hava akış hareketiyle net olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4.37’de sırasıyla sistem içi sıcaklık dağılımı ve hava akış profili gösterilmiştir. İki numaralı ton balığından deneysel çalışma sırasında alınan fiber optik sensör sıcaklık verileri Şekil 4.38’de doğal konveksiyon koşulunda geliştirilen matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda elde edilen RMSE değerleri (Şekil 4.38) etkin bir doğrulama çalışmasının gerçekleştirildiğini göstermektedir.

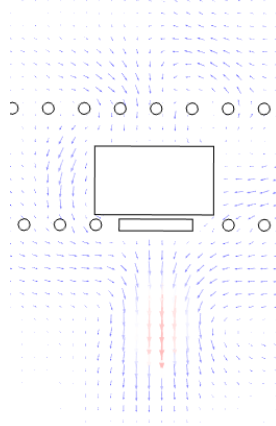
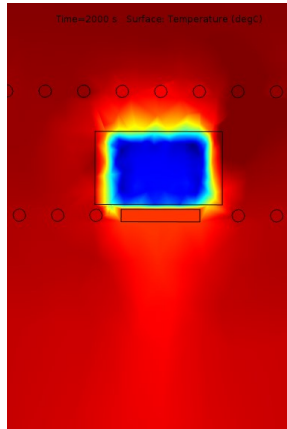
Prosesin 400.s



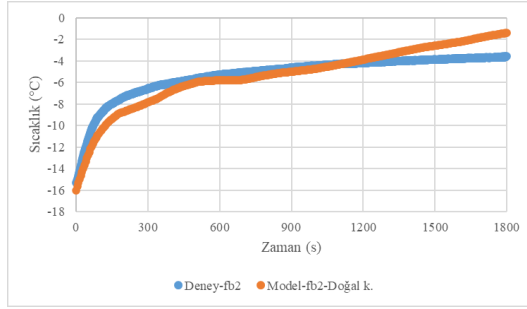
Prosesin 1200.s



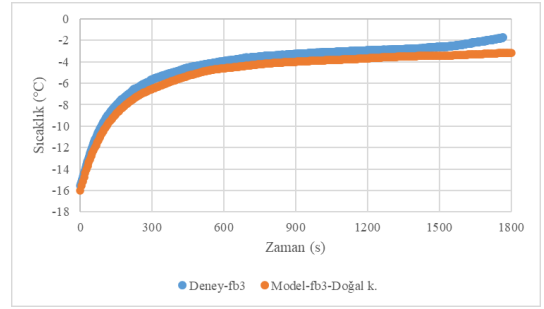
Prosesin 1600.s



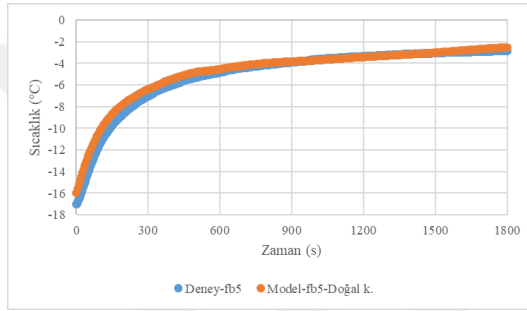
Şekil 4.37 Radyo frekans kavite içerisinde çözündürme prosesi sırasında hava sıcaklığının da belirlenmesi amacıyla geliştirilen modelin merkezinden alınan kesitte sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)



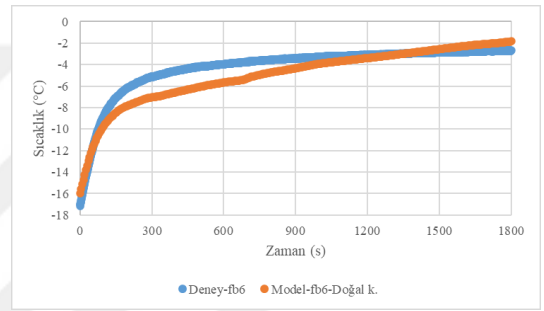
RMSE: 1,05



RMSE: 0,88



RMSE: 0,5

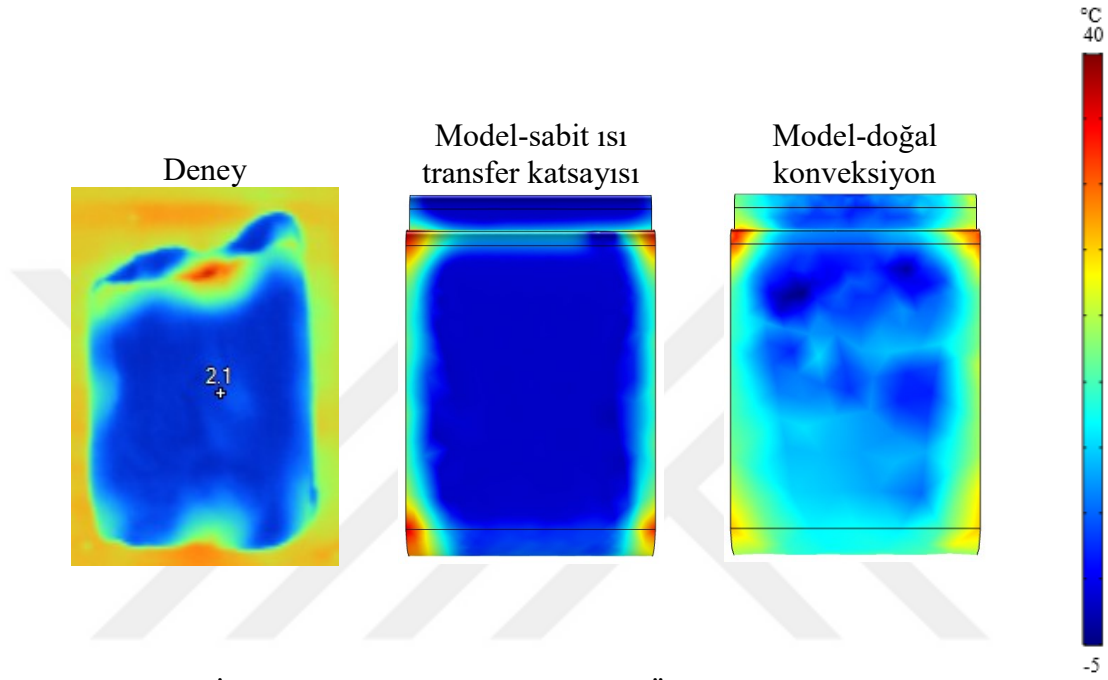


RMSE: 1,17

Şekil 4.38 Ankara Üniversitesi radyo frekans sistemde çözündürülme prosesi uygulanan iki numaralı filetodan deneyler sırasında elde edilen fiber optik sensör sonuçlarının doğal konveksiyon uygulanan modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması

Sabit ısı transferi sınır koşulu uygulanan model gibi fiber optik sensör sonuçları deneysel veriler ile paralellik göstermiştir. İki farklı yaklaşım ile geliştirilen matematiksel modelde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımında iki durum arasında ürün etrafındaki hava hareketinden dolayı bir farklılık gözlenmiştir (Şekil 4.39). Ancak her iki yaklaşımda da sıcak ve soğuk bölgeler deneysel veri ile örtüşmektedir. Doğal konveksiyon durumunda kavite içerisindeki hava sıcaklık değişimi de hesaplanabildiğinden deneyler sırasında ürün etrafına iki adet fiber optik yerleştirilerek ölçüm alınarak karşılaştırma için kullanılmıştır. Ürün etrafındaki hava sıcaklığının proses başında ürünün soğuk olmasından kaynaklı olarak hızlı bir şekilde azaldığı daha sonra ürünün de ısınmasıyla birlikte hava sıcaklığının da yükselişe geçtiği gözlenmiştir (Şekil 4.40). Bu aşamada ürün sayısının kavite içerisindeki hava sıcaklığına etkisi gözlemlemek adına iki numaralı blok ton balığı için geliştirilen modelde ürünün sağına ve soluna birer örnek daha eklenerek

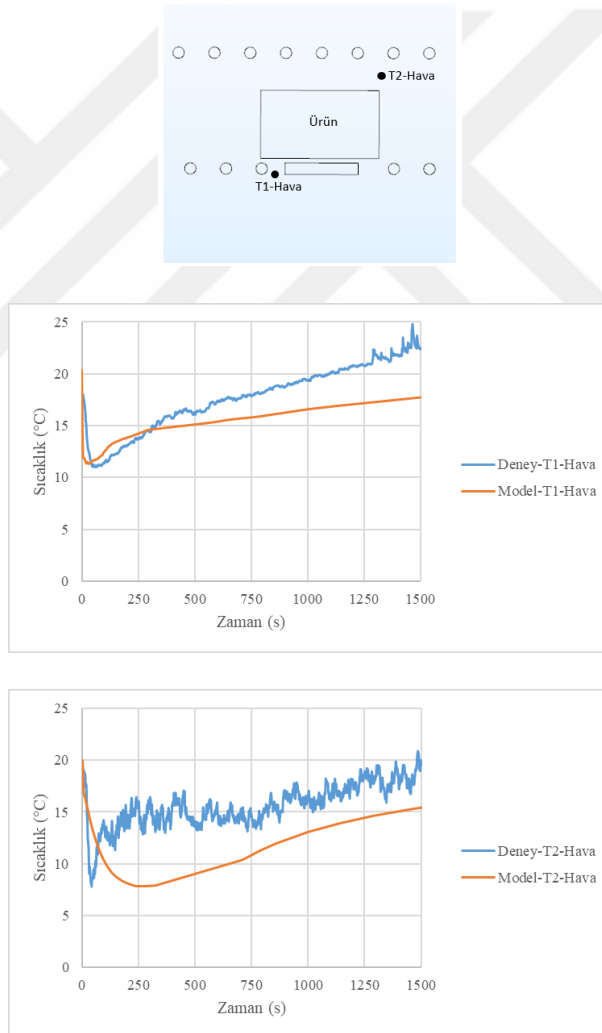
model tekrarlanmıştır. Bu kapsamda proses edilen üç ürünün de yüzey sıcaklık dağılımının benzer olduğu dikkat çekmiştir. Ortadaki ürün alt elektrotun merkezine yerleştirilirken diğer iki ürün eşit uzaklığa yerleştirilmiştir. Aynı RF sisteminde gerçekleştirilen çalışmada elektrot merkezinden eşit uzaklıktaki ürünlerin benzer ısınma hızı oldukları belirlenmiştir.



Şekil 4.39 İki numaralı filetonun Ankara Üniversitesi radyo frekans sisteminde çözdürme prosesi sonunda üst yüzeyinin sıcaklık dağılımı, sabit ısı transfer katsayısı sınır koşulunun tanımlandığı matematiksel model ve doğal konveksiyon yönteminin uygulandığı model

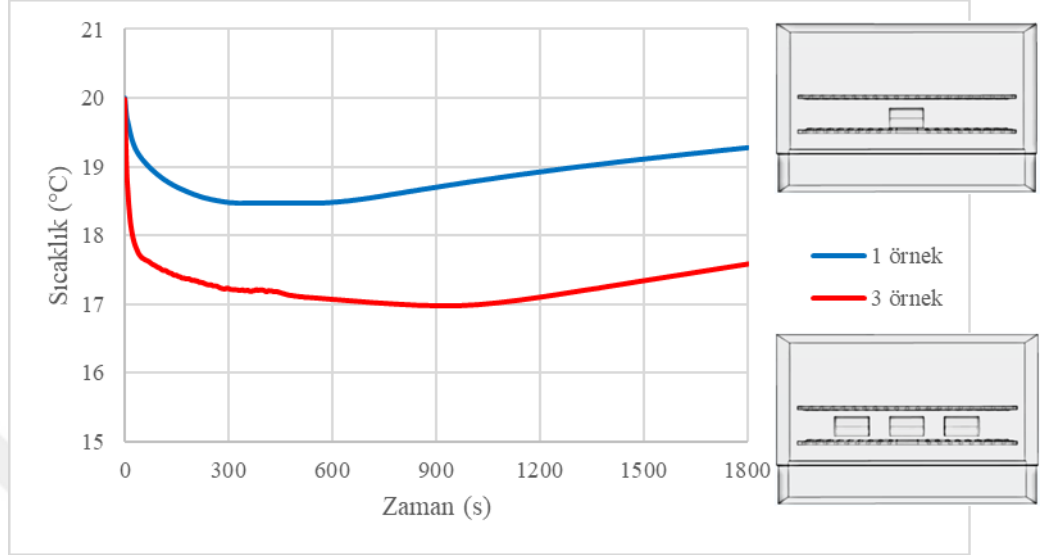
RF dalga boyunun uzun olmasına bağlı olarak birden fazla ürün için aynı sonuçlar elde edilebilecek şekilde proses edilebilmektedir. Bu yönüyle radyo frekans sistemler endüstriyel üretim için uygun bir ortam sağlamaktadır. Tek ve üç ürün kullanılan matematiksel modellerde tüm kavitedeki havanın sıcaklık değişimi şekil 4.41’de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi ürün sayısı arttıkça kavite içerisindeki hava sıcaklığı radikal bir şekilde düşmektedir. Ancak ürünler arasında yukarıda da açıklandığı üzere önemli bir sıcaklık farkının oluşmaması da endüstriyel uygulama açısından önemli bir sonuç olarak dikkat çekmektedir.

Ancak, endüstriyel bir RF sistemde proses sırasında potansiyel elektrottan üretilen elektromanyetik enerjinin tamamından faydalanmak için aynı anda üç adetten fazla ürün proses edileceği düşünülürse kavite içerisindeki sıcaklık hızlı bir şekilde düşecek ve bu durum yoğunlaşma sorunu ile elektrik boşalması gibi sorunların ortaya çıkmasına sebep olabilecektir. Tez çalışmasının bu bölümünde elde edilen bilgiler son bölümde geliştirilecek olan endüstriyel RF tünel tasarım modellerinde kullanılmıştır. Özellikle çözündürme prosesi sırasında doğal konveksiyonun ürün sıcaklık dağılımına etkisi kesikli ve sürekli RF sistemde de incelenmiştir. Bunun yanında kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun sıcaklığı da sürekli bir proses için önem teşkil etmektedir.

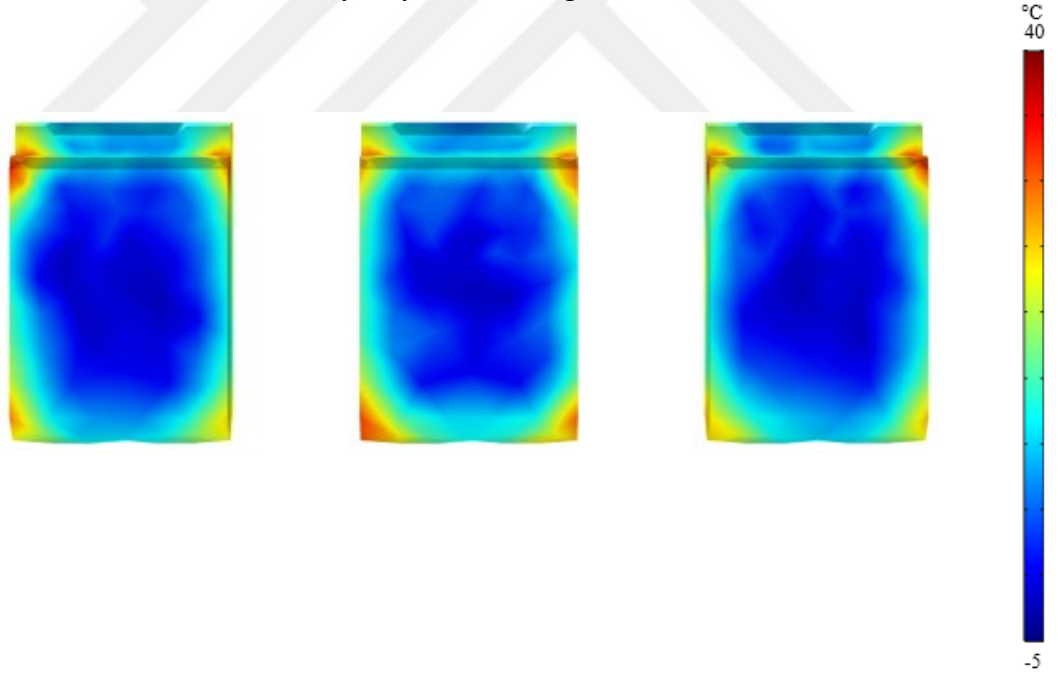


Şekil 4.40 Ankara Üniversitesi radyo frekans sistemde çözündürme işlemi uygulaması sırasında ürün etrafındaki havanın sıcaklığının belirlenmesi için yerleştirilen fiber optik sensörlerin konumları ve geliştirilen matematiksel model ile karşılaştırılması

Kavite içerisindeki havanın değişimi



Model sonunda ürünlerin üst yüzey sıcaklık dağılımı



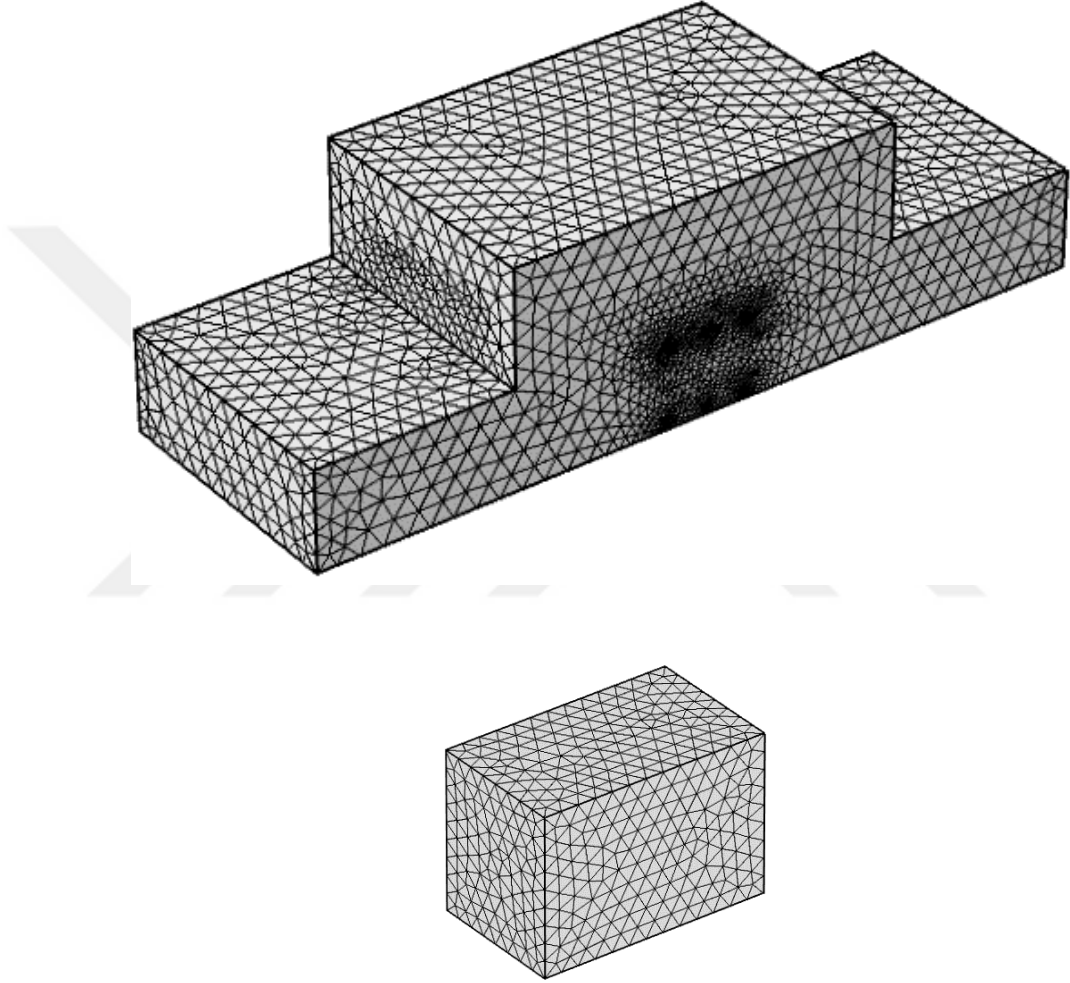
Şekil 4.41 İki numaralı fileto için geliştirilen matematiksel modelin kavite içerisinde üç ürün olması durumunda kavite içerisindeki hava sıcaklığının proses sırasında değişimi ve proses sonunda ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı

