ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GIDA ÜRÜNLERİNİN MİKRODALGA UYGULAMA İLE ISITILMASI VE (DONDURULMUŞ ÜRÜNLERİN) ÇÖZDÜRÜLMESİNDE BASINCIN ETKİSİ

Ozan ALTIN

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2017

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Ozan ALTIN tarafından hazırlanan **"Gıda Ürünlerinin Mikrodalga Uygulama ile Isıtılması ve (Dondurulmuş Ürünlerin) Çözdürülmesinde Basıncın Etkisi"** adlı tez çalışması 22/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Şebnem TAVMAN
Ege Üniversitesi Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı

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

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

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

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

22.12.2017

Ozan ALTIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GIDA ÜRÜNLERİNİN MİKRODALGA UYGULAMA İLE ISITILMASI VE (DONDURULMUŞ ÜRÜNLERİN) ÇÖZDÜRÜLMESİNDE BASINCIN ETKİSİ

Ozan ALTIN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Kondüksiyon ve konveksiyona bağlı olarak gerçekleşen geleneksel çözdürme proseslerinde ürün içerisinde oluşan sıcaklık farkı önemli kalite kayıplarına neden olmaktadır. Çözdürme süresinin azaltılması ve ürün içi sıcaklık dağılımının tekdüze oması için çeşitli yenilikçi prosesler geliştirilmekte olup mikrodalga uygulaması gıda sanayinde uygulanma potansiyeli olan bir prosestir. Ancak, hacimsel ısınma sağlama ve proses süresini azaltma gibi avantajlarının yanında sistem içinde homojen olmayan elektromanyetik alan ve ürün içinde düzensiz sıcaklık dağılımına neden olmaktadır. Bundan dolayı ürün içerisinde fazla ısınmış bölgeler oluşmaktadır. Bu durum, çözdürme prosesinde, donmuş ve çözünmüş bölgelerin dielektrik özelliklerindeki farka bağlı olarak gözlenmektedir. Uygulanan güç düzeyi, ürüne verilen dönme hareketi ve ürün geometrisi proses tasarımı amacıyla kullanılabilen parametreler olup literatürde genel olarak deneysel çalışmalara bağlı deneme – yanılma yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı mikrodalga ısıtma – çözdürme prosesini sistem içi elektik alan ve ürün içi sıcaklık dağılımı kapsamında tanımlamak için bir matematiksel model geliştirmektir. Bu çalışma özel tasarlanmış bir sistemde (Gigatherm (Flawil, Switzerland) firması tarafından yapılan) gerçekleştirilmiş ve deneysel doğrulama çalışmaları için %77 su oranında Tylose jeli kullanılmıştır. Çözdürme prosesine basıncın etkisi düşünülerek 2 bar basınç altında ısıtma ve çözdürme deneyleri ayrıca gerçekleştirilmiş ve mikrodalga uygulama sırasında sıcaklık değişimine basıncın etkisi belirlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen matematiksel modeller kullanılarak doğrulanan proses koşullarında, dondurulmuş morina balıklarının çözdürülmesi için bir yöntem geliştirilmiş ve dur – kalk uygulamalı güç etkisi ile dönme prosesinin birlikte kullanılması ile en uygun çözdürme şartları belirlenmiştir. Bu çalışmanın üniversite – sanayi ortak çalışmalarına katkı sağlayacağı ve sonuçlarının endüstriyel proses koşullarının belirlenmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Aralık 2017, 124 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga çözdürme, basınç etkisi, morina balığı

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECT OF PRESSURE ON MICROWAVE HEATING
AND THAWING OF (FROZEN) FOOD PRODUCTS

Ozan ALTIN

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

Supervisor : Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

In conventional thawing processes, heat transfer generally occurs by conduction and convection with a significant difference between surface and center temperatures leading to quality loses. Innovative approaches were developed to reduce thawing time and uniform the temperature distribution. Microwave heating is such a process to apply in food industry. It is accepted to provide volumetric heating and reduce process time. Compared to these advantages, non-homogeneous electromagnetic field in the cavity results in a non-uniform temperature distribution within product with overheated sections. This is especially valid during thawing due to the significant difference in dielectric properties of frozen and unfrozen parts. Various parameters such as rotation, power level and sample geometry affect microwave thawing, and design - optimization of this process generally relies on experimental trial-error approaches. Therefore, the objective of this study was to develop a mathematical model to evaluate heating - thawing process using a specially designed microwave system (built by Gigatherm, Flawil, Switzerland). Tylose gel (77 % moisture content - wb) heating - thawing experiments were carried out to validate the developed models. In addition, considering the pressure, mild pressure effects up to 2 bar were evaluated on heating rate. After demonstrating the pressure effects and effective use of the models for design purposes, thawing conditions were experimentally determined for cod fish where the best performance was obtained with a stop-go applied power and rotation. The results of this study are expected to be used for industrial process conditions and to contribute to industry – university collaborated studies.

December 2017, 124 pages

Key Words: Microwave thawing, pressure effects, cod fish thawing

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyerek bana yol gösteren, yardımını esirgemeyen, sürekli araştırmaya ve yenilikçi çalışmalara teşvik ederek kendimi geliştirmemi sağlayan ve bir danışman hocadan fazlası olduğu için Sayın Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Mikrodalga modellerimi yaparken bana destek olan Hüseyin TOPÇAM, Ozan KARATAŞ ve Büşra EROL'a,

Bu süreçte yol arkadaşım olan, bana sabır gösteren ve konuşarak beni neşelendirmeye çalışan Eda COŞKUN'a,

Yüksek lisans yapmam için beni teşvik eden ve her zaman yanımda olan çok değerli dostlarım, Buğra BİLKİ ve Cansu HASARPA'ya,

Tez yazım aşaması boyunca hep yanımda olan, bana inanan ve değerli fikirlerini aktaran Berfu İNCEÇAM'a,

Her zaman olduğu gibi tez yazım aşamasında da çözemediği matematik sorularını getirerek ya da 'bilgisayarda oyun oynayalım mı?' diyerek dikkatimi dağıtan yakışıklı biricik kardeşim Hakan ALTIN'a,

Benim tüm kararlarımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, hayatımın en değerlileri annem Saniye ALTIN ve babam Şaban ALTIN'a yaptıkları tüm fedakarlıklar için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deneysel çalışmaları boyunca deneyimi ve bilgisiyle bana yol gösteren Dagbjørn Skipnes ve Torstein Skåra'ya,