4.5 Dondurulmuş Ürünlerin Çözdürülmesi Amacıyla Endüstriyel Ölçekte Radyo Frekans Sistem Tasarımı

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve geliştirilen matematiksel model çalışmalarının sonuçları RF prosesinde üründe hacimsel bir ısınma gözlenirse de ürünün köşe ve kenar bölgelerinde yüksek sıcaklık problemleri gözlenmiştir. Özellikle çözdürme prosesinde dielektrik özelliklerin çözünme sıcaklığından sonra radikal bir şekilde değişmesi ile bu sorun daha net olarak ortaya çıkmaktadır. Anderson ve Singh (2006) gıdaların çözdürme prosesinde hava üfleme jetlerinin proses süresini yaklaşık dört kat kısaltabileceğini göstermişlerdir. Haşlanmış yumurtanın soğuması prosesinde de hava üfleme jetleri kullanılmıştır Erdogdu vd. (2007). Hava üfleme jetleri sayesinde ürün etrafında yüksek konveksiyon ısı transfer katsayısı elde edilerek bu yöntemin su püskürtme prosesi kadar etkili olduğu gösterilmiştir. Radyo frekans sistemlerde hava üfleme sistemler yaygın olarak kurutma prosesinde kullanılmıştır. Peng vd. (2019) elma dilimi kurutulmasında hava jet sistemi ile sıcak hava üflemeli radyo frekans sistemini iki aşamalı olarak hibrit bir proses geliştirmişlerdir. Bu iki sistemde ayrı ayrı elma dilimine kurutma işlemi uygulandığında proses süresi sırasıyla 510 ve 310 dakika sürmüştür. Ancak iki sistem kullanılarak iki aşamalı bir kurutma yapıldığında proses süresi 200 dakikaya gerilemiştir. İki aşamalı kurutma prosesinin ürün kalitesi üzerine de pozitif etkisi olduğu yapılan analiz sonuçları ile gösterilmiştir. Hava üfleme sistemlerinin gıda prosesinde etkili olması ve radyo frekans sistem ile kombine edilemeye uygun olmasından dolayı RF çözdürme prosesinin soğuk hava üfleme ile kombine edilmesi bu bölümde incelenmiştir.

Bu bölümde geliştirilecek olan endüstriyel boyuttaki RF sistemlerde sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi hem sabit ısı transfer katsayısı sınır koşulu hem de doğal konveksiyon durumu için gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında ürün yüzeyinde oluşan hızlı sıcaklık artışlarının önlenmesi amacıyla RF uygulama ile hava üflemeli sistemler kombine edilmiştir. Tasarlanan endüstriyel sistemler kesikli ve sürekli olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Kesikli RF sistemde tek bir ürün kavite içerisinde proses boyunca sabit tutularak model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kesikli sistemde hava üfleme sistemi kavitenin yan duvarlarına yerleştirilen hava jetleri ile kombine edilmiştir. Sürekli RF

sistemde ise bir ve iki kaviteli olmak üzere iki farklı tasarım yapılmıştır. İlk tasarım çalışmalarında ilk kavitenin sonuna kavitenin üst duvarına dörtgen yivli slot jetler eklenmiştir. İki kavitenin kullanıldığı ikinci RF tünel tasarımında iki kavite arasına yine üst kavite duvarlarına dörtgen yivli slot jetler eklenerek model geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



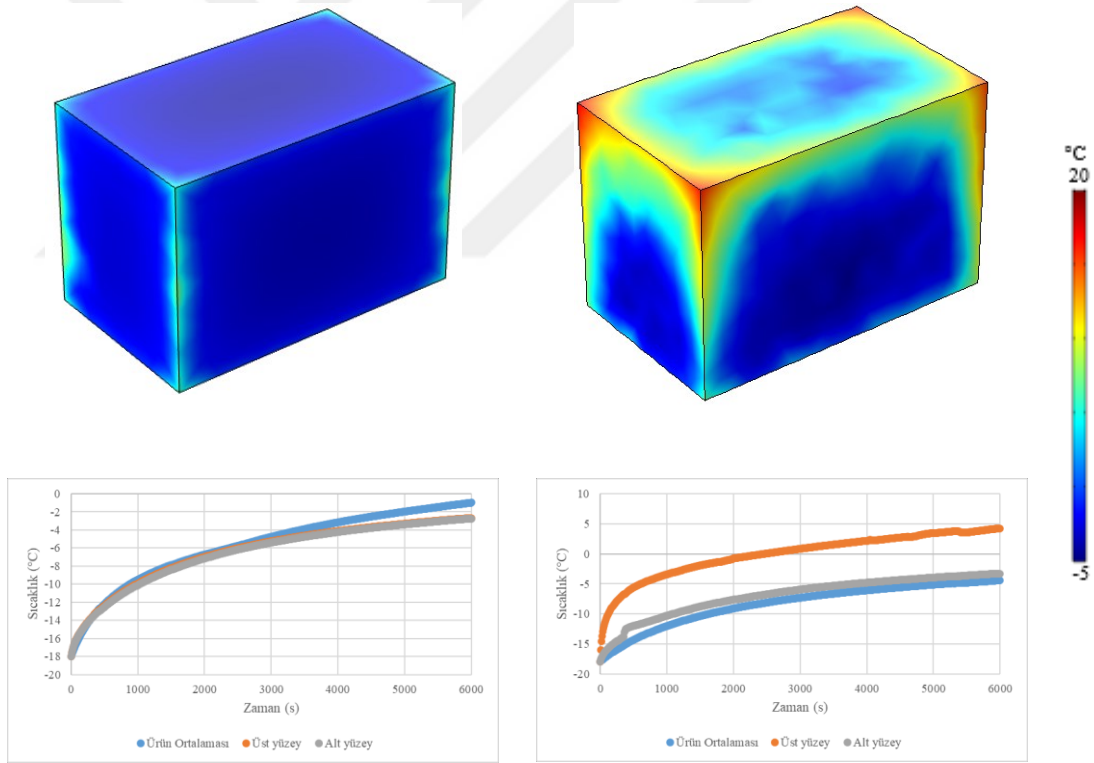
Şekil 4.42 Hava üfleme jetleri ile kombineli radyo frekans tek kaviteli kesikli sistem ve ürün için 192.573 elementli ağ yapısı

Hava üfleme destekli kesikli RF sistem modellerinde 1000 V üst elektrot potansiyeli ve 0,25 – 1 ve 5 m/s jet hız değerleri kullanılarak vurgulu hava jetlerinin ürün sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir. Ürün başlangıç sıcaklığı -18 °C ve ürün boyutları 25×15×17 cm olarak kullanılmıştır. Bu boyutlar yaklaşık olarak 6-7 kg ağırlığında bir ton balığı filetosunun boyutları olarak kabul edilebilir. Potansiyel uygulanan elektrot ile ürün

üst yüzeyi arasındaki mesafe 8,5 cm olarak uygulanmıştır. Bu değer yapılan ön modelleme çalışmalarında 1000 V güç uygulandığı durumda ürünün belli bir sıcaklığa ulaşması için gerekli olan yükseklik olarak belirlenmiştir. Kesikli RF sistemde kavite duvarlarına ürünün üst ve alt yüzeyine denk gelecek şekilde üçer adet çapı 1 cm olan jetler yerleştirilmiştir. Bu değerlere daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen bilgi birikimi kapsamında karar verilmiştir (Erdoğan vd. 2005; 2007). Vurgulu hava jeti giriş noktalarında kullanılacak olan yüksek hızlardaki hava hızı – basınç değişimlerinin doğru çözülebilmesi amacıyla yoğun bir ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.42’de de görüldüğü gibi ürün içerisinde faz değişimi sırasında meydana gelecek sıcaklık değişiminin doğru hesaplayabilmek amacıyla yoğun bir ağ yapısı kullanılmıştır.

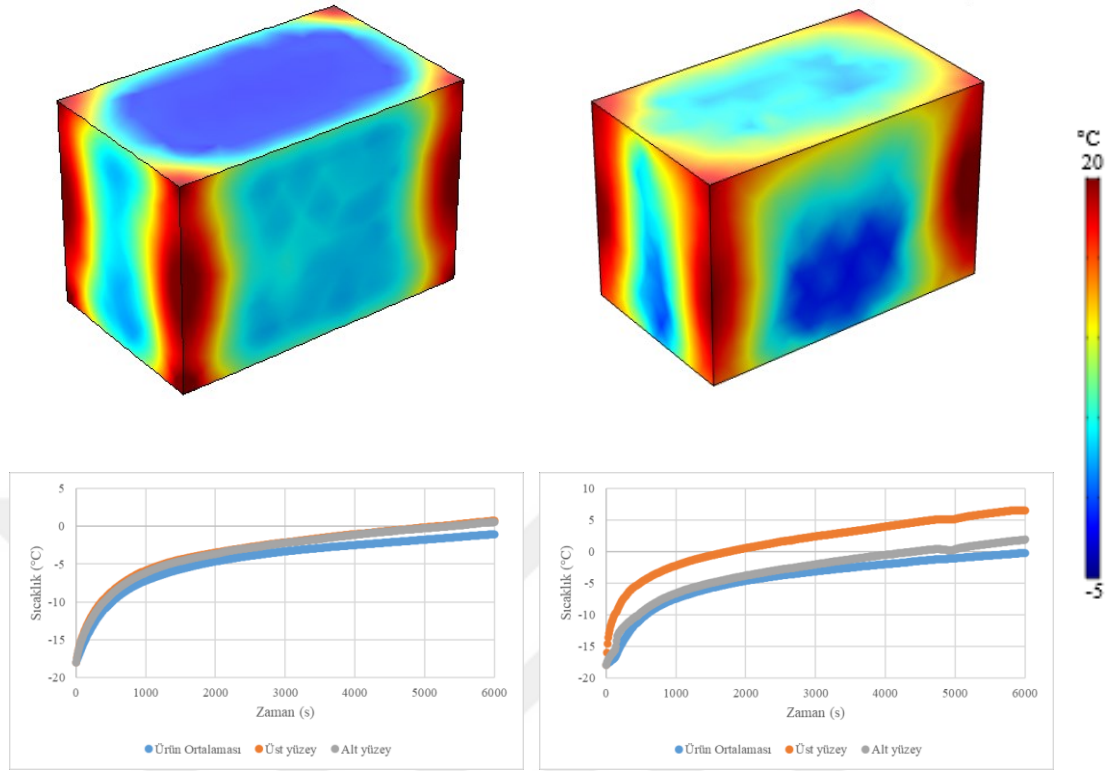
Sabit ısı transfer katsayısı sınır koşulu

Doğal konveksiyon durumu



Şekil 4.43 Tek kaviteli kesikli radyo frekans sistemde sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumunda 1000 V güç uygulandığında proses sonundaki ürün yüzey sıcaklık ortalaması ve proses sırasında ürün hacimsel ortalama, üst ve alt yüzey

Sabit ısı transfer katsayısı sınır koşulu Doğal konveksiyon durumu



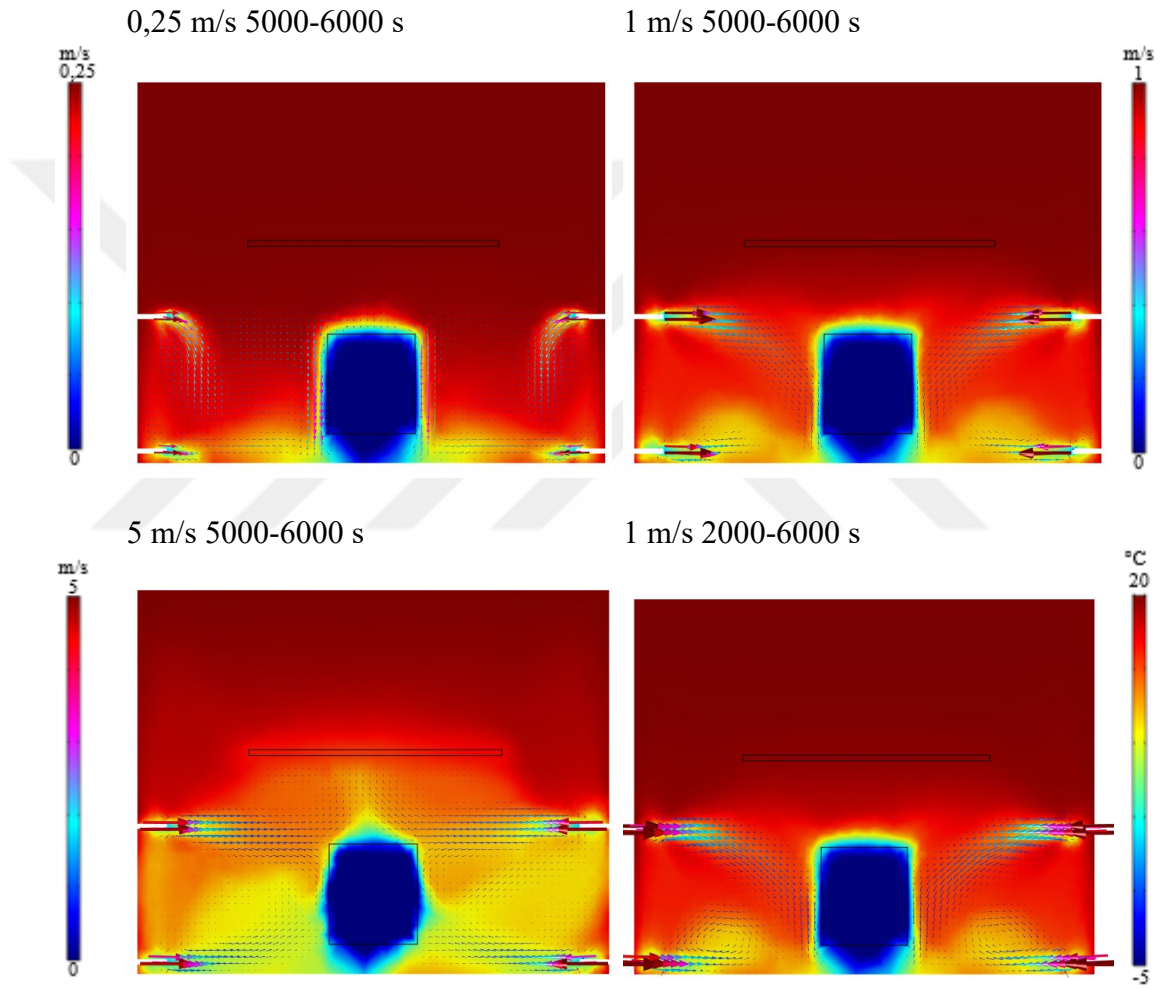
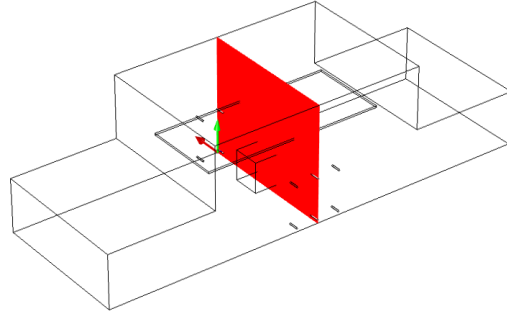
Şekil 4.44 Tek kaviteli kesikli radyo frekans sistemde sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumunda 2750 V güç uygulandığında proses sonundaki ürün yüzey sıcaklık ortalaması ve proses sırasında ürün hacimsel ortalama, üst ve alt yüzey

4.5.1 Kesikli tek kaviteli hava üfleme jet kombineli radyo frekans sistem

Hava jetlerinin etkisini gösterebilmek amacıyla modellemede önce vurgulu hava jet uygulaması olmadan sabit ısı transferi sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumunun uygulandığı model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.43’de tek kaviteli RF sistemde 1000 V güç uygulandığı durumda sabit ısı transferi sınır koşulu ve doğal konveksiyon durumu tanımlandığında proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı, ürün hacimsel, üst ve alt yüzey sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi gösterilmiştir. Sabit ısı transferi katsayısı sınır koşulu uygulandığında ürün kenarlarında sıcaklığın hızlı arttığı gözlenmiştir. Bunun yanında tüm yüzeylerde benzer bir sıcaklık dağılımı oluşmuştur. Doğal konveksiyon uygulaması ile gerçekleştirilen çalışmada ise ürün etrafındaki havada, sıcaklık farkına bağlı olarak oluşan hız profili, ürün üst bölgesinde köşe ve kenar

sıcaklıklarının daha fazla yükseldiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar kapsamında, ürün ile ortam arasındaki sıcaklık farkından dolayı doğal konveksiyonun gerçeğe yakın sonuç elde etme konusunda önemli bir yeri olduğu sonuca varılmıştır. Ürün hacimsel, üst ve alt yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi, 1000 V güç ve sabit ısı transferi sınır koşulu uygulandığı durumda, 0 °C'nin altında kalmıştır. Uygulanan güç değerinin RF sistemler için düşük olduğu düşünülerek 2750 V güç uygulanan sınır koşulu ile model tekrarlanmıştır (Şekil 4.44). Uygulanan voltaj değerindeki artış ile ürün köşe ve kenar sıcaklıklarındaki yüksek sıcaklık problemi proses sonunda daha belirgin bir hal almıştır. Doğal konveksiyon durumu için de uygulanan voltaj değeri arttırılarak model yapılmıştır ve beklenildiği gibi ürün sıcaklığında artış gözlemiştir. Elde edilen sonuçlara göre tek kaviteli kesikli RF sistemin yan duvarlarına yerleştirilen hava jetlerinin prosese dahil olma süreleri 2000 saniye olarak karar verilmiştir. Ürün üst yüzey sıcaklığı 1000 V güç uygulandığı durumda 2000 saniyede ≈ 0 °C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklık artışını kontrol altına almak için hava jetinin prosesin 2000 saniyesinde prosese dahil olacak şekilde başlaması için sınır koşulu tanımlanmıştır. İki farklı koşulda tamamlanan kesikli radyo frekans sistemde çözdüreme prosesinde elde edilen sonuçlara göre özellikle de doğal konveksiyon durumunda ürün köşe ve kenar bölgelerinde yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir.