Tez çalışmasının Stavanger, Norveç'te gerçekleşmesini sağlayan, YİTAK (Yeni İş Tecrübeleri için Ankara Konsorsiyumu) programını yürüten Ankara Ticaret Odası'na ve Sayın Özge ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ozan ALTIN
Ankara, Aralık 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK……..i

ÖZET……ii

ABSTRACT……iii

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR……iv

İÇİNDEKİLER……....v

SİMGELER DİZİNİ……...…..vii

ŞEKİLLER DİZİNİ…….....viii

ÇİZELGELER DİZİNİ……...xiii

1. GİRİŞ……1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI……6

2.1 Geleneksel Çözdürme Yöntemleri ve Dezavantajları……6

2.2 Yenilikçi Çözdürme Yöntemleri……...8

2.2.1 Vakum ve yüksek basınç uygulaması ile çözdürme……8

2.2.2 Dielektrik çözdürme yöntemleri……..11

3. MATERYAL ve YÖNTEM……..26

3.1 Materyal……...…26

3.1.1 Çalışmalarda kullanılan mikrodalga sistem…….....26

3.1.2 Kullanılan ürünler……29

3.2 Yöntem……..32

3.2.1 Matematiksel modelleme çalışmaları……..32

3.2.2 Deneysel çalışmalar…….....44

3.2.2.1 Mikrodalga ısıtma ve çözdürme prosesine basıncın etkisi……...44

3.2.2.2 Dondurulmuş morina balıklarının mikrodalga uygulama ile çözdürülmesi……...45

4. BULGULAR ve TARTIŞMA……...……47

4.1 Tylose Isıl İşlem Uygulaması ve Deneysel Doğrulama çalışmaları…….....48

4.1.1 MW uygulama ile ısıtma çalışmaları…….....48

4.1.1.1 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durum……48

4.1.1.2 Merkezde dönme işlemi uygulanan durum…….....51

4.1.1.3 Sistem merkezi dışında dönme işlemi uygulanmayan durum……...58

4.1.1.4 Merkez dışında dönme işlemi uygulanan durum……..….60

4.1.2 MW uygulama ile çözdürme çalışmaları……...….64

4.1.2.1 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan ve uygulanan durum……..64

4.1.2.2 Merkez dışında dönme işlemi uygulanmayan ve uygulanan durum……....68

4.1.2.3 Penetrasyon derinliğinin ürün sıcaklık değişimine etkisi……..72

4.1.2.4 Sistem içi elektromanyeik alan dağımına sistem geometrisinin etkisi……..74

4.2 Basınç Altında Tylose Isıl İşlem Uygulamaları…….77

4.2.1 Döner tabla merkez konumunda 2 bar basınç altında ısıl işlem uygulaması…….77

4.2.2 Döner tabla merkez konumunda 2 bar basınç altında çözdürme çalışması……..78

4.3 Dondurulmuş Morina Balıklarının Mikrodalga Uygulama ile Çözdürülmesi……...…80

4.3.1 Sistem merkezinde tek ürün bulunması ve dönme işlemi uygulanmayan durumda gerçekleştirilen çözdürme çalışmaları…….….80

4.3.2 Merkez dışı konuma yerleştirilen ve dönme işlemi uygulanan durumda iki ürünün eş zamanlı çözdürme prosesi……..……82

4.3.3 Merkez dışı konuma yerleştirilen ve dönme işlemi uygulanan durumda iki ürünün dur - kalk güç uygulaması ile çözdürülmesi…….…84

5. SONUÇ……...90

KAYNAKLAR……...93

EKLER……...98

EK 1 Tylose ısıl işlemler (ısıtma, çözdürme) proseslerinde deney ve matematiksel model noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması…..…..99

EK 2 Tylose ısıl işlemler (ısıtma, çözdürme) proseslerinin matematiksel modellerinde farklı duurmlarda ürün yüzey sıcaklık, hacim sıcaklık ortalaması, maksimum sıcaklık ve absorbe edilen güç……..……109

EK 3 Tylose merkez – sabit durumda çözdürme prosesinde penetrasyon derinliği…….115

EK 4 Tylose ısıl işlem (ısıtma, çözdürme) proseslerinde merkez sabit durumda basınç altında (2 bar) ve atmosferik basınç altındaki deneylerin noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması……...……118

EK 5 Dondurulmuş morina balıklarının dur – kalk güç uygulamasıyla Çözdürülmesi……...……...122

ÖZGEÇMİŞ…….……124

SİMGELER DİZİNİ

cm	Santimetre
°C	Santigrat Derece
dk.	Dakika
s	Saniye
ε'	Dielektrik Sabiti
ε"	Dielektrik Kayıp faktörü
ε_r	Permitivite
ε_0	Boşluğun geçirgenlik değeri (8.854×10^{-12} F/m)
μ_r	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluktaki manyetik geçirgenlik
f	Frekans (Hz)
f_c	Kesim frekansı (Hz)
c	Işık hızı (3×10^8 m/s)
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
Λ	Dalga boyu (cm)
$tan\delta$	Tanjant kayıp faktörü
j	$\sqrt{-1}$ değeri
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{B}$	Manyetik akı şiddeti (Wb/m²)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
$\vec{D}$	Elektrik akı yoğunluğu (C/m²)
Q	Maddenin birim hacmi başına ısı üretim değeri ($J/m^3.s$)
Hz	Hertz
MHz	Mega Hertz
MPa	Mega Pascal
W	Watt (J/s)
kW	KiloWatt
K	Kelvin
rpm	Dakikada Devir
kg	Kilogram
C_p	Özgül ısısı (J/kg-K)

ρ	Yoğunluk (kg/m³)
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m-°C)
h	Isı transferi katsayısı (W/m²-°C)
k	Dalga sayısı
h	Öz değeri
t	Zaman

Kısaltmalar

MW	Mikrodalga
RF	Radyo Frekans
NaCl	Sodyum Klorür
FCC	Federal Communication Commission

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Geleneksel yöntemle çözdürme işlemi sırasında ürün merkez ve dış yüzey sıcaklık değişimi……	2
Şekil 2.1	Suyun faz diyagramının şeması……..….	10
Şekil 2.2	Mikrodalga kavite içerisinde elektromanyetik alan dağılımı……..…	14
Şekil 2.3	Radyo Frekansı uygulamasında elektromanyetik alan dağılımı……..	14
Şekil 2.4	Elektromanyetik alan etkisinde polar moleküllerin hareketi (Flores 2014 esinlenilmiştir)……	16
Şekil 2.5	Serbest iyonların elektromanyetik alan etkisinde hareketi (Flores 2014 esinlenilmiştir)……	16
Şekil 2.6	Magnetron……	17
Şekil 2.7	Materyallerin mikrodalgalarla etkileşimi; (a) transparan materyaller; (b) opak materyaller, (c) elektromanyetik enerjiyi absorbe eden materyaller……...	20
Şekil 2.8	Saf suyun ve tylose donma (çözünme) sıcaklığının basınç ile değişimi (Otero vd. 2008)……	24
Şekil 3.1	Nofima AS (Stavanger, Norveç)'de gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan mikrodalga sistem (Gigatherm, Flawil, Switzerland)…..…	28
Şekil 3.2	Elektromanyetik alanın mikrodalga sistem içerisinde izlediği yol…..	28
Şekil 3.3	Mikrodalga sistemde basınç ve güç değişim değerleri……	29
Şekil 3.4	Isıl işlem ve çözdürme deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanmış olan Tylose örneği ve içerisine yerleştirilmiş fiber optik problar…….……	30
Şekil 3.5	Fiber optik probların tylose örneği içerisine yerleştirilmesi (belirtilen uzunluk değerleri probların belirtilen noktada yüzeyden olan derinlik değerini göstermektedir)…….……	31
Şekil 3.6	Tylose'un MW sistem kavitesinin tablasında (a) merkez ve (b) merkez dışı konumu…….	33
Şekil 3.7	Kullanılan mikrodalga sistemin geometrisi…….....	34
Şekil 3.8	Tylose ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2015)…	35
Şekil 3.9	Tylose ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2015)…….	35
Şekil 3.10	Tylose dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2016).	36
Şekil 3.11	Dönme simülasyonlarında kullanılan silindirik koordinat ekseni…...	38
Şekil 3.12	Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılmak amacıyla oluşturulan ağ yapısı……	41

Şekil 3.13	MW sistemde proses sırasında sistem içinde 4 bar basıncı ulaşma süresi……	44
Şekil 3.14	Morina balıklarının MW sistemin tabla üzerindeki konumları……...	45
Şekil 3.15	MW sistemde kullanılan bir dur-kalk güç döngüsü……	46
Şekil 4.1	Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……...…...	50
Şekil 4.2	Tylose merkezde dönme etkisinin olmadığı durumda kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı (z=1.25)…….……	51
Şekil 4.3	Merkezde dönme işlemi uygulanan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……..…	52
Şekil 4.4	Şekil 4.4 Merkezde dönme işlemi uygulanan ve uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki merkez – sabit sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki merkez – dönme sonuçları)…….	55
Şekil 4.5	Ev tipi mikrodalgada ürünün merkezde sabit ve dönme etkisinin ANSYS modelleme 35. saniyedeki ürün yüzey sıcaklık dağılımı (a-b), üründeki maksimum sıcaklık değişimini (c) (Geedipalli, vd. 2007)……	56
Şekil 4.6	Merkez – sabit ve merkez – dönme matematiksel modellerinde kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alan karşılaştırılması (a) merkez – sabit (x-y; z=1.25),(b) merkez – dönme (x-y; z=1.25), (c) merkez – sabit (x-z; y=0), (d) merkez – dönme (x-z; y=0), (e) model süresi boyunca kaviteye gelen güç miktarı karşılaştırılması……...…	57
Şekil 4.7	Merkez dışında dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……..…	59
Şekil 4.8	Merkez dışında dönme işlemi uygulanan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……...…	61

Şekil 4.9	Merkez dışında dönme işlemi uygulanan ve uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – sabit sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – dönme sonuçları)…….……	62
Şekil 4.10	Ev tipi mikrodalgada ürün merkez – dönme (a) ve merkez dışı – dönme (b) matematiksel modellerinde ürün içindeki elektromanyetik alan değişimi (Raj vd. 2011)……	63
Şekil 4.11	Ev tipi mikrodalgada dondurulmuş patates püresinin merkez – dönme matematiksel modelinde ürünün absorbe ettiği güç ve dönme hareketinde kullanılan konumlar (Chen vd. 2016)……..	64
Şekil 4.12	Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……..…	65
Şekil 4.13	Merkezde dönme işlemi uygulanan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……..…	66
Şekil 4.14	MW uygulama ile ev tipi mikrodalgada (a) çözdürme prosesi deney sonuçları, (b) fiber optik konumları (Llave vd. 2016)……	67
Şekil 4.15	MW uygulama ile Tylose çözdürme deney ve matematiksel modelde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı (Chen vd. 2016)……	68
Şekil 4.16	Merkez dışı sabit çözdürme işlemi uygulanan durumda Tylose matematiksel model sonuçları (a-30, b–60 ve c- 90. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……	69
Şekil 4.17	Merkezde dışı dönme işlemi uygulanan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)……..……	70
Şekil 4.18	Merkez dışında dönme işlemi uygulanan ve uygulanmayan durumda Tylose çözdürme deney sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması (a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – sabit sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – dönme sonuçları)……..	71
Şekil 4.19	Şekil 4.19 Merkez – sabit çözdürme matematiksel modelinde (a) Tylose hacimsel sıcaklık değişimi, (b)Tylose penetrasyon derinliği...	72

Şekil 4.20 Merkez – sabit durumda Tylose çözdürme prosesinde 90. saniyede z=1.25, 0, -2 yükseklik hizalarında ürün içindeki sıcaklık dağılımı ve kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alan……..... 75

Şekil 4.21 Comsol çoklu fizik matematiksel modelleme programında hazırlanmış çalışma kütüphanesindeki mikrodalga fırın çalışmasında kavite içerisindeki (a) elektromanyetik dağılım aynı boyutlarda silindir kavite içerisinde oluşan (b) elektromanyetik alan……...… 76

Şekil 4.22 Merkez – sabit durumda 85s Tylose ısıtma atmosferik ve 2 bar basınç altındaki noktasal sıcaklık sonucunun karşılaştırılması…… 78

Şekil 4.23 MW kavite içerisinde ürün yokken oluşan elektromanyetik alan…… 79

Şekil 4.24 Dondurulmuş Morina balığı merkez – sabit çözdürme prosesi (a) fiber optik noktalar, (b) noktasal sıcaklık sonucu, (c) proses sonrası ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı…….. 81

Şekil 4.25 2 tane dondurulmuş Morina balığının dönme etkisiyle çözdürülmesi, (a) fiber optiklerin yerleri, (b) proses sırasında noktasal sıcaklık dağılımı, (c) proses sonrası balıkların üst yüzey sıcaklık dağılımı… 83