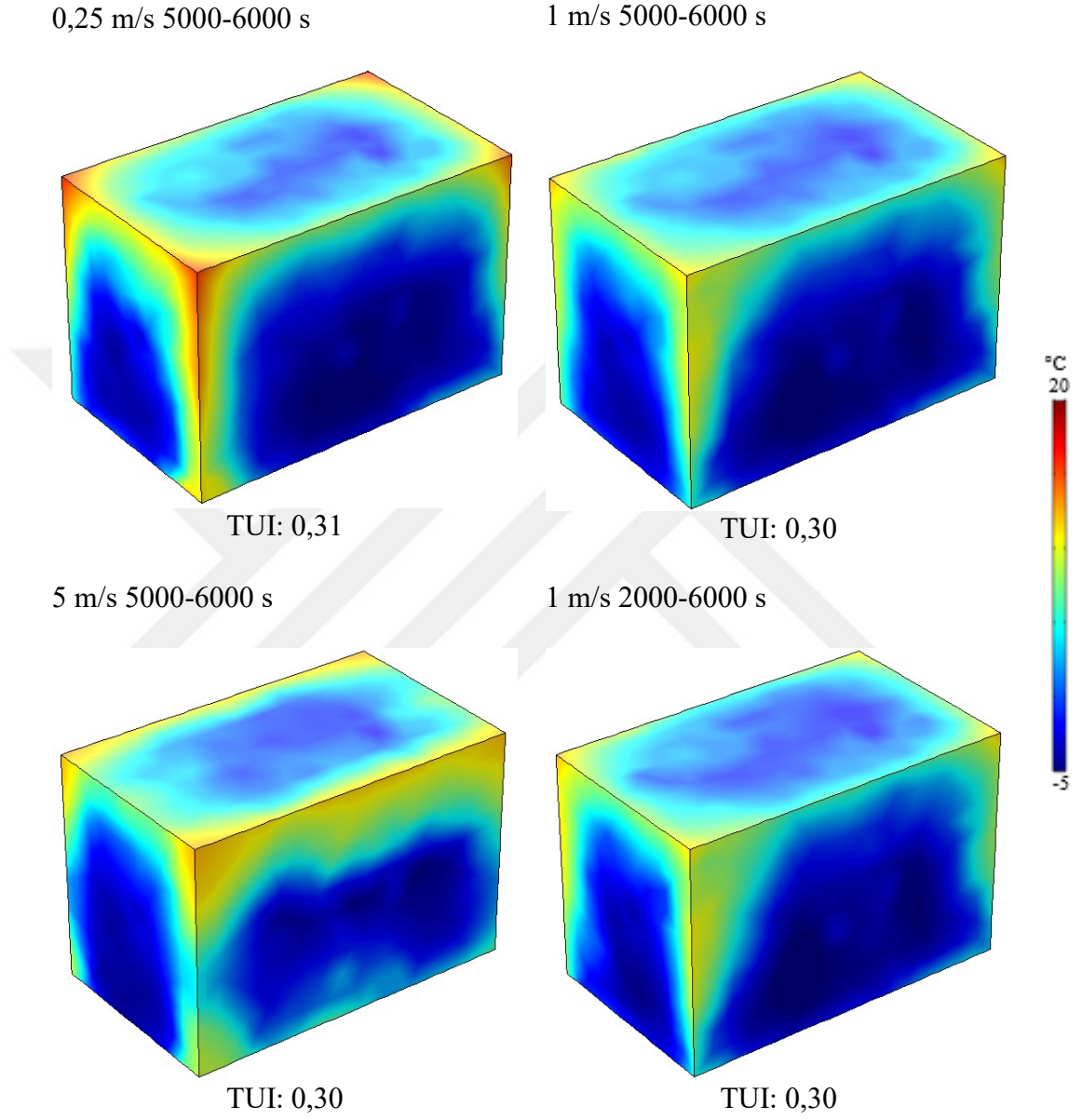
Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda, tek kaviteli RF sistemde kavitenin her iki yan duvarına altışar adet olmak üzere hava üfleme jeti ürün üst ve alt yüzeylere denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu bağlamda kesikli bir proses kapsamında hava üfleme kombineli radyo frekans prosesinde +4 °C sıcaklıkta üflenlen havanın ürün sıcaklık dağılımına etkisini incelemek adına farklı hava hızların etkisi incelenmiştir. RF kavite içerisinde ürün merkezinden ve hava üfleme jetlerine denk gelen y-z kesitinde proses sonunda ürün ve kavite içerisindeki sıcaklık değişimi ve hava hızı (oklar) şekil 4.45'de paylaşılmıştır. Havanın jetlerden çıkış hızı olarak 0,25 m/s olduğu durumda hızın düşük kaldığı ve üflenlen havanın ürün yüzeyine önemli bir etki sağlamadığı gözlenmiştir. Hava hızının düşük olmasından kaynaklı olarak ürün etrafında doğal konveksiyon etkisinin meydana geldiği gözlenmiştir. Bu sebeple şekil 4.46'da görüldüğü gibi 0,25 m/s hava hızı durumunda elde edilen ürün yüzey sıcaklık dağılımı doğal konveksiyonun uygulandığı durum sonucu (Şekil 4.43) ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.45 Kesikli radyo frekans sistemde hava jet kombineli ve 1000 V güç kullanılarak uygulanan çözdürme işlemi sırasında y-z düzleminde ürün ve kavite sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)

Düşük hava hızından dolayı ürün yüzeyinde bir soğuma etkisinin sağlanamadığı net olarak gözlenmiştir. Hava hızı arttırıldığında ise ürün köşelerinde meydana gelen yüksek sıcaklıkların elimine edildiği gözlenmiştir. Ancak hesaplanan sıcaklık tekdüzelik indeksi

0,30 ve 0,31 değerleri olarak bulunmuştur (Şekil 4.46). Hava üfleme jetleri üründe bölgesel olarak etkili olduğu gözlene de ürünün hacimsel sıcaklık dağılımına önemli bir etkisi olmuştur.



Şekil 4.46 Kesikli radyo frekans sistemde hava jet kombineli ve 1000 V güç kullanılarak uygulanan çözdüme işlemi sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı

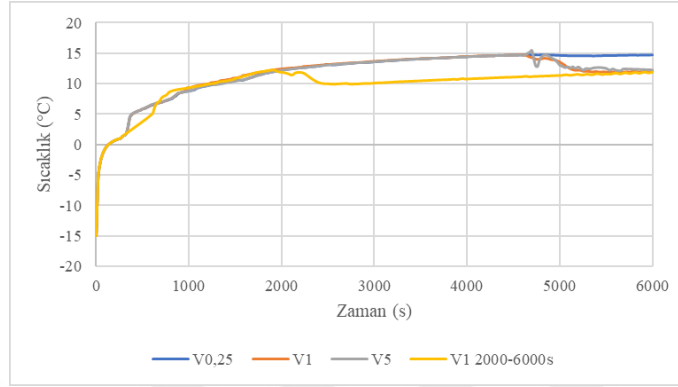
Hava hızının 1 ve 5 m/s'ye yükseltilmesi ile +4 °C havanın ürün yüzeyinde daha etkili olduğu hem hava hızı profilinde hem de ürün yüzey sıcaklık dağılımında etkili olmuştur. Hava hızının 5 m/s olarak uygulanması durumunda hava hızının artması ile ürün alt

yüzeyini hedef alan hava jetlerinden dolayı proses sonunda ürün alt yüzeyindeki köşelerde sıcaklığın arttığı tespit edilmiştir. Vurgulu hava üflemenin 2000 ile 6000 s aralığında uygulandığı durum ile prosesin son 1000 saniyesinde uygulandığı durum arasında ürün yüzey sıcaklık dağılımı açısından bir fark bulunmamıştır. Sabit hava sıcaklığı kullanıldığından kavite içerisindeki hava sıcaklığının da dengeye gelmesinden dolayı ürün yüzey sıcaklığı üzerine radikal bir etkisi olmamıştır. Hava üfleme kombineli tek kaviteli RF sistemde proses sırasında ürün köşe, kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun sıcaklığının zamana bağlı değişimi şekil 4.47’de gösterilmiştir. Hava üfleme sisteminin başlaması ile ürün köşe noktasındaki sıcaklığın düştüğü 0,25 m/s hız hariç net bir şekilde gözlenmiştir. Radyo frekans çözdürme prosesinde ürün etrafındaki hava sıcaklığının önemi Zhang vd. (2021) karidese uyguladıkları RF temperleme prosesinde gösterilmiştir. Karides ürünleri elektromanyetik bir kap içerisine yerleştirildikten sonra kap tamamen ezilmiş buz parçaları ile dolduruluyor. Çalışma kapsamında RF temperleme, su ve buzdolabı ile temperleme prosesleri ile karşılaştırılıyor. RF sistem 1 kW güçte iken elektrotlar arası 16 cm’de yapılan temperleme prosesi su ve buzdolabında koşullarında yapılan temperleme prosesine göre sırasıyla 5 ve 94 kat daha hızlı olduğu sonuca varılmıştır. RF prosesi sırasında ürün etrafının buz ile kaplı olması proses sonunda ürün yüzey sıcaklığının yükselmesini engelleyerek tekdüzelik sıcaklık dağılımı anlamında pozitif etkisi olmuştur.

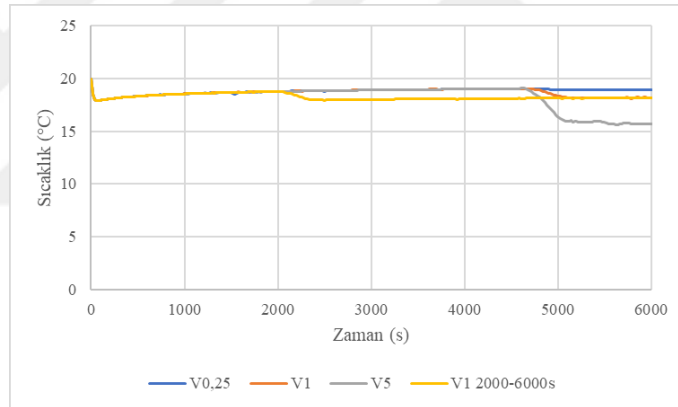
Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi potansiyel elektrot sıcaklığı yoğunlaşma açısından önem teşkil etmektedir. Hava üfleme hızının 5 m/s olduğu durumda potansiyel elektrotun sıcaklığının hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bu proses koşullarında sorun teşkil etmeyeceği düşünülse de proses edilen ürün adedi arttırılması ya da proses süresinin uzaması durumunda potansiyel elektrot yüzeyinde yoğunlaşma olma ihtimali artacak ve proses için bir sorun teşkil edecektir. Endüstriyel ölçekte böyle bir sistem kullanılması durumunda RF kavite içerisine uygulanan hava sıcaklığı ve hızı kapsamında ürün, RF kavite sıcaklık değişimi temelinde optimizasyon çalışmaları yapılması gerekecektir. Tezin bu bölümünde kesikli RF sistem hava üfleme sistemi ile kombine edilerek ürün yüzey sıcaklığının kontrol altına alınabileceği gösterilmek istenmiştir. Farklı hızlarda RF kavite içerisine jetlerden üflenilen +4 °C havanın ürün yüzey sıcaklığı bakımından pozitif etkilediği görülmüştür. Endüstriyel üretim için çoklu ürün durumunda hava hızı ve

sıcaklığının belirlenmesi için optimizasyon çalışmalarının yapılması önemli bir nokta olarak ortaya çıkmıştır.

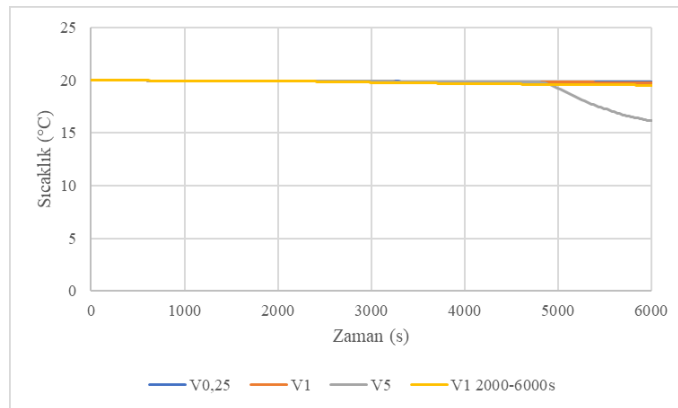
Ürün köşe nokta sıcaklığı



Kavite içerisindeki hava sıcaklığı

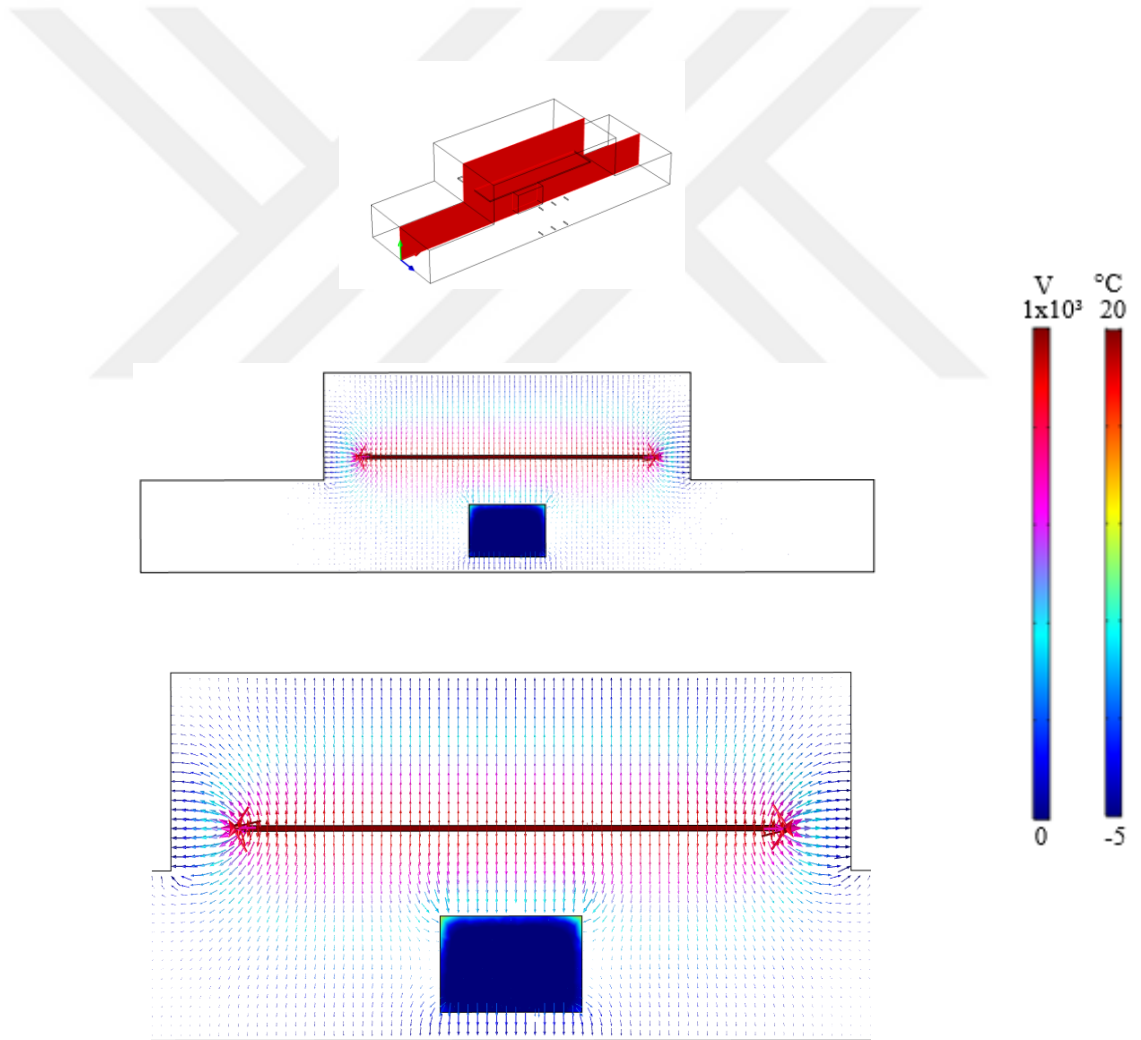


Potansiyel elektrot sıcaklığı



Şekil 4.47 Kesikli radyo frekans sistemde hava jet kombineli ve 1000 V güç kullanılarak uygulanan çözdürme işlemi sırasında sıcaklık değişimleri

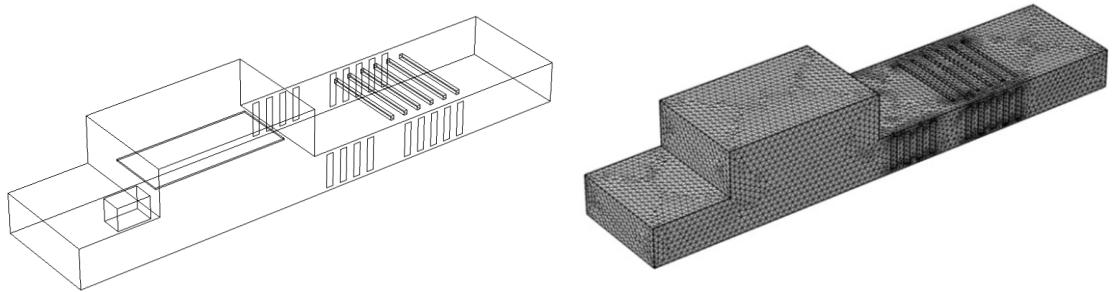
Kesikli tek kaviteli RF sistem içerisinde x-z düzleminde alınan kesitte uygulanan elektromanyetik gücün dağılımı ve ürün sıcaklığı şekil 4.48’de gösterilmiştir. Ürün merkezinden alınan kesitte elektromanyetik alan enerjinin kenarlardan ürüne odaklandığı ve sıcaklığın yükselmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında elektromanyetik alan enerjinin x-z düzleminde kavitenin sağ ve solunda bulunan bölmelere ulaşamadığı dikkat çekmiştir. Tek kaviteli RF sistemde yan bölmelerdeki duvarların kapaklı ve delikli bir yapıda olması düşünülmüştür. Böylece yoğunlaşma problemini önlemek için soğuk hava kavite dışarısına çıkabilecek, aynı zamanda ürünler sistem içerisine yüklenebilecektir.



Şekil 4.48 Kesikli tek kavite radyo frekans sistemde kavitenin x-z ekseninden alınan kesitte uygulanan güç değerinin dağılımı (oklar) ve ürün sıcaklık dağılımı

4.5.2 Sürekli tünel iki kaviteli hava üfleme slot jet kombineli radyo frekans sistemler

Hava jeti uygulamasında sabit sıcaklık kullanılsa da düşük hava sıcaklığının yine yoğunlaşma problemine yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuç olarak hava hızı ve hava sıcaklığı optimizasyon çalışmaları ile hem ürün yüzey sıcaklığını kontrol altında tutabilecek hem de yoğunlaşma problemi yaşatmayacak şekilde seçilmelidir. Tek kaviteli RF sistemde yan duvarlara monte edilen jetlerin ürün sıcaklığı üzerine pozitif etkisi olsa da tam olarak istenilen sonuçlar alınamamıştır. Ayrıca geliştirilen modellerde tek bir ürün proses edilmiştir. Ürün sayısının kavite içerisinde endüstriyel ortamda artacağı göz önüne alınırsa yan duvarlardan uygulanan hava jetlerinin etkinliğinin azalacağı ya da merkezdeki ürünlere ulaşamayacağı düşünülmektedir. RF üretim endüstrisinde yeni yapılan sistemler incelendiğinde üst elektrotun delikli bir şekilde dizayn edilip aralardan soğuk havanın üflendiği dizaynlar bilinmektedir. Bu tarz sistemlerin daha etkili olacağı düşünülse de hava akışının eşit bir şekilde dağılması için yine optimizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Hava jetlerinin ürün sıcaklık iyileştirilmesi anlamında tam olarak istenilenin elde edilememesinin sebebi olarak yan duvarların ürüne uzak bir mesafede olması ve jet sayısının yeterli olmayışı sonucuna varılmıştır. Bu yüzden tünel RF sistem dizaynlarında hava jetleri yerine dörtgen yivli slot jetlerin kullanılmasına ve kavitenin üst duvarına yerleştirilmesine karar verilmiştir. Bu kararın alınmasında tek kaviteli RF sistemde doğal konveksiyon durumunda yapılan modelde ürünün özellikle üst bölgesinde yüksek sıcaklık probleminin görülmesi etkili olmuştur.



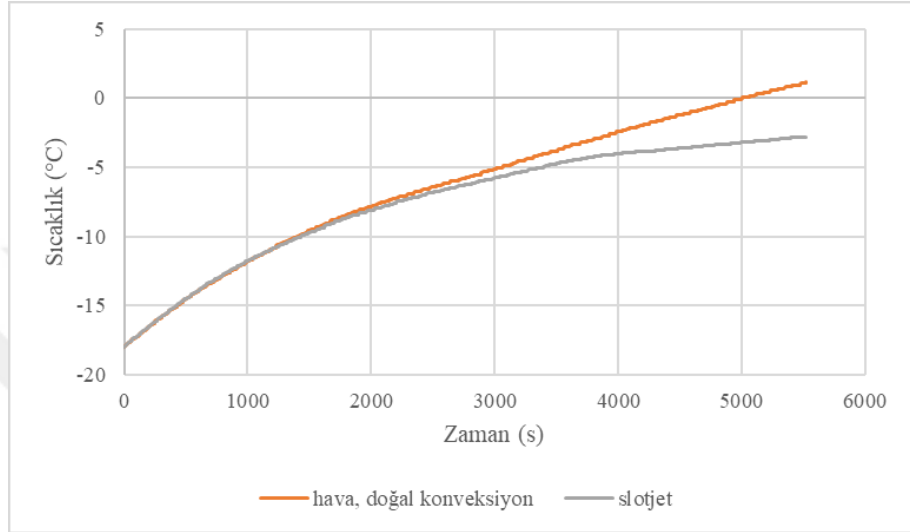
Şekil 4.49 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem geometrisi ve modellemeye kullanılan 244.932 elementli ağ yapısı

Bu kapsamda yukarıda da açıklandığı şekilde dörtgen yivli vurgulu hava jeti uygulaması için düşünülen RF sistem kapsamında endüstriyel üretimde kullanılabilecek tek ve çift kaviteli sürekli sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tek kaviteli sistemlerde RF uygulaması sonrası, iki kaviteli sistemlerde ise kaviteler arasında hava jeti uygulamasının gerçekleştirilmesi kapsamında modelleme çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.49’da belirtilen bu iki sistemden tek kaviteli kesikli RF tünelin geometrisi ve model çalışmalarında kullanılan ağ yapısını gösterilmiştir. Bu sistemlere hava jeti uygulaması özellikle ürün üst yüzeyinde meydana gelecek aşırı sıcaklık artışının engellemek amacıyla sistem üst duvarından yapılırken sistem içi sıcaklık düşüşünü engellemek amacıyla yan duvarlara hava çıkış bölmeleri eklenmiştir. Önce her iki sistem için de elektrot voltaj değeri 1000 V ve vurgulu hava jet hızı 1 m/s olarak uygulanmıştır. Dörtgen yivli vurgulu hava jeti etkisinin belirlenmesi konusunda ayrıca 2750 V – 5 m/s jet hızı koşullarında da modeller gerçekleştirilmiştir. İki kaviteli sistemde proses süresi 7000 s, tek kaviteli sistemde ise 5400 s olarak belirlenmiş ve her iki durumda da farklı hava hızı ve güç kombinasyonlarında modeller tamamlanmıştır. Her iki sistem içerisinde öncelikle vurgulu hava jeti uygulamasının olmadığı durumda üründe meydana gelen sıcaklık değişimi çalışmaları yapılmıştır. Bu modellerde sistem içi hava sıcaklık ve hız profili değişimi doğal konveksiyona bağlı olarak belirlenmiştir. Şekil 4.50, 5400 s proses süresi uygulanan tek kaviteli RF – dörtgen yivli vurgulu hava jeti sisteminde 1000 V güç uygulandığında elde edilen ürün hacimsel sıcaklık değişimini göstermektedir. Vurgulu hava jetinde 1 m/s hava hızı uygulaması ile ürün sıcaklığında azalma olduğu net olarak görülmüştür. Modelde ürün sistem içerisinde elektromanyetik alana geçirgen bir bant üzerinde 1,8 m/saat hızla hareket ettiği varsayılmıştır.

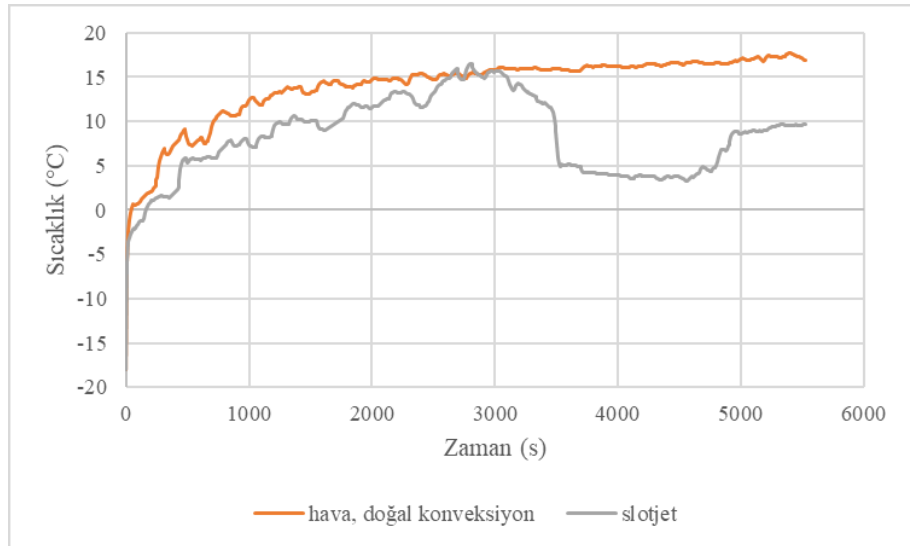
Hem ürün sıcaklık artışının hem de slot jet etkisi çok belirgin bir şekilde gözlemlendiği için ürün köşe noktasındaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi hesaplanmıştır. Bu durumda vurgulu hava jeti uygulamasıyla ürün sıcaklık değişiminde önemli bir değişim sağlanabildiği net olarak gözlenmektedir. Ürünün vurgulu hava jeti bölmesinden çıkmasıyla sıcaklığının, ortam sıcaklığı etkisiyle, tekrar yükselmeye başladığı da bu şekilde net olarak ortaya çıkmıştır. Ürüne vurgulu hava jeti uygulaması sırasında ortaya çıkan hava akış profili değişimi ve ürün sıcaklık değişimi üç farklı zaman olmak üzere şekil 4.51’de paylaşılmıştır. Şekillerden gözleneceği gibi sistem içerisine uygulanan

havanın RF kavite içerisinde potansiyel elektrota geçişi önemli düzeyde yan duvarlara açılan çıkış pencereleri ile azaltılmıştır. Ürün slot jetin altındayken y-z düzleminde alınan kesitte soğuk havanın ürün etrafını sardığını ve ürün üst yüzeyindeki sıcaklığın azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.52).

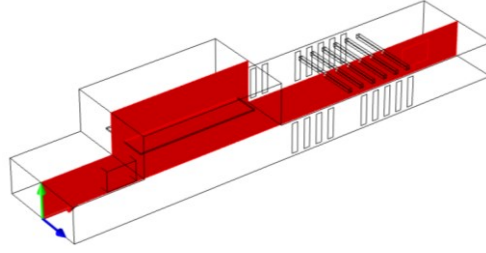
Ürün hacimsel ortalama sıcaklık



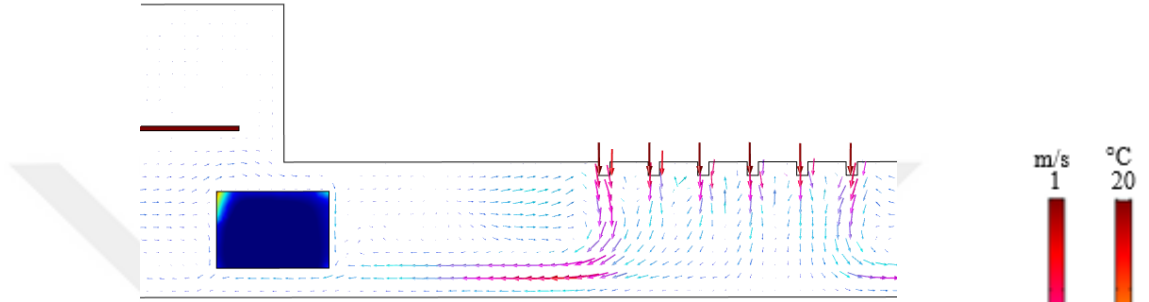
Ürün köşe nokta sıcaklık



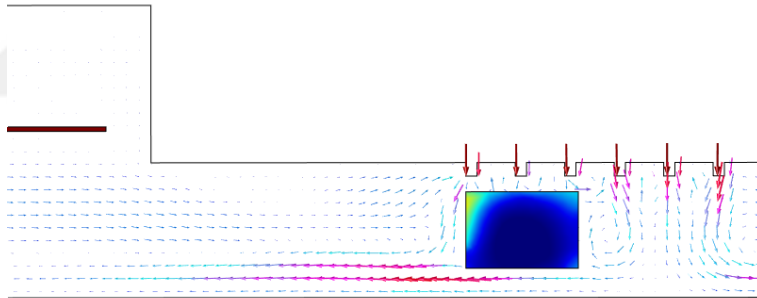
Şekil 4.50 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç tanımlandığında doğal konveksiyon ve slot jet kombineli sistemde 1 m/s sınır koşulu uygulandığında elde edilen ürün hacimsel ortalama sıcaklık ortalaması ve ürün köşe noktası sıcaklığı



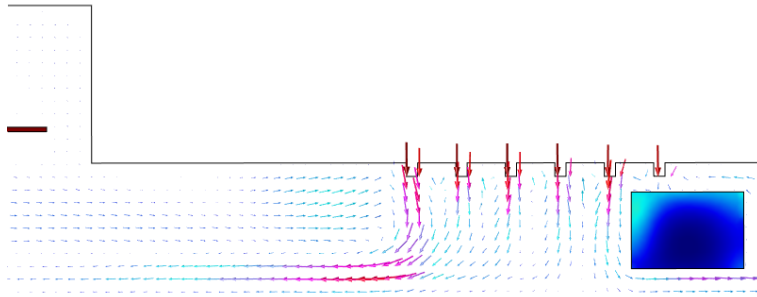
$t=2400.s$



$t=4000.s$

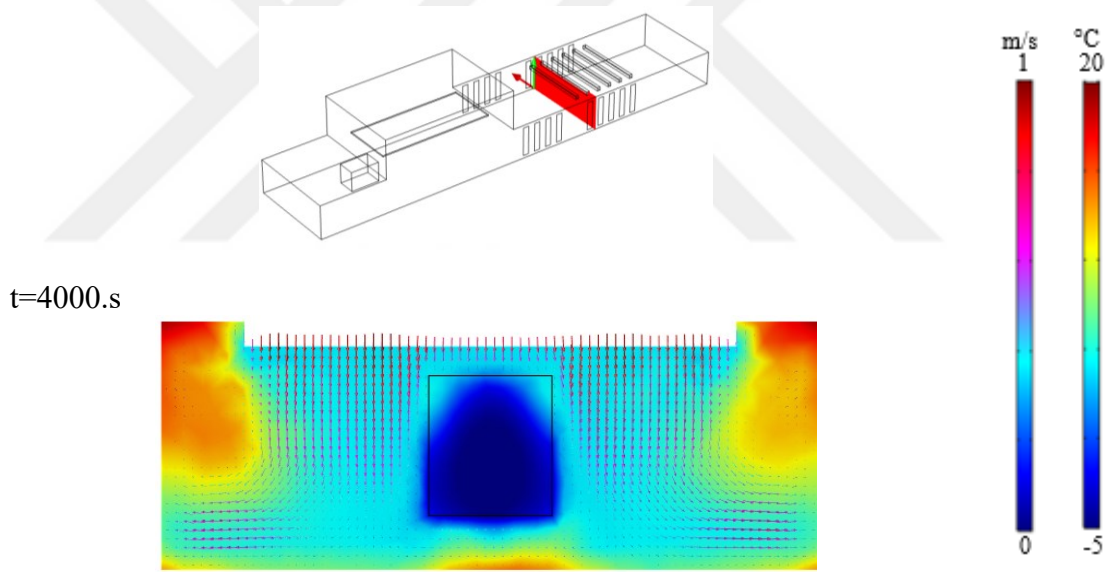


$t=5000.s$



Şekil 4.51 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç ve 1 m/s sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlarda hava akış profili ve ürün sıcaklık dağılımı

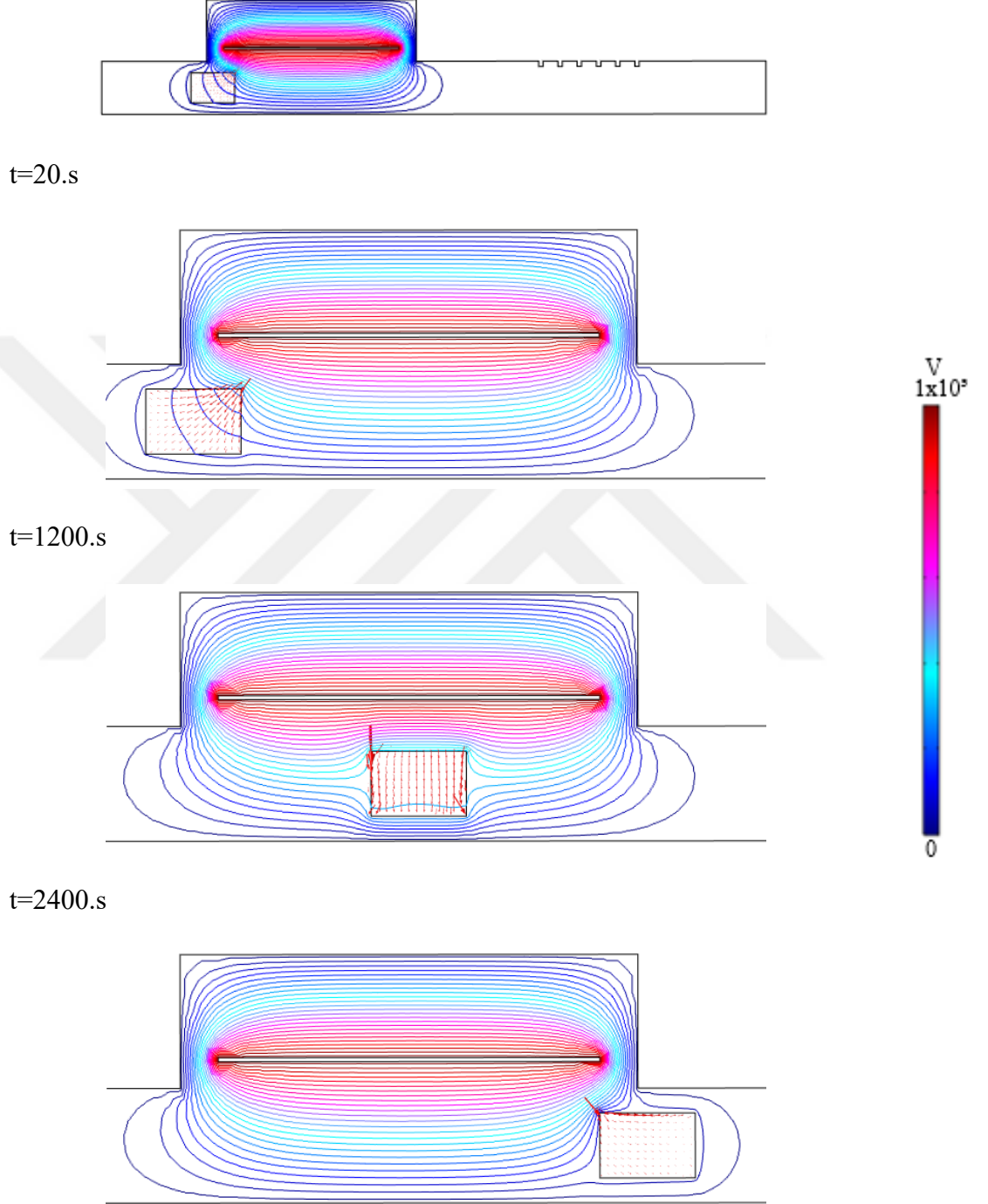
Şekil 4.53’de kavite içerisinde 1000 V güç uygulandığındaki enerji dağılımı gösterilmiştir. Elektromanyetik enerjinin hava üfleme bölümüne ve ürünün giriş yapacağı sol bölmeye ulaşamamıştır. Bu da sistemin kullanılacağı alanın elektromanyetik enerji kaçağı anlamında güvenli olacağı anlamını taşımaktadır. Aynı zamanda radyo frekansı dalga boyu yaklaşık 11 metre olduğundan ve hava çıkış pencerelerinin ızgaralı bir yapıda olacağı düşünülürse elektromanyetik enerjinin bu noktalardan dışarı sızıntı yapamayacağı kabul edilmiştir. Ürünün potansiyel elektrot alanına girişi, ortası ve çıkışı sırasında elektromanyetik alanın dağılımı (çizgiler) ve ürün içi polarizasyon (oklar) şekil 4.53’de gösterilmiştir. Ürün giriş ve çıkışında polarizasyonun potansiyel elektrotta yakın tarafta var olduğunu ancak uzak köşede etkin olmadığı görülürken ürün elektrotun ortasında iken özellikle polarizasyonun ürün kenarında arttığı gösterilmiştir.