Şekil 4.26 Dondurulmuş 2 Morina balığın dur – kalk yöntemi ile çözdürülmesi, deneme-1……. 85

Şekil 4.27 Dondurulmuş 2 Morina balığın dur – kalk yöntemi ile çözdürülmesi, deneme-2…….. 86

Şekil 4.28 Dondurulmuş 2 Morina balığına prosesten önce yerleştirilen fiber optiklerin konumu, T1 ve T4 görüntünün sağ ve sol tarafından 2 cm derinliğe, T2 ve T3 görüntünün alt ve üst tarafından ortasından 2 cm derinliğe yerleştirilmiştir……. 88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Saf su, %2 ve %4 (w/w) NaCl çözeltilerinin dielektrik özelliklerinin ve penetrasyon derinliğinin sıcaklıkla değişimi…….	22
Çizelge 3.1	Comsolda oluşturulan geometrinin ağ yapısına ilişkin istatistik değerleri……..……	39
Çizelge 4.1	Dondurulmuş Morina balıklarının yaklaşık boyutları…….	87
Çizelge 4.2	MW prosesinden sonra balıkların her saat başı iç sıcaklık değerleri…..	88

1. GİRİŞ

Dondurma ve çözdürme prosesleri gıda sanayinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Gıdaların muhafazası amacıyla uygulanan dondurma işlemi ile gıdanın bünyesinde bulunan serbest su, buz kristallerine dönüştürülmektedir. Su aktivitesinin düşürülmesiyle kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonların hızları azalmakta ve mikrobiyal aktivite yavaşlamakta veya tamamen durdurulabilmektedir. Ancak, depolama sürecinin devamında tüketim ya da proses amacıyla (dondurma ve dondurulmuş tatlılar dışında) bütün dondurulmuş ürünlere uygulanması gereken çözdürme işleminin de ürün kalitesini minimum düzeyde etkileyecek şekilde yapılması önemlidir.

Günümüzde çözdürme prosesinde endüstriyel ölçekte konveksiyonla ısı transferi temeline dayanan geleneksel yöntemler (hava veya suyun akışkan ısı transferi ortamı olarak kullanıldığı; hava akımında ya da suya daldırarak uygulanan çözdürme prosesleri) tercih edilmektedir. Geleneksel yöntemlerle yapılan çözdürme prosesi sırasında su kaybı, protein denatürasyonu ve tekstürel değişimlerin kalite niteliklerini olumsuz etkilemesi gibi problemler genel olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, yenilikçi yöntemlere ve bu kapsamda da özellikle dielektrik çözdürme yöntemlerine ilgi artmıştır. Bu yöntemlerin temel ve ortak hedefi çözdürme süresini ve kalite kayıplarını, konvansiyonel yöntemlere göre, azaltmaktır (Uyar ve ark. 2015). Bu kapsamda, bir proses sürecinde ara işlem olarak uygulama açısında da uygunlukları ile dikkat çekmektedirler. Örneğin, konserve ton balığı üretim prosesinde dielektrik çözdürme yöntemleri rahatlıkla ara işlem basamağı olarak kullanılabilecektir.

Gıda endüstrisinde dondurulmuş büyük parçalı et ve balık benzeri gıdaların çözdürülmesi, düşük hızlı hava sirkülasyonu veya oda koşullarında çözdürme prosesleri uygulanmakta olup bu koşulda uygulanan çözdürme süreci uzun bir zaman almaktadır. Bu proses sırasında, ürünün çözünmesi ürün yüzeyinde gerçekleşmekte ve bu bölgelerde ısıl iletim katsayısının (>1.5 W/m-K'den <0.6 W/m-K'e) düşmesi ürün dış bölgelerinin yalıtım özelliği göstermesine ve buna bağlı olarak da proses süresinin

uzamasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak hem çözdürme işlemi yavaşlamakta ve buna bağlı olarak hem ürün kalite kayıpları artmakta hem de ürün yüzey ya da yüzeye yakın bölgelerinde sıcaklık artışı nedeniyle (bu bölgelerin sıcaklığı proses sürecinde çözdürme ortamı sıcaklığa yaklaşmaktadır) mikrobiyal gelişmenin hızlanmasına sebep olmaktadır. Konvansiyonel sistemlerde akışkan ortam olarak kullanılan hava ya da suyun sıcaklığının + 4 °C'nin altında seçilmesi durumunda ise çözdürme süresi, ürün ve ortam arası sıcaklık farkı azaldığından, daha da uzamaktadır. Şekil 1.1 (sıcaklık verileri Dr. Ferruh Erdoğdu'nun yazılım ekibinde yer aldığı gıda ürünlerinin dondurulması ve çözdürülmesi prosesler için endüstriyel skalada kullanılan bir yazılım kullanılarak elde edilmiştir- http://ferruherdogdu.com/software/software-for-industrial-freezing/) geleneksel yöntem uygulaması ile gerçekleştirilen bir çözdürme işleminde ürün merkez ve dış yüzey sıcaklık değişimi +4 °C kritik sıcaklık bölgesi ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Geleneksel yöntemle çözdürme işlemi sırasında ürün merkez ve dış yüzey sıcaklık değişimi (http://ferruherdogdu.com/software/software-for-industrial-freezing/) (Erişim Tarihi: 05.10.2017)

Geleneksel yöntemler gerçekleştirilen uygulama proses maliyeti açısından uygun olduğundan ve geniş bir ürün yelpazesine (uygulanacak proses parametrelerinin

belirleme açısından) rahatlıkla uygulanabildiği için gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak bu yöntemlerin neden olduğu fiziksel, kimyasal ve mirobiyolojik kalite değişimlerinin önlenmesi ve proses süresinin kısaltılabilmesi için yeni proseslere ihtiyaç duyulmaktadır. Dielektrik ısıtma yöntemlerinden olan mikrodalga (MW) ve radyo frekansı (RF) uygulamalarının bu ihtiyaca çözüm olabileceği düşünülmektedir. Radyo frekansı dalgaları 1 - 300 MHz, mikrodalga frekans aralığı ise 300 - 3000 MHz aralığında olmakla birlikte her ikisi de radyasyonun iyonlaştırıcı etkisinin olmadığı formdadır. Mikrodalga ve radyo frekansı dalgaları gıdaya nüfuz etmekte ve belirgin bir şekilde hacimsel sıcaklık artışı sağlamaktadır (Marra ve ark. 2007). Bu hacimsel ısınma sayesinde çözdürme prosesinin süresini azaltarak ürün kayıplarını minimize ederek daha kaliteli ve hızlı bir çözdürme prosesi süreci elde edilmesi amaçlanmaktadır. RF ve MW proseslerinin temel farkı uygulama frekansı ve buna bağlı olarak kullanılan dalga boyudur. Buna bağlı olarak uygulama sırasında penetrasyon derinliklerine bağlı olarak, RF çözdürme prosesi kalıp şeklinde dondurulmuş büyük hacimli ürünler için daha uygunken, MW prosesi tekil olarak dondurulmuş ürünler için daha uygundur. Ayrıca, uygulama frekansına bağlı olarak ortaya çıkan ve ürün tarafından absorbe edilen güç miktarı da kalıp olarak dondurulmuş büyük hacimli ürünler ile tekil olarak dondurulmuş ürünlerin çözdürülmesinde uygulama açısından farklılıklar yaratmaktadır. Bu kapsamda ürün özellikle yüzeyinde sıcaklığı fazla yükselmiş, pişmiş ve yanmış noktalarına ortaya çıkma ihtimali de MW çözdürme uygulamasının tekil ürünlerde daha optimum koşullarda uygulanabileceğini göstermektedir.

Belirtildiği şekilde, mikrodalga bölgesi, elektromanyetik spektrumda frekansı 300 MHz (dalga boyu – λ = 1 m) ile 300 GHz (λ = 1 mm) arasında değişen elektromanyetik dalgalardan oluşmaktadır. Ev tipi olarak kullanılan mikrodalga fırınlar 2.45 GHz (λ = 12.24 cm) frekansında çalışırken endüstriyel boyutta kullanılan sistemlerde 915 MHz (λ = 32.79 cm) frekansı kullanılmaktadır. Mikrodalga sistemleri 1940'lardan beri ısıl işlem amacıyla gıda endüstrisinde yaygınlaşarak kullanılmaktadır (Oliveira ve Franca 2002). Mikrodalga enerjisi üründe çözünmüş iyonların iletken hareketi ve polar çözücülerin dipolar dönüşleri sonucu oluşan moleküler sürtünmeye bağlı olarak hacimsel ısınmayı sağlayarak bir ısı kaynağı oluşturmaktadır (Oliveira ve Franca 2002). Gıda ürünlerinin

ana bileşeni olan su ise dipolar doğasına bağlı olarak mikrodalga ile olan etkileşimlerinin ana kaynağıdır. Ürün ısı kapasitesi ve mineral içeriği gibi etmenlerde mikrodalga ile etkileşimi etkileyen önemli faktörlerdir. Mikrodalga uygulamanın geleneksel çözdürme yöntemlerine göre avantajları olmasının yanında mikrodalga sistem içinde homojen olmayan elektromanyetik alandan dolayı ürünün, güç absorpsiyonu ve buna bağlı olarak sıcaklık değişimine bağlı olarak, belli bölümlerinde, özellikle donmuş ve çözünmüş bölgelerin dielektrik özelliklerindeki önemli farklılığa da bağlı olarak, sıcaklığı fazla yükselmiş bölgelerle karşılaşılabilmektedir. Bu nedenle, mikrodalga kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alanın belirlenmesi ve buna bağlı olarak proses uygulama – geliştirme – tasarım ve optimizasyon çalışmalarında matematiksel modelleme çalışmaları önemli bir rol oynamaktadır. Bu konuda literatürde deneysel ve matematiksel modelleme çalışmaları mevcuttur (Geedipalli vd. 2007, Watanabe vd. 2010, Llave vd. 2016, Chen vd. 2016).

Dielektrik uygulamalar yanında, geleneksel yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkan yüksek basınç altında çözdürme prosesi üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Çözdürme prosesi yüksek basınç altında yapıldığında ürünün donma ilk noktası düşmekte ve çözünme prosesi hızlanmaktadır. Suyun donam ya da çözünme noktası atmosferik basınçta 0 °C iken 220 MPa basınç altında -22 °C'ye düşmektedir (Rouille vd. 2002). Buna bağlı olarak yüksek basınç altında dondurma ve çözdürme çalışmaları ürün kalitesinin korunması kapsamında farklı ürünler için uygulanmaktadır (Glazka ve Ledward 1995). Yüksek basınç altında, ürün donma ilk noktasının atmosferik basınca göre düşmesi yüksek basınçta çözdürmenin başlangıç noktasıdır. Schubring vd. (2003) yaptıkları çalışmada çeşitli balık türlerinin (morina, mezgit, somon) yüksek basınç ile çözdürülmesini araştırmışlardır. Kullanılan balık türlerinde yüksek basınçla çözdürme sonrasında proteinlerde meydana gelen değişimlere bağlı olarak atmosferik basınçla çözdürmeye göre daha düşük kaliteli ürünler elde edildiği gözlenmiştir.

Bu kapsamda bu çalışmada hem atmosferik basınçta hem de atmosferik basıncın biraz üzerinde hafif basınç altında mikrodalga ısıtma ve çözdürme prosesleri uygulanarak basıncın etkisi incelenecektir. Proseslerde kullanılan mikrodalga sistemin özellikleri doğrultusunda değişen parametreler (tabağın dönmesi, zamana göre güç seçeneği,

ürünün kavite içerisindeki konumu) sayesinde endüstride kullanılabilecek bir mikrodalga çözdürme yöntemi geliştirilecektir. Aynı zamanda matematiksel yöntemlerle modellenen mikrodalga sistem çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu çalışmanın deneysel sonuçları ve hazırlanacak olan matematiksel modellemenin gıda endüstrisi için önemli olacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gıda ürünlerinin dondurulması işlemi 1900'lü yıllarda deniz ürünlerinin raf ömrünü uzatmak, uzun raf ömrü ile birlikte uzun mesafelere ticaretlerinin yapılabilmesini sağlamak ve deniz ürünlerini sezon dışında da tüketiciye arz edebilmek amacıyla başlamıştır (Archer ve Edmonds 2008). Ürünlerin dondurma prosesiyle birlikte, tüketim ve daha sonraki proseslerde kullanılabilmeleri amacıyla çözdürme prosesi gündeme gelmiştir. Backi (2017) Dondurulmuş gıda ürünlerinin çözdürülmesinde kullanılan yöntemleri, ısının ürünün yüzeylerinden ürün içine doğru ilerlemesi ve diğeri ise üründe hacimsel ısınmanın gerçekleştiği olmak üzere iki gruba ayırmıştır. İlk grup geleneksel yöntemler olarak da adlandırılır ve bu grupta hava (durgun hava, hava üfleme) ve su ortamı kullanılarak konveksiyon (taşınım), kondüksiyon (iletim) ve radyasyon ile ısı transfer temellerine dayanmaktadır. İkinci grupta ise yüksek basınçta ve dielektrik çözdürme yöntemleri yer almaktadır.