Şekil 4.52 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç ve 1 m/s hava hızı sınır koşulları uygulandığında y-z düzleminde alınan kesitte kavite ve ürünün sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)

Dörtgen yivli kombineli uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde 1000 V güç ve 1 m/s hava hızı uygulandığında sistem içerisindeki hava akış profili, elektromanyetik enerji dağılımı, ürün ve havanın sıcaklık dağılımı detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Aynı sistem içerisinde potansiyel elektrotta 2750 V güç uygulanmasında hava hızının 1-5 m/s

hız tanımlamaları ve ayrıca 5500 V uygulanmasında 5 m/s hava hızı sınır koşulu durumunda matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

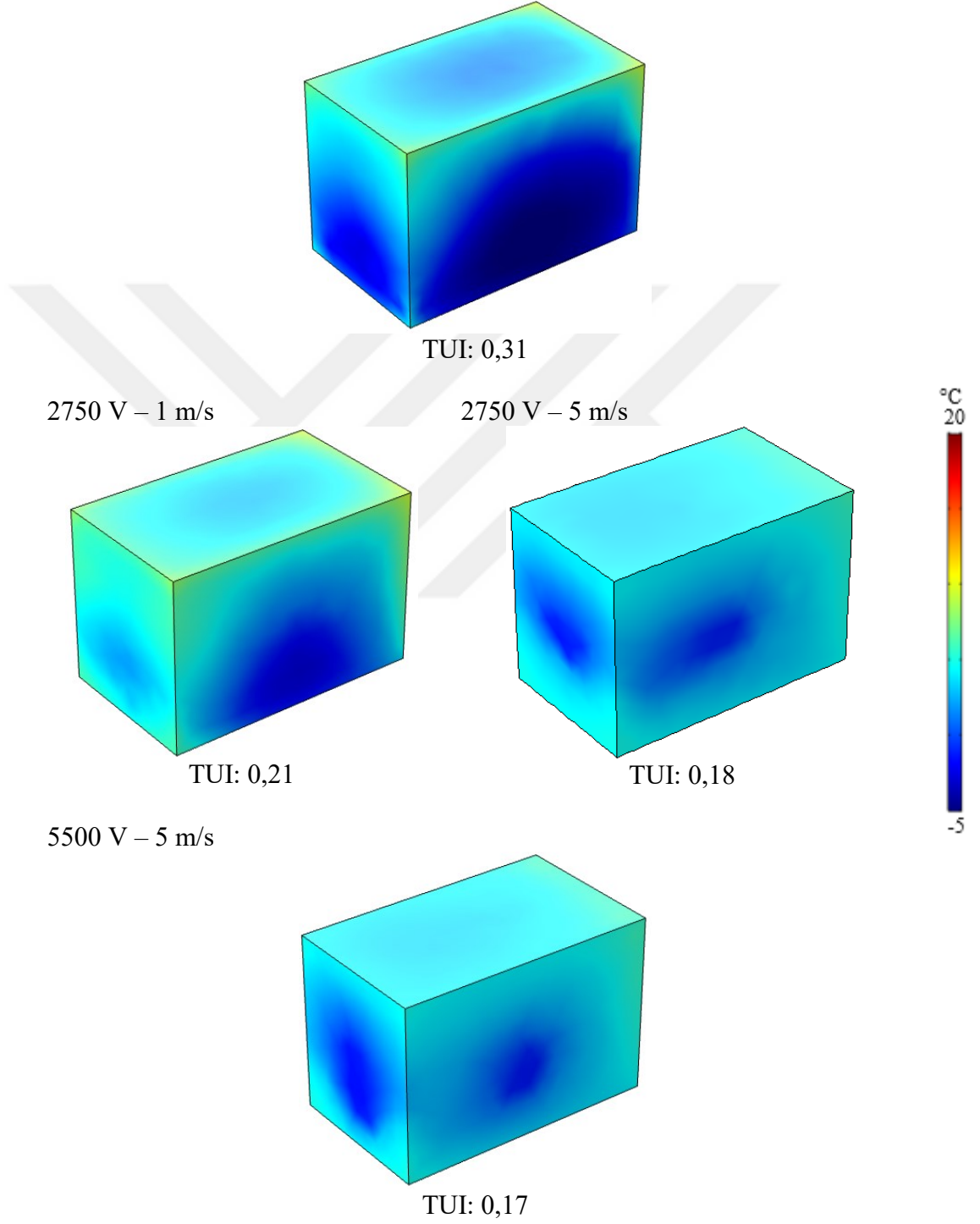


Şekil 4.53 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlardaki enerji dağılımı

Değişken koşullarda yapılan modellerin proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı şekil 4.54'de paylaşılmıştır. Hava hızının artmasıyla zorlamalı konveksiyon etkisi arttığından soğuk havanın etkisi sadece yüksek sıcaklıkları önleme görevi değil aynı zamanda ürün yüzeyinin çözünmesine ve tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilmesinde etkili olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık tekdüzelik indeksi 1000 V güç ve 1 m/s hava hızı uygulandığı durumda 0,31 iken güç değeri ve hava hızı arttırıldığında bu değer 0,18 ve 0,17 değerlerine kadar gerilemiştir. Sıcaklık tekdüzelik indeksi ne kadar düşük bir değere sahip olursa ürün sıcaklık dağılımı o kadar tekdüzedir anlamına gelmektedir. Hava hızının artmasıyla ürün yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıklar engellendiği gibi tekdüzelik anlamında da pozitif etkisi olduğu gözlenmiştir. Sonuçların daha detaylı bir şekilde karşılaştırılması ve ürün sıcaklığı kadar kavite içindeki havanın ve potansiyel elektrotun sıcaklığı da önemli olduğundan proses sırasında sıcaklık-zaman grafik sonuçları hazırlanmıştır. Uygulanan potansiyel güç 5500 V değerine yükseltildiği modelde ürün sıcaklığının hızlı bir şekilde yükseleceği öngörülerek proses süresi iki kat azaltılıp ürün hızı iki kat arttırılmıştır. Ürün hacimsel sıcaklık ortalaması karşılaştırıldığında prosesler arasında çok farklılıklar göze çarpmasa da ürünün tüm yüzeylerinin ve köşe noktasının sıcaklık değişimi incelendiğinde hava üfleme hızının önemli derecede etkili olmuştur. Uygulanan güç değeri 2750 V olduğu durumda 1 ve 5 m/s hava hızı uygulandığında proses sonunda ürün sıcaklık değerinin birbirlerine yakın olduğu ancak proses sırasında kavite içerisindeki havanın 5 m/s hız durumunda daha fazla soğumasından kaynaklı olarak sıcaklığın daha kontrollü arttığı dikkat çekmiştir. Bu durum konveksiyonun elektromanyetik enerji kadar ürün sıcaklığı üzerinde bir etkisi olduğunu göstermiştir. Hava hız değerinin 5 m/s olarak tanımlanan 5500 ve 2750 V güç değerinin tanımlandığında model sonuçlarının birbirine benzemiş sadece proses süresi kısalmıştır. Kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun sıcaklığı prosesler arasında karşılaştırıldığında hava hızının 1 m/s olduğu durumda potansiyel elektrot açısından herhangi bir sorun teşkil oluşturmayacağı gözlenmiştir (Şekil 4.55). Ancak hava hızı 5 m/s hıza yükseltildiğinde potansiyel elektrot sıcaklığı 15 °C'nin altına düşmüştür. Uzatılmış dörtgen yivli slot jetler ile kombineli tünel RF kavite için geliştirilen matematiksel model sonuçlarına göre radyo frekans çözdürme prosesinde soğuk hava üfleminin ürün sıcaklık dağılımına pozitif bir etki yapmıştır. Ancak hava hızı arttırıldığında elektrot sıcaklığının istenmeyen derecede düştüğü ve proses sırasında

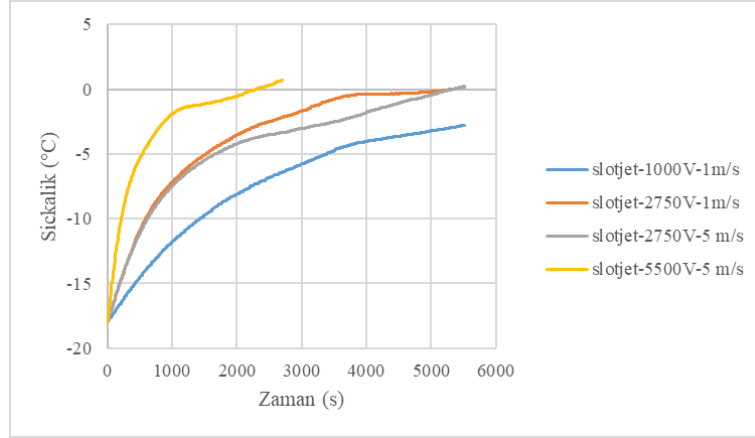
problem yaratabileceği öngörülmüştür. Soğuk havanın etkinliği kullanabilmek için sistem tasarımı üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak hava çıkış pencere sayıları ve konumları, dörtgen yivli slot jetlerin sayısı ve konumu belirlenerek geliştirilmelidir.

1000 V – 1 m/s

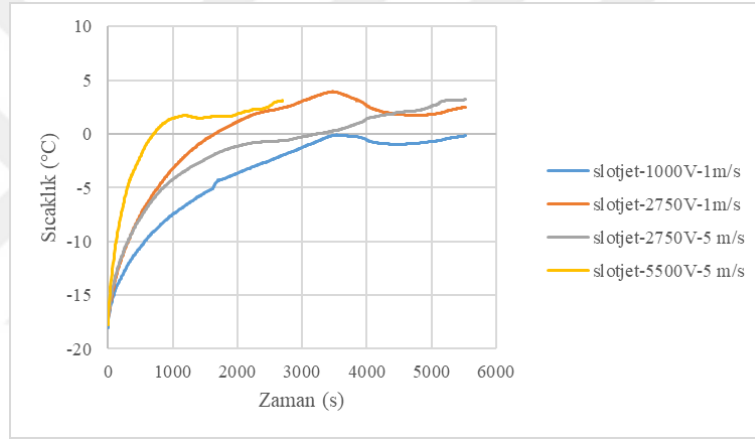


Şekil 4.54 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sonunda elde edilen ürün yüzey sıcaklık dağılımı

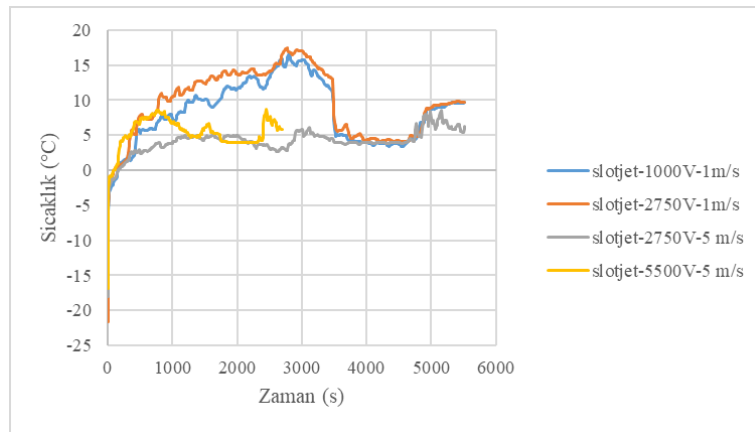
Ürün hacimsel sıcaklık ortalama



Ürün tüm yüzeyler sıcaklık ortalama

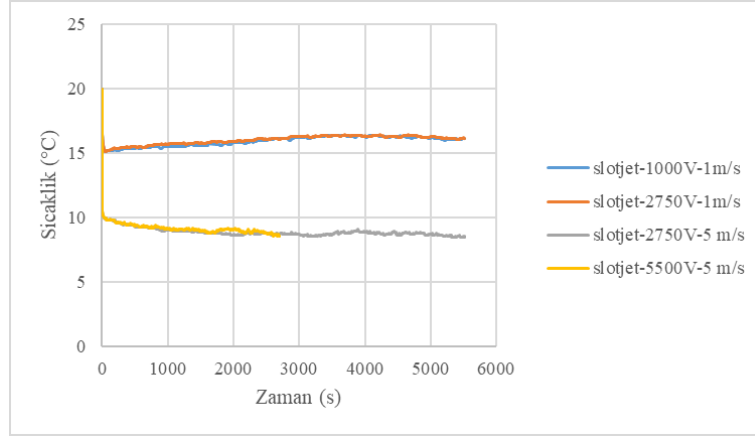


Ürün üst köşe noktası

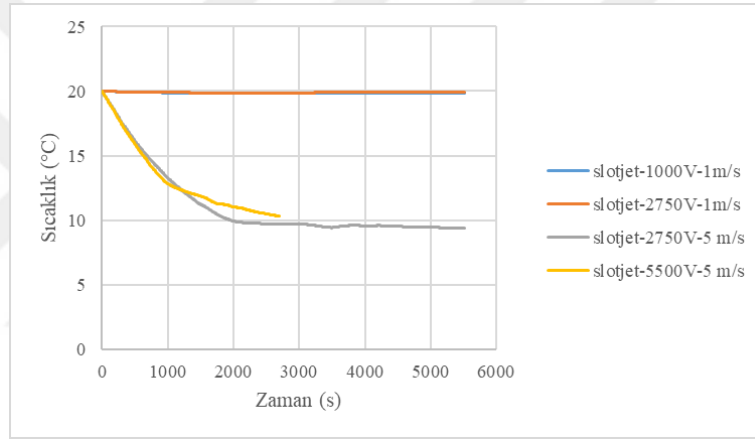


Şekil 4.55 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında ürün hacimsel sıcaklık ortalama, tüm yüzeylerin sıcaklık ortalama ve ürün köşe noktasının sıcaklığının zamanla değişimi

Kavite içerisindeki havanın sıcaklığı



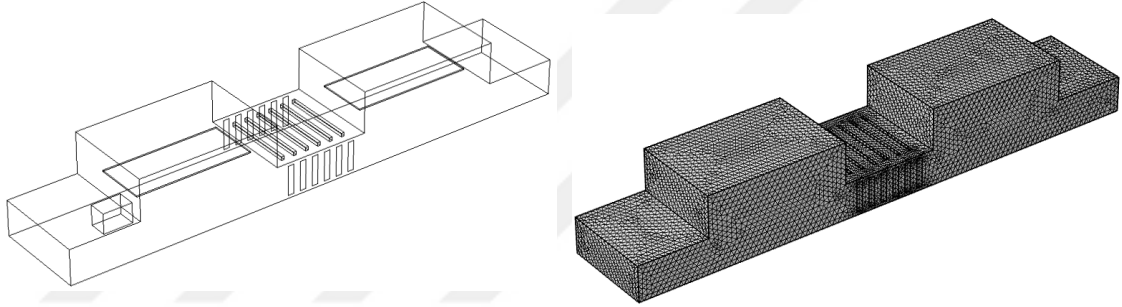
Potansiyel elektrotun sıcaklığı



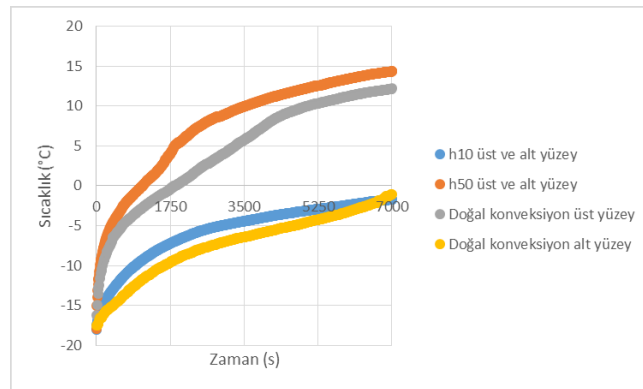
Şekil 4.56 Uzatılmış tek kaviteli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun zamanla sıcaklık değişimi

Gıda endüstrisinde sürekli üretim için radyo frekans sistemler genel olarak tünel şekilde birden fazla kaviteli olarak tercih edilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen RF tünel tasarımlarından ikincisinde iki kaviteli bir dizayn yapılmıştır. Tünel RF dizayna dörtgen yivli hava üfleme slot jetleri iki kavite arasına yerleştirilmesi planlanmıştır. Geliştirilen bu dizaynda uzatılmış tek kaviteli RF sistemde olduğu gibi farklı güç seçenekleri ile çeşitli hava hızları kombine edilmiştir. Şekil 4.57’de gösterildiği gibi slot jetler ve hava çıkış pencereleri iki kavite arasındaki geçiş bölümüne yerleştirilmiştir. Modellemenin çözümlenebilmesi için gerekli yoğunluktaki ağ yapısı oluşturulmuştur. İki kaviteli tünel RF sistemde ilk önce sabit ısı transfer katsayısı sınır koşulu ve doğal konveksiyonun

tanımlandığı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu aşamada farklı ısı transferi katsayısı koşullarında modeller yapılmıştır. Isı transferi katsayısı 10 ve 50 W/m²-K model sonuçları doğal konveksiyon durumu sonucu ile karşılaştırılmıştır. Sabit ısı transferi katsayısı kullanıldığında ürünün tüm yüzeyleri benzer bir sıcaklık dağılımı göstermektedir. Doğal konveksiyon koşulunda ürün üst yüzeyinde sıcaklık artışı olurken ürün etrafındaki hava hareketinden dolayı ürünün alt bölgesinde sıcaklık yükselmesi sınırlı olmuştur (Şekil 4.59). Modellerde proses sırasındaki üst ve alt yüzey sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında doğal konveksiyonda ürünün üst yüzeyi ısı transfer katsayısının 50 W/m²-K olduğu durumla benzerlik gösterirken, alt yüzey ortalama sıcaklık değeri 10 W/m²-K durum ile eşleşmektedir (Şekil 4.58). Bu da doğal konveksiyonun ürün sıcaklık dağılımında ciddi bir etkisi olduğu göstermiştir.