2.1 Geleneksel Çözdürme Yöntemleri ve Dezavantajları

Günümüzde gıda endüstrisi halen geleneksel – konveksiyonel yöntemler ile çözdürme prosesini tercih etmektedir. Ancak son dönemlerde dielektrik ısıtma yöntemleri hızlı ve hacimsel ısınma özellikleri ile endüstriyel prosesler için çekici gelmekte ve buna bağlı olarak kullanımları artmaktadır. Çözdürme prosesi, dondurma prosesinin tersi olduğundan donmuş ürünün dondurma prosesi sırasında ne kadar zarar gördüğü önemlidir. Dondurma prosesinin yavaş olması durumunda, proses sırasında ürün içerisinde büyük çaplı buz kristallerinin oluşması ürüne geri dönüşü olmayan zararlar vermektedir (Chevalier vd. 2000). Bu durumda, çözdürme prosesi sırasında meydana gelen su kaybı (drip loss) ve buna bağlı olarak (et ve deniz ürünleri gibi) protein oranı yüksek ürünlerde, suda çözünür protein kayıpları proses sırasında ortaya çıkan önemli problemlerdir (Li ve Sun 2002). Kriyojenenik dondurma prosesleri gibi hızlı dondurma proseslerinin uygulanması durumunda ise, hücrelerde ölüm veya mekanik zararlar meydana gelebilmektedir (Chevalier vd. 2000). Çözdürme prosesi sırasında ise proses hızına bağlı olarak ürünün tekstürel özelliklerinde dondurma prosesine göre daha fazla zarar meydana gelebilmektedir (Zhu vd. 2004). Ayrıca, ürün sıcaklık yükselmesine

bağlı olarak mikrobiyal ve enzimatik bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Geleneksel – konvansiyonel çözdürme uygulanan bir proseste ürün sıcaklığı, donmuş ürünün yüksek ısıl iletkenlik ve düşük ısı kapasistesi değerine bağlı olarak, hızla donma (çözünme) noktasına erişmektedir. Ancak, bu noktada faz değişimine bağlı olarak uzun bir süreç gerekmekte ve bu anda çözünmesi tamamlanmış olan yüzeye yakın bölgelerin sıcaklığı da proses ortamı sıcaklığına bağlı olarak yükselmektedir. Bu kapsamda üründe mikrobiyal gelişim ve enzimatik aktivitesinin artmasına bağlı olarak kalite problemleri gözlenmektedir. Geleneksel yöntemlerle yapılan çözdürme prosesinde ısı transferi konveksiyon (taşınım) ve kondüksiyon (iletim) ile gerçekleştiğinden proses süreci yavaş olmaktadır. Bu sistemlerle yapılan çözdürme işlemlerinde, belirtildiği şekilde, ilk önce gıdanın dış yüzeyi çözünmeye başlamakta ve bu bölgelerde ısıl iletim katsayısının (<0.6 W/m-K) düşmesiyle prosese yalıtım özelliği ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak şekil 1.1'de (sıcaklık verileri Dr. Ferruh Erdoğdu'nun yazılım ekibinde yer aldığı bir yazılımla çözdürme işlemi sırasında elde edilen ürün yüzey ve merkez sıcaklık değişimi gösterilmektedir (http://ferruherdogdu.com/software/software-for-industrial-freezing/, 2002).

Geleneksel – konvansiyonel çözdürme yöntemlerinde akışkan ortam olarak hava ya da su kullanılmaktadır. Özellikle hava ile çözdürme uygulamalarında ortam ısı transfer katsayısının düşük olmasına bağlı olarak çözdürme prosesi uzun sürmektedir. Bu tür sistemlerde, çözdürülmek istenen ürünler oda sıcaklığındaki veya +4 °C'deki bir odaya yerleştirilmektedir. Bu sistemlere ortam ısı transfer katsayısının arttırılabilmesi amacıyla fanlar da kullanılabilmektedir. Çözünme işleminin başlamasıyla, ürünün dış yüzeyinde sıcaklık artışına bağlı olarak su aktivitesi artmakta ve mikrobiyal gelişme – enzimatik aktivite başlamaktadır. Çözdürme prosesi sırasında ürün yüzeyinde meydana gelen mikrobiyal gelişme hakkında kanıtlanmamış bir teori olarak, çözünme sırasında ürün yüzeyinde su miktarı artınca bakteriler ozmotik şoka maruz kalarak sayılarında azalma meydana gelebilir (Ragnarsson ve Viðarsson 2017). Yıl içerisinde hava sıcaklığının değişkenlik göstermesine bağlı olarak, çözdürme odası sıcaklığını sabit tutabilmek önemli bir enerji sarfiyatına sebep olmaktadır. Bu sistemlerde dondurulmuş ürünlere ısı transferi, çözdürme ortamından yüzeye taşınım ile ürün yüzeyinden içerisine ise iletim ile gerçekleşmektedir. Bu çözdürme işleminde etkili olan

parametreler; ürünün boyutları, şekli, varsa ambalajı ve özellikleri, kullanılan havanın sıcaklığı, bağıl nemi ve hızıdır. Bu sistemde kademeli olarak çözdürme işlemi de yapılabilmektedir. Yüzey sıcaklığı 10 – 15 ℃'ye gelene kadar önce 35 - 60 ℃ ortam sıcaklığında, sonrasında ise 10 – 15 ℃ sıcaklıkta havanın kullanıldığı sistemler kullanılabilmektedir. Bu sistemlerde ürün yüzey sıcaklığının + 4 ℃'nin üzerine çıkmasının yanında çözdürme odası içerisindeki hava sıcaklık dağılımının düzensiz olmasına bağlı olarak da ürün kalite özelliklerinde olumsuz değişimler olabilmektedir. Ürün yüzeyi çözüldüğü halde ürün merkezi hala için prosesin devam etmesi sürecinde ürün yüzeyinde su kaybı meydana gelerek kurumalar gözlenebilir (Backi 2017).

Akışkan ortam olarak suyun kullanıldığı çözdürme proseslerinde ise hava ortamlarına göre daha yüksek bir ısı transfer katsayısı elde edildiğinden daha kısa sürelerde çözdürme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca ürünün etrafı su ile kaplı olduğundan lipid oksidasyonu ve yüzeyde kuruma minimum etkiye inecektir (Backi 2017). Bu sistemdeki temel sorun ise suyun ürünle temas etmesi ve buna bağlı olarak kontaminasyon problemlerinin meydana gelmesidir. Su ile çözdürme işlemleri daha çok ambalajla dondurulmuş ürünlerin çözdürülmesinde kullanılabileceği gibi ortam sıcaklığına bağlı olarak, hava ortamlı çözdürme sistemlerinde meydana gelen ürün yüzey sıcaklık artışı temelli problemler bu sistemlerde de ortaya çıkmaktadır. Akışkan ortam olarak suyun kullanıldığı çözdürme prosesleri sırasında su sıcaklığı sürekli değişeceğinden (düşeceğinden) ve hijyenik açıdan üründe kontaminasyon problemlerine sebep verebileceğinden çözdürme ortamının değiştirme gerekliliğine bağlı olarak bu sistemlerde önemli bir su sarfiyatı olmaktadır.

2.2 Yenilikçi Çözdürme Yöntemleri

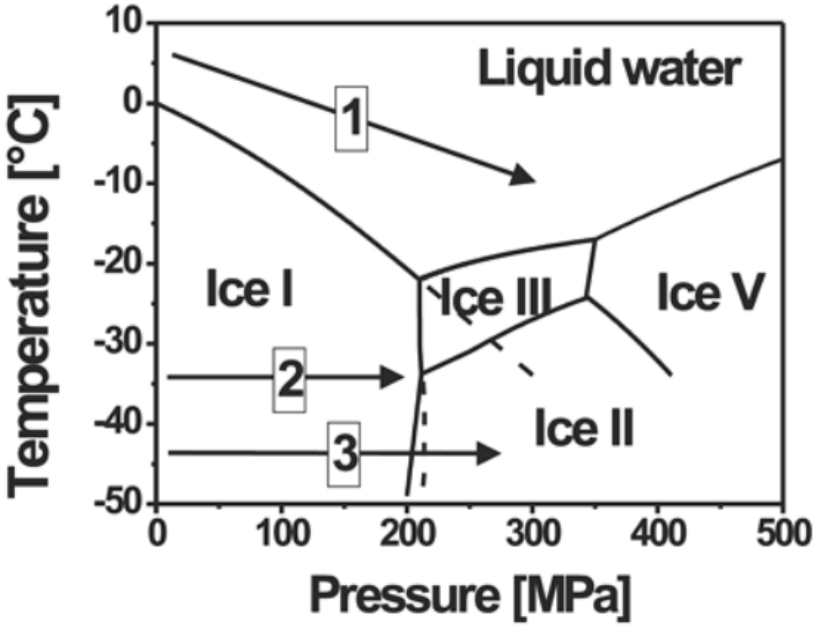
2.2.1 Vakum ve yüksek basınç uygulaması ile çözdürme

Vakumda çözdürme sistemi bir vakum hücresi, buhar kaynağı, vakum pompası ve gerekli kontrol ünitelerinde oluşmak olup bu yöntemde ürün bir vakum hücresine yerleştirilmekte ve kısmi vakum altında çözdürme işlemi gerçekleştirilmektedir. Uygulanan vakum miktarı çözdürme sıcaklığına bağlı olup sabit sıcaklıkta sisteme

enjekte edilen buharın ürün yüzeyinde yoğunlaşması ile elde edilen ısının etkisi ile çözdürme işlemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde ısı ürüne daha hızlı transfer edilmekte ve çözdürme işlemi geleneksel yöntemlere göre daha hızlı gerçekleşmektedir. Geleneksel çözdürme yöntemleri uygulandığında proses sırasında üründe meydana gelen değişimler ve yukarıda bahsedilen proses dezavantajları düşünüldüğünde, vakum uygulama ile hızlı ve ortam sıcaklığı düşük ortamlarda çözdürme işlemi gerçekleştirilebilmektedir (Zhu vd. 2004).

Vakum uygulamanın aksine, yüksek basınç uygulaması ile gerçekleştirilen çözdürme işlemleri de dikkati çeken yöntemler olarak göze çarpmaktadır. Makita (1992) donmuş etlerin yüksek basınç ile çözdürülmesinin atmosferik basınçta çözdürülmesi sürecine göre üçte bir daha kısa sürede tamamlanacağını belirtmiştir. Yüksek basınç ile çözdürmede ürünün boyutları ve başlangıç sıcaklığının bir etkisi yoktur, bu sayede büyük boyutlardaki ürünler için yüksek basınç yöntemi kullanılabilir. Ancak çözdürmenin gerçekleşeceği kapalı sistemin büyümesiyle içeride oluşturulacak basınç için daha fazla enerji harcanmak zorunda kalınacaktır (Li ve Sun 2002). Yüksek basınç ile çözdürme yöntemi, yüksek basınç altında donmuş ürünün başlangıç donma (çözünme) noktasının düşmesi prensibine dayanmaktadır. Böylelikle çözdürme sırasında düşük ortam sıcaklığı kullanılarak mikrobiyal ve/veya enzimatik gelişmeye sebep vermeden proses gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca yüksek basınç altında başlangıç donma (çözünme) noktasının düşmesi donmuş ürün ve ortam arasındaki sıcaklık farkını da arttırarak ısı transferi hızının artmasına ve çözdürme süresinin kısaltılmasını sağlayabilmektedir (Zhu vd. 2004, 2014). Yüksek basıncın etkisi suyun donma (çözünme) başlangıç noktasını 0 °C'den (atmosferik basınç altında) 220 MPa basınç altında -22 °C'ye düşürmektedir (Şekil 2.1) (Rouille vd. 2002). Proses süresinin kısaltılması konusundaki avantajlarına rağmen yüksek basınç sistemlerinin başlangıç maliyetleri yüksek olup, özellikle et ve balık gibi ürünlerin çözdürülmesi sırasında protein denatürasyonu problemi ile karşılaşılabilmektedir. Ürün sıcaklığının 0 °C'nin üzerine gelmesiyle basınç ortamdan serbest bırakılmaya başlanır, bu sırada basıncın ortadan kalkmasıyla üründe bir soğuma gerçekleşebilir. Bu olay göz önünde bulundurularak ürün sıcaklığının 0 °C'nin üstüne örneğin 200 MPa basınç altında

yapılan proses için ürün sıcaklığının yaklaşık 5 °C'ye geldikten sonra basınç ortamdan uzaklaştırılır (LeBail vd. 2002).