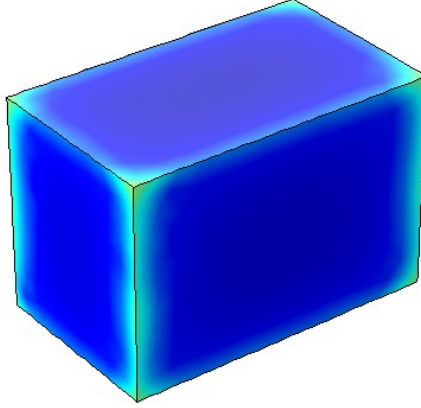


Şekil 4.57 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemin üç boyutlu çizimi ve matematiksel modellerde kullanılan 267.957 elementli ağ yapısı

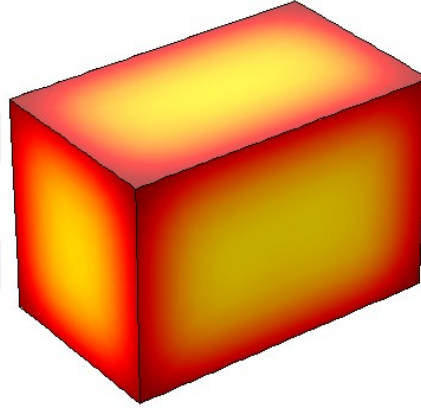


Şekil 4.58 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde konveksiyon ısı transferi katsayısının 10 W/m²-K olduğu durumda alt yüzey, 50 W/m²-K olduğu durumda üst yüzey sıcaklık ortalamasının doğal konveksiyon koşulu ile karşılaştırılması

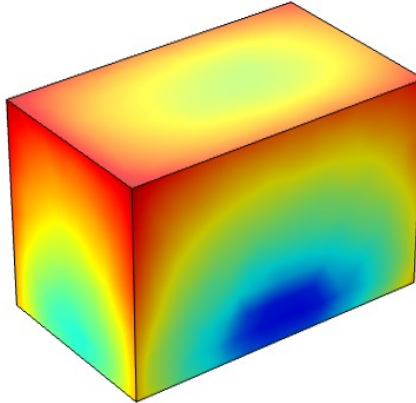
Isı transferi katsayısı 10 W/m²-K



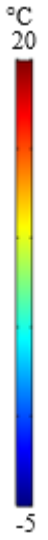
Isı transferi katsayısı 50 W/m²-K



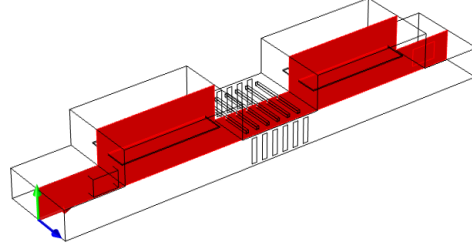
Doğal konveksiyon



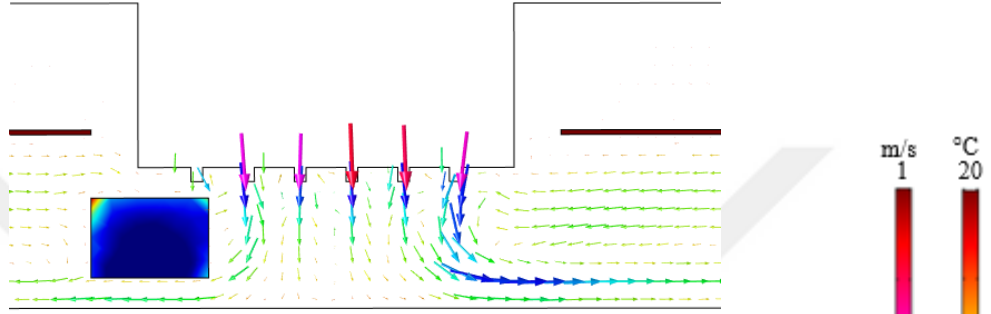
TUI: 0,32



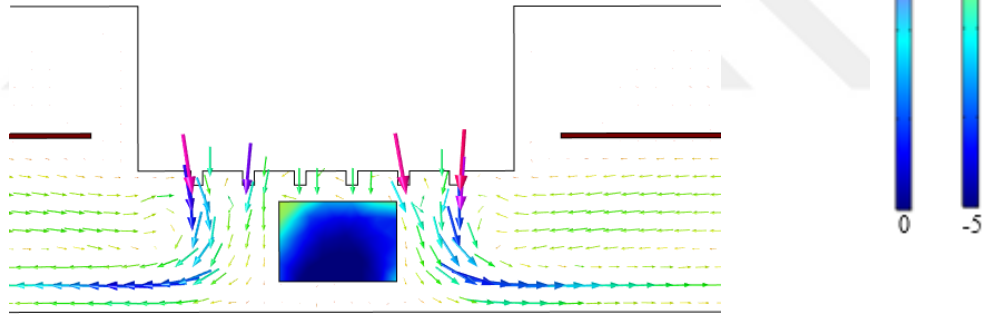
Şekil 4.59 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde ısı transfer katsayısının 10 ve 50 W/m²-K sınır koşulu ve doğal konveksiyon olduğu durumlarda proses sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı



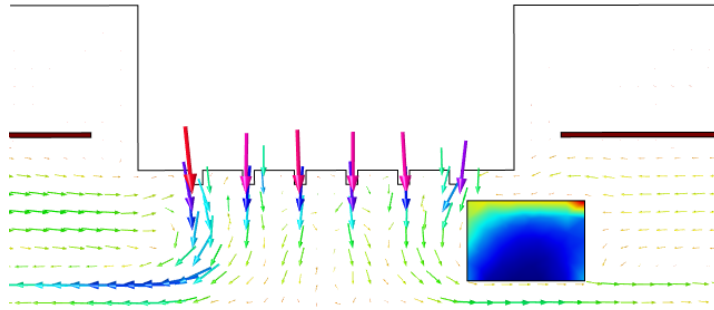
$t=2400$ s



$t=3200$ s

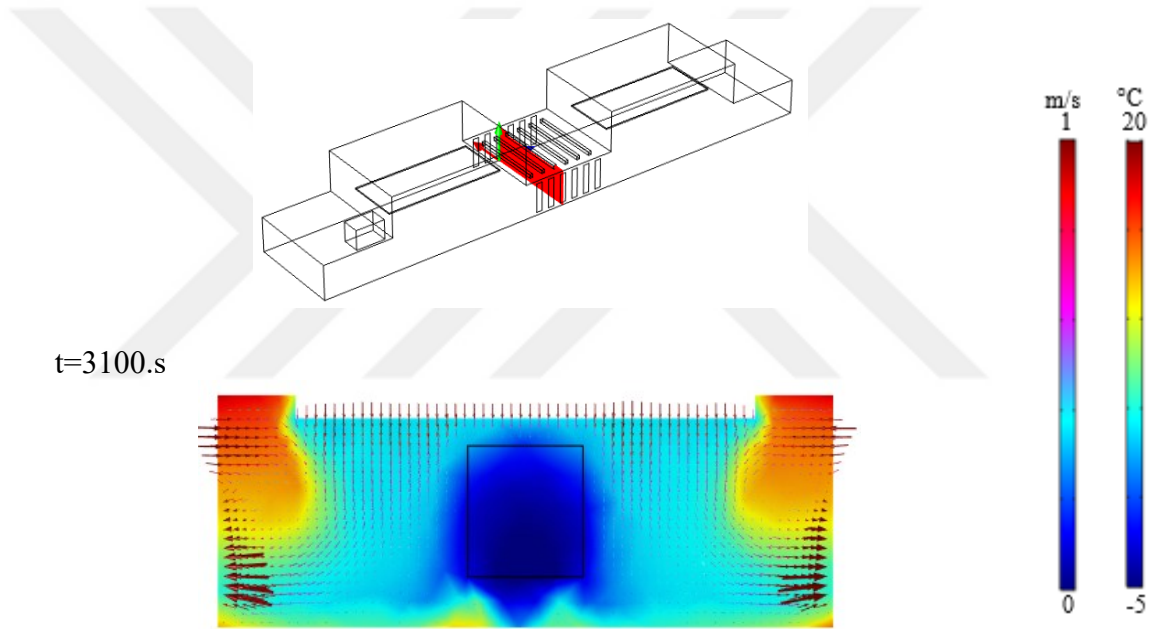


$t=4000$ s



Şekil 4.60 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde 1000 V güç ve 1 m/s sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlarda hava akış profili ve ürün sıcaklık dağılımı

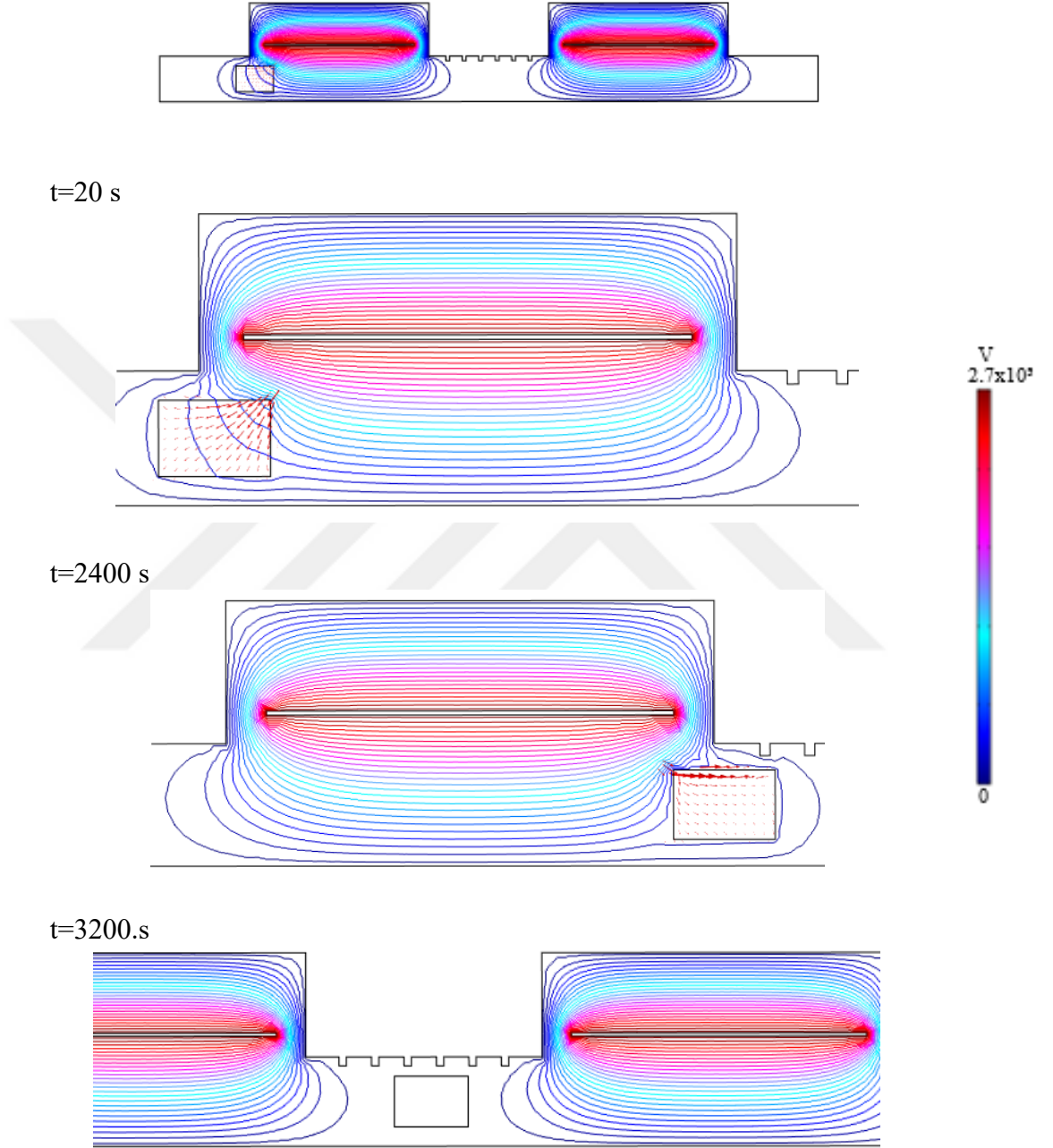
İki kaviteli slot jet kombineli tünel RF sistem içerisinde proses sırasında hava akış profili ve sıcaklık profilinin değişiminin farklı sürelerde farklı kesitlerde paylaşılması için 1000 V potansiyel güç ve 1 m/s hava hızı durumu ele alınmıştır. Şekil 4.60'da x-z düzleminde ürün ilk kaviteden çıkarken slot jetlerin altındayken ve ikinci kaviteye girerken hava akış profili ve ürün sıcaklığı gösterilmiştir. İlk kavite çıkışında ürün üst yüzeyinin köşelerinde sıcaklık artışı olmuştur. Bu artış hava üfleme bölümü ile kontrol altına alınmıştır aynı zamanda zorlamalı konveksiyon ile üst yüzeyde çözdürme üzerinde de etkili olmuştur. Proses sırasında 3100 saniyede slot jet bölümünde y-z düzleminden alınan kesitte soğuk havanın ürünün etrafını sardığını ve fazla havanın pencerelerden çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.61).



Şekil 4.61 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V güç ve 1 m/s hava hızı sınır koşulları uygulandığında y-z düzleminde alınan kesitte kavite ve ürünün sıcaklık dağılımı ve hava akış profili (oklar)

Kavite içerisindeki elektromanyetik enerjinin dağılımı şekil 4.62'de gösterilmiştir. Elektromanyetik enerjinin iki kavite arasından birbirini etkilemediği ve slot jet bölümünde radyo frekans etkisi görülmemiştir. Ürünün ilk kaviteye giriş ve çıkışı sırasında ürün içi polarizasyon (oklar) gösterilmiştir. Ürün slot jetlerin olduğu bölgede ise ürün içinde istenildiği gibi herhangi bir polarizasyon oluşmamıştır. İki kaviteli slot jet

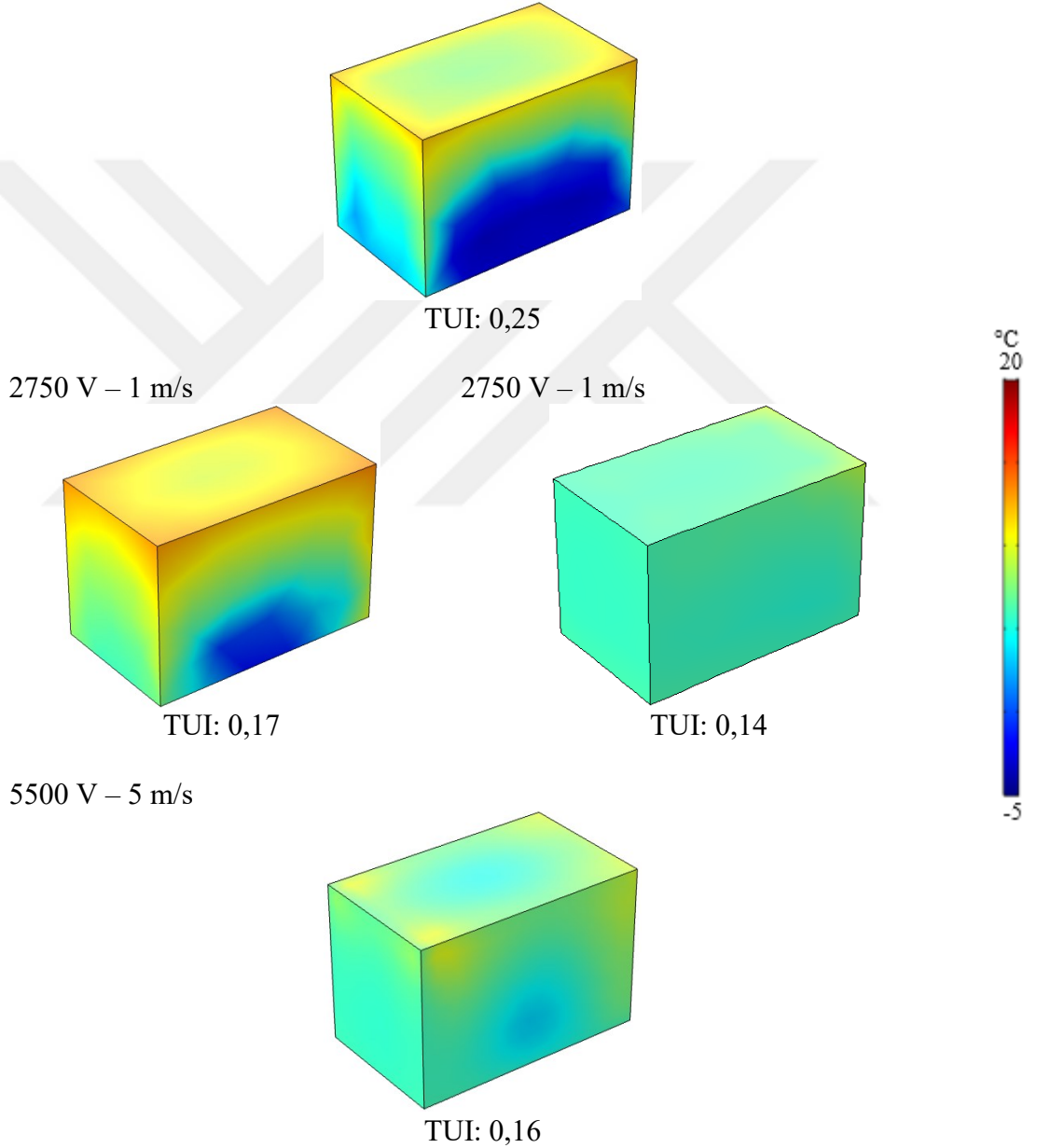
kombineli tünel RF sistemde 2750 ve 5500 V gc uygulamalarında 1 ve 5 m/s hava hızlı durumlarda modeller tamamlanmıştır.



şekil 4.62 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistem tasarımında 1000 V gc sınır koşulları uygulandığında x-z düzleminde alınan kesitte farklı zamanlardaki enerji dağılımı

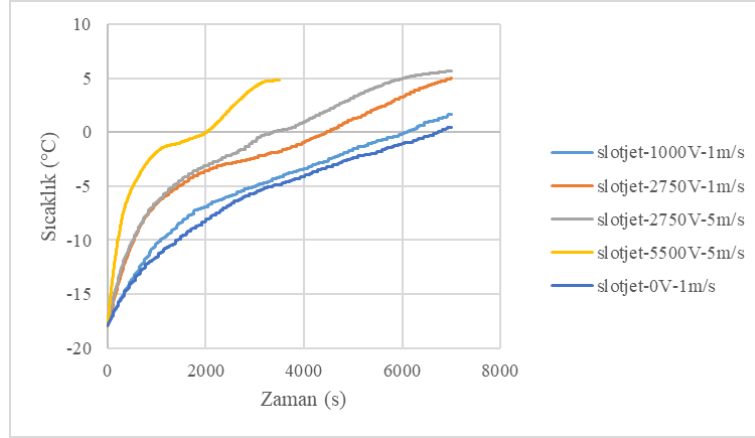
Modeller sonunda ürün yüzey sıcaklık dağılımı incelendiğinde, tekdüze bir sıcaklık dağılımı 2750 V-5 m/s hava hızı uygulandığında elde edilmiştir. Hava hızının 1 m/s olduğu 1000 ve 2750 V güç uygulanan durumlarda ürünün alt tarafında çözünmeyen bölgelerin olduğu dikkat çekmektedir. Potansiyel elektrotlara 5500 V güç tanımlandığında ürünün fazla ısındığı ve üflenene soğuk havanın ürün yüzey sıcaklığında yeterince soğuma yapamadığı gözlenmiştir.

1000 V – 1 m/s

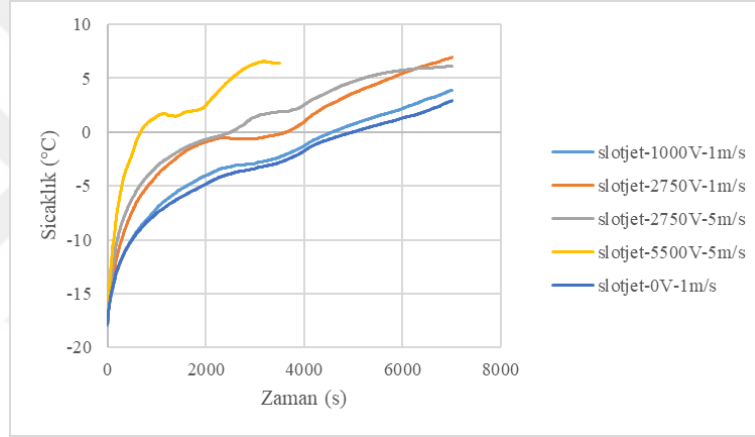


Şekil 4.63 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sonunda elde edilen ürün yüzey sıcaklık dağılımı

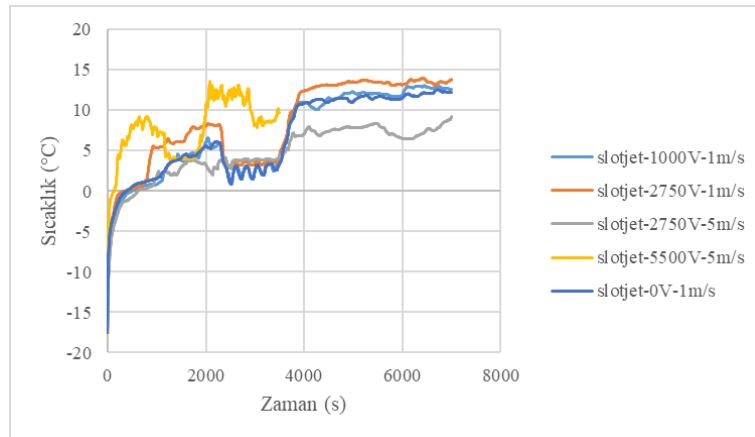
Ürün hacimsel sıcaklık ortalama



Ürün tüm yüzeyler sıcaklık ortalama



Ürün üst köşe noktası

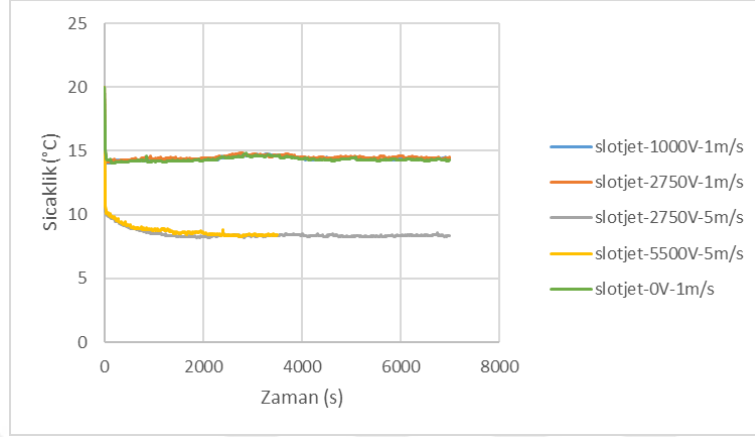


Şekil 4.64 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında ürün hacimsel sıcaklık ortalaması, tüm yüzeylerin sıcaklık ortalaması ve ürün köşe noktasının sıcaklığının zamanla değişimi

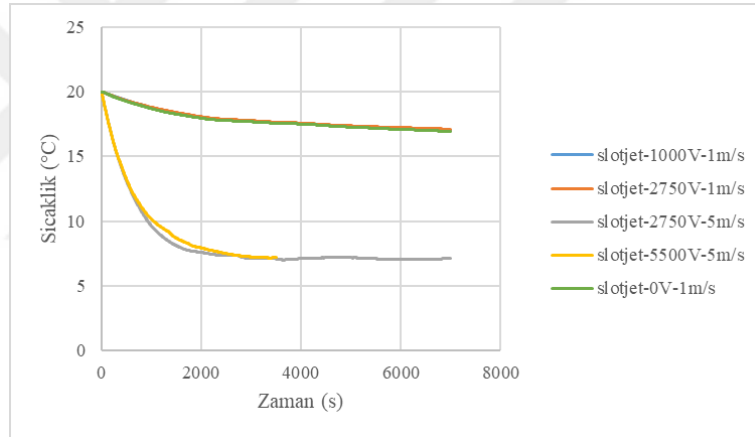
İki kaviteli tünel RF sistemde doğal konveksiyon durumunda sıcaklık tekdüzelik indeksi 0,32 iken hava üfleme slot jetlerinin RF sistem ile kombine edilmesi sıcaklık tekdüzelik indeksine önemli bir pozitif etkisi olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.63). Hem ürün yüzey sıcaklık dağılımına hem de ürün hacimsel tekdüzelik sıcaklık dağılımına bakıldığında en iyi sonuç 2750 V güç ve 1 m/s hava hızının uygulandığı durumda elde edilmiştir. Bu modeller sırasında ürün hacimsel, tüm yüzeyler ve köşe noktası sıcaklıklarının zamanla değişimi şekil 4.63’de gösterilmiştir. Uygulanan voltaj ve hava hızı değerleri arttırıldıkça ürün ortalama sıcaklığında artış gözlenmiştir. Uygulanan güç değerinin 2750 V güçten 5500 V güce çıkarıldığı durumda ürün hareket hızı iki katına çıkartılarak proses süresi kısaltılmıştır. İki kavite arasında uygulanan slot jet bölümünün etkisi ürün tüm yüzeylerinin sıcaklık ortalaması ve ürün köşe noktası sıcaklığında net bir şekilde görülmüştür. İlk kavitedeki ısınma slot jet bölümü ile kontrol altına alınsa da ikinci kavitede sıcaklık artışı devam etmiştir. Ancak hava hızının 5 m/s olduğu durumlarda kavite içerisindeki sıcaklığın 10 °C’lerin altına düşmesi ile yüzey sıcaklık artışı sınırlandırılmıştır (Şekil 4.64).

İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında üründeki, kavite içerisindeki havanın ve elektrotların sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.64, 4.65’de ayrıca “slotjet-0V-1m/s” isimli elektromanyetik enerjinin aktif olmadığı ama tüm diğer sınır ve başlangıç koşullarının aynı olduğu model sonuçları da paylaşılmıştır. Özellikle ürün sıcaklığı grafiklerinde radyo frekansın aktif olmadığı durum ile potansiyel fark değerinin 1000 V uygulandığı durumda elde edilen sonuçların çok benzerlik gösterdiği dikkat çekmiştir. Bu proses koşulu için potansiyel fark değerinin 1000 V olduğu durumda üründe yeterli bir sıcaklık artışı gerçekleştirilemediği ve ürünü ısıtmakta yetersiz bir değer olduğu dikkat çekmiştir. Serbest salınım prensibi ile çalışan radyo frekans sistemlerde elektrotlar arası potansiyel fark değeri kontrol edilememektedir. Ancak potansiyel fark değerinin ürün ısınma hızı üzerinde önemli bir parametre olduğu elde edilen sonuçlarda gözlenmiştir. Endüstriyel proses sırasında aynı anda proses edilen ürün adeti arttıkça elektrotlar arası potansiyel fark değerinin artacağı bilinse de ısınma hızında bir değişiklik olup olmayacağı araştırılmalıdır.

Kavite içerisindeki havanın sıcaklığı



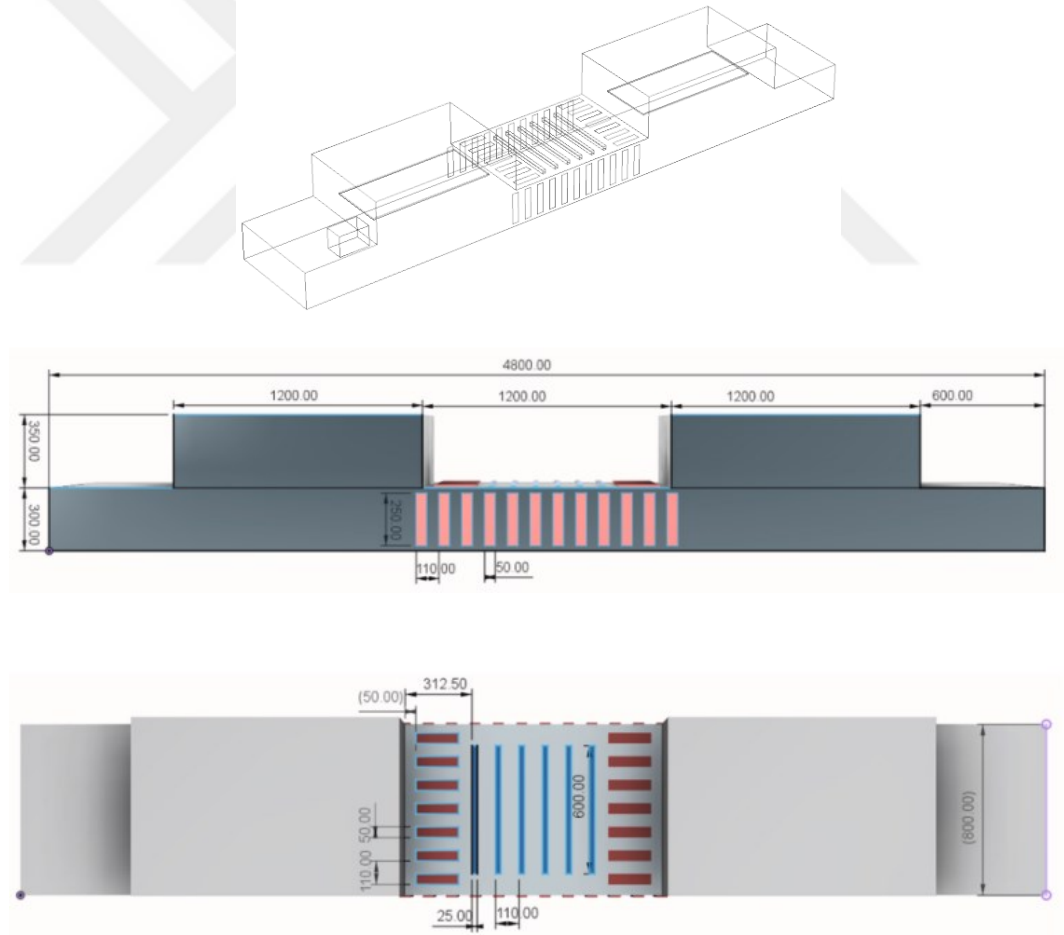
Potansiyel elektrotun sıcaklığı



Şekil 4.65 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde farklı koşullarda proses sırasında kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotun zamanla sıcaklık değişimi

Ancak kavite içerisindeki bu sıcaklık düşüşü endüstriyel üretimde proses sırasında potansiyel elektrotta yoğunlaşma sorununa sebep olması öngörülmüştür. İki kaviteli tünel RF sistemde slot jet bölümü iki kavite arasında geçiş bölümüne yerleştirilmiştir. Bu dizaynda slot jetlerden üflenen +4 °C soğuk hava kavitenin yan duvarlarına açılan pencerelerden dışarı atılması planlanmıştır. Ancak uzatılmış tek kaviteli RF sistemdeki gibi yeterli alan olmadığından soğuk hava potansiyel elektrotlara kolayca ulaşabilmektedir. Bu durumu kavitede dizayn edilecek çıkış pencerelerinin sayısı artırılarak istenilen

seviyeye çekilebileceğini göstermek adına şekil 4.66'daki tünel kavite oluşturulmuştur. İki kavite arasındaki geçiş bölümü uzunluğu artırılarak yan duvarlardaki hava çıkış pencere sayısı arttırılırken üst duvarda ekstra hava çıkış bölmeleri eklenmiştir. Bu dizaynda model çalışması 5500 V ve 5 m/s hava hızı olduğu durumda tekrarlanmıştır, slot jet bölümünün uzunluğu arttırıldığından aynı prosese uygun olacak şekilde proses süresi 4000 saniye olacak şekilde ürün hareket hızı ayarlanmıştır. Şekil 4.67'de kavite içerisindeki hava ve potansiyel elektrotların sıcaklık ortalamasının değişimi gösterilmiştir. Slot jet bölümünde yapılan dizayn değişiklikleri sayesinde kavite içerisindeki havanın ve potansiyel elektrotların sıcaklık düşüşü azaltılmıştır. Yoğuşma açısında elde edilen sıcaklıklar kritik seviyelerde olsa da dizayn ve optimizasyon çalışmaları ile proses sırasında sorun teşkil etmeyecek sıcaklık değerlerine ulaşılacağı gösterilmiştir.

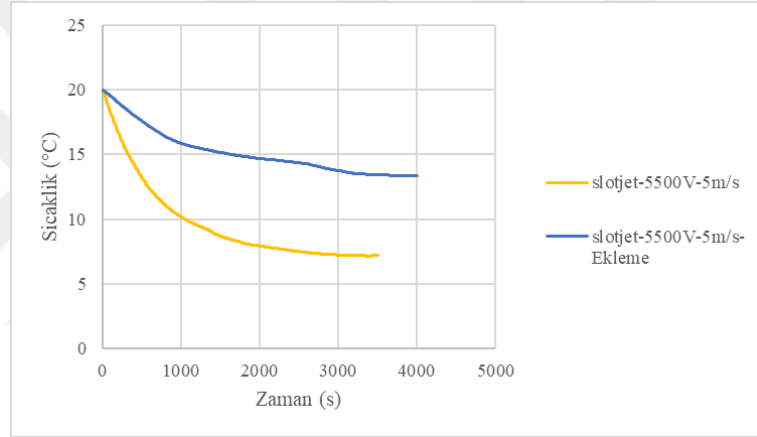


Şekil 4.66 Dizaynında değişiklikler yapılarak slot jet bölümünün uzatıldığı ve yeni hava çıkış bölmelerinin eklendiği iki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemin üç boyutlu dizaynı ve teknik çizimi

Kavite içerisindeki havanın sıcaklığı



Potansiyel elektrotun sıcaklığı



Şekil 4.67 İki kaviteli slot jet ile kombineli tünel radyo frekans sistemde 5500 V güç ve 5 m/s hava hızının uygulandığı durum ile sistem dizaynına eklemeler yapılan durumda kavite içindeki havanın ve potansiyel elektrotların sıcaklık ortalaması

5. SONUÇ

Yenilikçi gıda proseslerinden biri olarak görülen radyo frekans sistem kapsamında ısıtma ve çözündürme işlemleri hem deneysel hem de matematiksel model ortamında incelenerek karşılaştırılmıştır. Radyo frekans prosesinde ürün sıcaklık dağılımını hem ürün bazlı değişiklikler hem de sistem özellikleri ve koşulları önemli bir şekilde etkilemektedir. Bu doğrultuda plaka, çapraz ve püskül elektrot dizaynının etkisi ilk önce matematiksel model ortamında daha sonra plaka ve çapraz elektrot dizaynına sahip üç farklı radyo frekans sistemde incelenmiştir. Elektrot dizaynının yanında potansiyel elektrotun kavite içerisindeki konumunun ürün sıcaklık dağılımına etkisi de Georgia Üniversitesi, Ankara ve Gaziantep Üniversitelerinde bulunan radyo frekans sistemlerde yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Tylose ısıtma deneylerinden elde edilen deneysel veriler geliştirilen matematiksel modellerin doğrulanmasında kullanılmıştır. Bu aşamada her bir sistemde üç farklı elektrot yüksekliği kullanılarak hem elektrot yüksekliğinin ürün sıcaklığına etkisini göstermiş hem de matematiksel modellerin güvenilirliğini arttırmıştır.

Ankara Üniversitesinde bulunan radyo frekans sistemde blok ton balığı örnekleri kullanılarak çözündürme prosesi uygulanmıştır. Yapılan bu deneyler ile radyo frekansının geniş ürünlerdeki etkinliği gözlenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ile geliştirilen matematiksel modeller doğrulanmıştır. Bu aşamada proses sırasında ürün etrafındaki havanın sıcaklığının ürün sıcaklık dağılımına doğal konveksiyondan dolayı önemli bir etkisi olabileceği tespit edilmiştir. Ürün sıcaklık dağılımı yanında çözündürme prosesinde kavite içerisindeki havanın ve elektrot sıcaklığının yoğunlaşma açısından önemli olabileceği deneyler sırasında gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ve genel olarak literatürde yapılan çalışmalar doğrultusunda radyo frekans prosesinde ürün köşe ve kenarlarında görülen yüksek sıcaklıklar tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilmesindeki en önemli engel olarak gözlenmiştir. Radyo frekans sistemler hava üfleme sistemler ile kombine edilerek kesikli tek kavite ve iki kaviteli sürekli tünel sistemler tasarlanmıştır. Çözündürme prosesi uygulanan bu sistemlerde uygulanan potansiyel elektrotun gücü ve üflenilen +4 °C havanın hızının ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Tek kaviteli kesikli radyo frekans sistemde kavitenin yan

duvarlarına yerleştirilen hava jetlerinin ürün sıcaklık dağılımına pozitif etkisi olsa da arzu edilen kadar bir gelişme elde edilememiştir. İki kaviteli sürekli tünel radyo frekansı başlığı altında tasarlanan iki sistemde kavitenin üst duvarına yerleştirilen slot jetler sayesinde ürünün sıcaklık dağılımına ciddi bir pozitif etkisi olmuştur. Her iki sistemde de 2750 V güç ve 1 m/s hava hızı uygulandığında en düşük sıcaklık tekdüzelik indeksi elde edilmiştir.

Tez kapsamında radyo frekans prosesinde etkili olan parametreler hem deneysel hem de matematiksel model ortamında incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda çözündürme prosesi için radyo frekans sistemler ile hava üfleme sistemler kombine edilerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Hava üfleme sistemlerinden uygulanan +4 °C hava ile ürünün sıcaklık dağılımında tekdüzelik anlamında pozitif sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmaları ile elde edilen sonuçlar geliştirilebilir, farklı ürünlere uygulanabilir ya da farklı prosesler için denenebilir.

Karbon ayak izinin küresel anlamda takip edilmesi ve bu konuda kısıtlamalar ve yönergelerin yayınlandığı bir dönemde gıda endüstrisinin de yüksek enerji harcaması olan geleneksel yöntemlerden yenilikçi proseslere geçiş yapması gerekmektedir. Karbon ayak izi anlamında özellikle elektrikle çalışan ve yüksek enerji verimliliği olan sistemlerin bu dönemde öne çıkması beklenmektedir. Radyo frekans sistemlerini farklı proses ekipmanları ile kombinleyerek yenilikçi proses sistemlerinin oluşturulması gerektiği düşünülmüştür.

Oluşturulan bu tezin radyo frekans sistem geliştirilmesine ışık tutması hedeflenmiştir. Aynı zamanda gıda endüstrisinin gelecekte gireceği değişim serüveninde matematiksel modellemenin önemi gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alfaifi, Bandar, Juming Tang, Yang Jiao, Shaojin Wang, Barbara Rasco, Shunshan Jiao, ve Shyam Sablani. 2014. "Radio Frequency Disinfestation Treatments for Dried Fruit: Model Development and Validation." *Journal of Food Engineering* 120 (1): 268–76.
- Altemimi, Ammar, Salah Naji Aziz, Asaad R S Al-Hilphy, Naoufal Lakhssassi, Dennis G Watson, ve Salam A Ibrahim. 2019. "Critical Review of Radio-Frequency (RF) Heating Applications in Food Processing." *Food Quality and Safety* 3 (2): 81–91.
- Altin, Ozan, Francesco Marra, ve Ferruh Erdogdu. 2022. "Computational Study for Natural Convection Effects on Temperature during Batch and Continuous Industrial Scale Radio Frequency Tempering/Thawing Processes." *Journal of Food Engineering* 312 (November 2020): 110743.
- Anderson, Brent A., ve R. Paul Singh. 2006. "Modeling the Thawing of Frozen Foods Using Air Impingement Technology." *International Journal of Refrigeration* 29 (2): 294–304.
- Anese, Monica, Lara Manzocco, Agnese Panozzo, Paola Beraldo, Martina Foschia, ve Maria Cristina Nicoli. 2012. "Effect of Radiofrequency Assisted Freezing on Meat Microstructure and Quality." *Food Research International* 46 (1): 50–54.
- Bedane, Tesfaye F., Ozan Altin, Busra Erol, Francesco Marra, ve Ferruh Erdogdu. 2018. "Thawing of Frozen Food Products in a Staggered Through-Field Electrode Radio Frequency System: A Case Study for Frozen Chicken Breast Meat with Effects on Drip Loss and Texture." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 50 (May): 139–47.
- Bedane, Tesfaye F., Ferruh Erdogdu, James G. Lyng, ve Francesco Marra. 2021. "Effects of Geometry and Orientation of Food Products on Heating Uniformity during Radio Frequency Heating." *Food and Bioprocess Processing* 125: 149–60.
- Bermudez-aguirre, Daniela, ve Brendan A Niemira. 2023. Radio Frequency Treatment of Food : A Review on Pasteurization and disinfestation. *Foods*, 12(16), 3057
- Birla, S. L., S. Wang, and J. Tang. 2008. "Computer Simulation of Radio Frequency Heating of Model Fruit Immersed in Water." *Journal of Food Engineering* 84 (2): 270–80. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.020>.
- Chen, Fangyuan, Alexander D. Warning, Ashim K. Datta, ve Xing Chen. 2016. "Thawing in a Microwave Cavity: Comprehensive Understanding of Inverter and Cycled Heating." *Journal of Food Engineering* 180: 87–100.
- Chen, Jiajia, Krishnamoorthy Pitchai, Sohan Birla, David Jones, Mehrdad Negahban, ve Jeyamkondan Subbiah. 2016. "Modeling Heat and Mass Transport during Microwave Heating of Frozen Food Rotating on a Turntable." *Food and Bioprocess Processing* 99: 116–27.

- Chen, Yixuan, Jialing He, Feng Li, Juming Tang, ve Yang Jiao. 2021. "Model Food Development for Tuna (*Thunnus Obesus*) in Radio Frequency and Microwave Tempering Using Grass Carp Mince." *Journal of Food Engineering* 292 (July 2020): 110267.
- Erdogdu, F., O. Altin, F. Marra, ve T.F. Bedane. 2017. "A Computational Study to Design Process Conditions in Industrial Radio-Frequency Tempering/Thawing Process." *Journal of Food Engineering* 213.
- Erdogdu, Ferruh, Maria Ferrua, Samrendra K. Singh, ve R. Paul Singh. 2007. "Air-Impingement Cooling of Boiled Eggs: Analysis of Flow Visualization and Heat Transfer." *Journal of Food Engineering* 79 (3): 920–28.
- Erdogdu, Ferruh, Fabrizio Sarghini, ve Francesco Marra. 2017. "Mathematical Modeling for Virtualization in Food Processing." *Food Engineering Reviews* 9 (4): 295–313.
- Farag, K. W., E. Duggan, D. J. Morgan, D. A. Cronin, ve J. G. Lyng. 2009. "A Comparison of Conventional and Radio Frequency Defrosting of Lean Beef Meats: Effects on Water Binding Characteristics." *Meat Science* 83 (2): 278–84.
- Farag, K. W., J. G. Lyng, D. J. Morgan, ve D. A. Cronin. 2008. "Dielectric and Thermophysical Properties of Different Beef Meat Blends over a Temperature Range of -18 to +10 °C." *Meat Science* 79 (4): 740–47.
- Gao, Jilong, Mingtai Wu, Sicheng Du, Hao Zhang, Shaojin Wang, ve Bo Ling. 2023. "Recent Advances in Food Processing by Radio Frequency Heating Techniques : A Review of Equipment Aspects." *Journal of Food Engineering* 357 (June): 111609.
- Huang, Zhi, Francesco Marra, Jeyamkondan Subbiah, ve Shaojin Wang. 2018. "Computer Simulation for Improving Radio Frequency (RF) Heating Uniformity of Food Products: A Review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58 (6): 1033–57.
- Huang, Zhi, Francesco Marra, ve Shaojin Wang. 2016. "A Novel Strategy for Improving Radio Frequency Heating Uniformity of Dry Food Products Using Computational Modeling." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 34: 100–111.
- Huang, Zhi, Bo Zhang, Francesco Marra, ve Shaojin Wang. 2016. "Computational Modelling of the Impact of Polystyrene Containers on Radio Frequency Heating Uniformity Improvement for Dried Soybeans." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 33: 365–80.
- Jain, Deepali, Juming Tang, Patrick D. Pedrow, Zhongwei Tang, Shyam Sablani, ve Yoon Ki Hong. 2019. "Effect of Changes in Salt Content and Food Thickness on Electromagnetic Heating of Rice, Mashed Potatoes and Peas in 915 MHz Single Mode Microwave Cavity." *Food Research International* 119 (January 2018): 584–95.

- Jiang, Hanting, Huayu Yang, Wenhai Zhang, Bowen Yan, ve Nana Zhang. 2023. "Computational Study on Radio Frequency Thawing of Irregularly Shaped Aquatic Product : Using Hairtail Fish as an Example." *Journal of Food Engineering* 354 (April): 111564.
- Jiang, Jiwei, Hongli Wang, Xueqian Guo, ve Xichang Wang. 2021. "Effect of Radio Frequency Tempering on the Color of Frozen Tilapia Fillets." *Lwt* 142 (December 2020).
- Jiao, Shunshan, Yun Deng, Yu Zhong, Danfeng Wang, ve Yanyun Zhao. 2015. "Investigation of Radio Frequency Heating Uniformity of Wheat Kernels by Using the Developed Computer Simulation Model." *Food Research International* 71: 41–49.
- Jiao, Yang, Juming Tang, ve Shaojin Wang. 2014. "A New Strategy to Improve Heating Uniformity of Low Moisture Foods in Radio Frequency Treatment for Pathogen Control." *Journal of Food Engineering* 141: 128–38.
- Karatas, Ozan, Rahmi Uyar, Berkay Berk, H. Mecit Oztop, Francesco Marra, ve Ferruh Erdogdu. 2023. "Honey De-Crystallization by Radio Frequency Heating for Process Efficiency: Computational Monitoring Combined with Time Domain Nuclear Magnetic Resonance." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 85 (January): 103345.
- Lee, Sang Yoon, Eun Jeong Kim, Dong Hyeon Park, ve Mi Jung Choi. 2021. "Two-Stage Air Thawing as an Effective Method for Controlling Thawing Temperature and Improving the Freshness of Frozen Pork Loin." *Lwt* 140 (December 2020): 110668.
- Li, Feng, Yali Zhu, Shuang Li, Pinzheng Wang, Ruyi Zhang, Juming Tang, Tony Koral, ve Yang Jiao. 2021. "A Strategy for Improving the Uniformity of Radio Frequency Tempering for Frozen Beef with Cuboid and Step Shapes." *Food Control* 123 (January 2020): 107719.
- Li, Yulin, Feng Li, Juming Tang, Ruyi Zhang, Yifen Wang, Tony Koral, ve Yang Jiao. 2018. "Radio Frequency Tempering Uniformity Investigation of Frozen Beef with Various Shapes and Sizes." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 48 (May): 42–55.
- Liu, Shixiong, Xingyi Yu, Mika Fukuoka, ve Noboru Sakai. 2014. "Modeling of Fish Boiling under Microwave Irradiation." *Journal of Food Engineering* 140: 9–18.
- Llave, Yvan, ve Ferruh Erdogdu. 2022. "Radio Frequency Processing and Recent Advances on Thawing and Tempering of Frozen Food Products." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 62 (3): 598–618.
- Llave, Yvan, Shixiong Liu, Mika Fukuoka, ve Noboru Sakai. 2015. "Computer Simulation of Radiofrequency Defrosting of Frozen Foods." *Journal of Food Engineering* 152: 32–42.

- Llave, Yvan, Yuina Terada, Mika Fukuoka, ve Noboru Sakai. 2014. "Dielectric Properties of Frozen Tuna and Analysis of Defrosting Using a Radio-Frequency System at Low Frequencies." *Journal of Food Engineering* 139: 1–9.
- Marra, Francesco, James Lyng, Vittorio Romano, ve Brian McKenna. 2007. "Radio-Frequency Heating of Foodstuff: Solution and Validation of a Mathematical Model." *Journal of Food Engineering* 79 (3): 998–1006.
- Mohamed, Mohamed A., Kai Knoerzer, Maged Peter Mansour, Francisco J. Trujillo, Pablo Juliano, ve Pushkar Shrestha. 2020. "Improved Canola Oil Expeller Extraction Using a Pilot-Scale Continuous Flow Microwave System for Pre-Treatment of Seeds and Flaked Seeds." *Journal of Food Engineering* 284 (December 2019): 110053.
- Ozturk, Samet, Fanbin Kong, Rakesh K. Singh, Jesse Daniel Kuzy, ve Changying Li. 2017. "Radio Frequency Heating of Corn Flour: Heating Rate and Uniformity." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 44 (October 2016): 191–201.
- Peng, Jing, Xu Yin, Shunshan Jiao, Kangli Wei, Kang Tu, ve Leiqing Pan. 2019. "Air Jet Impingement and Hot Air-Assisted Radio Frequency Hybrid Drying of Apple Slices." *Lwt* 116 (May): 108517.
- Qu, Yingtao, Hosahalli Ramaswamy, ve Shaojin Wang. 2020. "Determining the Top Electrode Voltage in Free-Running Oscillator Radio Frequency Heating of Soybeans under Different Electrode Configurations." *Food and Bioprocess Processing* 122: 332–41.
- Risman, P. O. 1991. Terminology and notation of microwave power and electromagnetic energy. *Journal of Microwave Power*, 26, 243-250
- Rowley, A.T. 2001. *Radio Frequency Heating. Thermal Technologies in Food Processing*. Woodhead Publishing Limited.
- Shrestha, Bijay, ve Oon Doo Baik. 2019. "Multi-Physics Computer Simulation of Radio Frequency Heating to Control Pest Insects in Stored-Wheat." *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 12 (1): 71–80.
- Sosa-Morales, M. E., L. Valerio-Junco, A. López-Malo, ve H. S. García. 2010. "Dielectric Properties of Foods: Reported Data in the 21st Century and Their Potential Applications." *LWT - Food Science and Technology* 43 (8): 1169–79.
- Tian, Yingqi, Mengge Li, Xiangyu Guan, Rui Li, Hosahalli Ramaswamy, ve Shaojin Wang. 2023. "Developing Practical and Small-Scale Radio Frequency Technology for Tempering Minced Chicken Breast at Home." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 86 (May): 103384.
- Tiwari, G., S. Wang, J. Tang, ve S. L. Birla. 2011. "Analysis of Radio Frequency (RF) Power Distribution in Dry Food Materials." *Journal of Food Engineering* 104 (4): 548–56.

- Topcam, Huseyin, Fahrettin Gogus, Hatice Neval Ozbek, Aysel Elik, Derya Kocak Yanik, Ali Coskun Dalgic, ve Ferruh Erdogan. 2022. "Hot Air-Assisted Radio Frequency Drying of Apricots: Mathematical Modeling Study for Process Design." *Journal of Food Science* 87 (2): 764–79.
- Uyar, Rahmi, Tesfaye Faye Bedane, Ferruh Erdogan, T. Koray Palazoglu, Karim W. Farag, ve Francesco Marra. 2015. "Radio-Frequency Thawing of Food Products - A Computational Study." *Journal of Food Engineering* 146: 163–71.
- Uyar, Rahmi, Ferruh Erdogan, ve Francesco Marra. 2014. "Effect of Load Volume on Power Absorption and Temperature Evolution during Radio-Frequency Heating of Meat Cubes: A Computational Study." *Food and Bioprocess Processing* 92 (3): 243–51.
- Uyar, Rahmi, Ferruh Erdogan, Fabrizio Sarghini, ve Francesco Marra. 2016. "Computer Simulation of Radio-Frequency Heating Applied to Block-Shaped Foods: Analysis on the Role of Geometrical Parameters." *Food and Bioprocess Processing* 98: 310–19.
- Wang, Kun, Hankun Zhu, Long Chen, Wei Li, ve Shaojin Wang. 2015. "Validation of Top Electrode Voltage in Free-Running Oscillator Radio Frequency Systems with Different Moisture Content Soybeans." *Biosystems Engineering* 131: 41–48.
- Wang, Penghao, Jiaying Liu, Yuxiao Mao, Xiangyu Guan, ve Shaojin Wang. 2021. "Improvement of Radio Frequency Heating Uniformity for Millets by Changing Shape and Adding Polypropylene Blocks." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 74 (July): 102856.
- Wang, Wenjun, Juming Tang, ve Yanyun Zhao. 2021. "Investigation of Hot-Air Assisted Continuous Radio Frequency Drying for Improving Drying Efficiency and Reducing Shell Cracks of Inshell Hazelnuts: The Relationship between Cracking Level and Nut Quality." *Food and Bioprocess Processing* 125: 46–56.
- Wang, Zhaotian, Xiangyu Guan, Yuxiao Mao, Rui Li, ve Shaojin Wang. 2022. "Developing Cold Air Assisted Radio Frequency Tempering Protocol Based on Heating Rate, Uniformity, and Quality of Frozen Chicken Breast." *Journal of Food Engineering* 340 (August 2022): 111302.
- Yang, Huayu, Qian Chen, Hongwei Cao, Daming Fan, Jianlian Huang, Jianxin Zhao, Bowen Yan, Wenguo Zhou, Wenhai Zhang, ve Hao Zhang. 2019. "Radiofrequency Thawing of Frozen Minced Fish Based on the Dielectric Response Mechanism." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 52 (October 2018): 80–88.
- Yu, Daeung, Bijay Shrestha, ve Oon Doo Baik. 2019. "Computer Simulation of Heat Transfer for Disinfestation of Red Flour Beetle, *Tribolium Castaneum* (Herbst) in Stored Canola Seeds (*Brassica Napus* L.) by Radio Frequency Heating." *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 12 (3): 297–314.

- Yu, L. H., E. S. Lee, J. Y. Jeong, H. D. Paik, J. H. Choi, ve C. J. Kim. 2005. "Effects of Thawing Temperature on the Physicochemical Properties of Pre-Rigor Frozen Chicken Breast and Leg Muscles." *Meat Science* 71 (2): 375–82.
- Zhang, Bo, Ajuan Zheng, Liyang Zhou, Zhi Huang, ve Shaojin Wang. 2016. "Developing Hot Air-Assisted Radio Frequency Drying Protocols for in-Shell Walnuts." *Emirates Journal of Food and Agriculture* 28 (7): 459–67.
- Zhang, L., J. G. Lyng, N. Brunton, D. Morgan, ve B. McKenna. 2004. "Dielectric and Thermophysical Properties of Meat Batters over a Temperature Range of 5-85 °C." *Meat Science* 68 (2): 173–84.
- Zhang, Shuang, Hosahalli Ramaswamy, ve Shaojin Wang. 2019. "Computer Simulation Modelling, Evaluation and Optimisation of Radio Frequency (RF) Heating Uniformity for Peanut Pasteurisation Process." *Biosystems Engineering* 184: 101–10.
- Zhang, Yajin, Feng Li, Yao Yao, Jialing He, Juming Tang, ve Yang Jiao. 2021. "Effects of Freeze-Thaw Cycles of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) Subjected to Radio Frequency Tempering on Melanosis and Quality." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 74 (October): 102860.