Şekil 2.1 Basınç altında buz – su faz diyagramı şeması
(http://aem.asm.org/content/70/7/4021/F1.expansion.html)

Schubring vd. (2003) farklı balık türlerinde (morina, mezgit, somon) 200 MPa basınç altında ve 15 °C su sıcaklığında yapılan çözdürme işlemlerinin etkisini araştırmışlardır. İki metot arasında materyallerin su tutma kapasitesi, renk, tekstür, pH değeri bakımından önemli bir farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Kullanılan balık türlerinde yüksek basınçla çözdürme sonrasında atmosferik basınçla çözdürmeye göre daha düşük kaliteli ürünler elde edildiği gözlenmiştir. Özellikle morina balığının kokusunda olumsuz bir değişim belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, 200 MPa'da 20 dk çözdürme prosesine maruz bırakılan morina balığında miyozin kaybının da yüksek oranda olmuştur. Rouille vd. (2002) donmuş balık ve kabuklu deniz ürünlerinde yüksek basınç ile çözdürme prosesini incelemişlerdir. Çözdürme prosesi sonrasında ürünleri 80 °C su banyosunda pişirmişler ve ürünlerde meydana gelen su kaybını çözdürme ve pişirme sonrasında belirlemişlerdir. Buz kristallerinin çözünme sırasında hücre zarına zarar vermelerine bağlı olarak ürünlerde su kaybı yaşandığı ve yüksek basınç altında çözdürme işleminin hızlı gelişmesine bağlı olarak da ürün su kaybının azaldığı

belirlenmiştir. Ancak, pişirme sonrasında su kaybı değerleri yüksek basınç ile çözdürülen ürünlerde daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise yüksek basıncın su tutma kapasitesini etkilemesiyle açıklanmıştır. Prosesler sonrası toplam su kaybı göz önünde bulundurulduğunda ise 150 MPa basınç altında ve 45 dakikalık proseste en az su kaybının gözlendiği belirlenmiştir.

Hem vakum hem de yüksek basınç altında gerçekleştirilen çözdürme uygulamalarında, hem ürün içi sıcaklık dağılımının homojen olmaması nedeniyle hem de proses süresinde elde edilebilecek kazanımlar kapsamında, yenilikçi yöntemlerden dielektrik uygulamalar endüstriyel bir proseste kullanılabilecek daha etkin yöntemler olarak göze çarpmaktadır.

2.2.2 Dielektrik çözdürme yöntemleri

Dielektrik ısıtma yöntemleri olarak mikrodalga (MW) ve radyo frekansı (RF) uygulamaları kullanılmaktadır. Radyo frekansı dalgaları 1 – 300 MHz, mikrodalga frekans aralığı ise 300 - 3000 MHz aralığındadır. Mikrodalga ve radyo frekansı dalgaları gıda ürününe hacimsel olarak nüfuz etmekte ve belirgin bir şekilde hacimsel sıcaklık artışı sağlamaktadır (Marra vd. 2007). RF ve MW proseslerinin temel farkı uygulanan frekans ve buna bağlı olarak kullanılan dalga boyu – penetrasyon derinliği olup; RF çözdürme prosesi kalıp şeklinde dondurulmuş gıdalar için daha uygunken, MW prosesi tekil olarak dondurulmuş ürünler için daha uygun prosesler olarak göze çarpmaktadır. Özellikle uygulama frekansına bağlı olarak ortaya çıkan güç miktarı RF uygulamanın büyük hacimli ürünlerde meydana gelecek sıcaklık artışı açısından daha kontrol edilebilir bir proses olabileceğini göstermektedir.

RF uygulama, belirtildiği gibi, elektromanyetik spektrumun 1 – 300 MHz arasındaki bölgede gerçekleşmekte olup, gıda proseslerinde gerçekleştirilen uygulamalarda 13.56 (λ = 22.12 m) ve 27.12 MHz (λ = 11.06 m) frekansları kullanılmaktadır. RF uygulamada, elektromanyetik dalgalar ürünün dielektrik özelliklerine bağlı olarak ürün tarafından absorbe edilmekte ve absorbe edilen enerji ısı enerjisine çevrilmektedir. Üründe meydana gelen sıcaklık artışı, iyonik yer değiştirme ve dipol rotasyonu ile

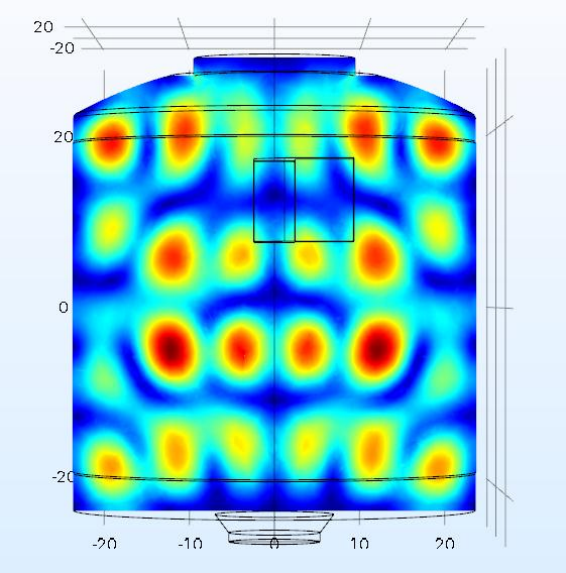
hacimsel olarak gerçekleşmektedir. RF uygulama sırasında oluşan elektromanyetik alan ve bu alan içerisinde ürün sıcaklık değişiminin belirlenebilmesi amacıyla matematiksel modellerden yararlanılmaktadır. Uyar vd. (2015) donmuş yağsız sığır etinin çözdürme prosesini hem deneysel olarak hem de matematiksel model olarak açıklayan ilk çalışma olarak göze çarpmaktadır. Farklı çalışmalarda (Farag vd. 2009, Bedane vd. 2017) elde edilen bulgular sonucunda, RF uygulamanın geleneksel çözdürme yöntemlerine göre daha hızlı gerçekleşebileceği ve bu kapsamda endüstriyel uygulama açısından potansiyel bir yöntem olabileceği gösterilmiştir. Bunun yanında elde edilen sonuçlar hava ile çözdürme prosesi ile karşılaştırıldığında, çözdürülen ürünün özellikle yüzeyinde ve köşelerinde homojen olmayan ve kritik sıcaklığın üstünde (> +4 C) sıcaklık artışları meydana geldiği gözlenmiştir. Donmuş ton balığının RF uygulama ile çözdürülmesi için gerçekleştirilen bir çalışmada (Llave vd. 2015) kullanılan elektrot boyutunun ürün homojen sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiş ve ürünle benzer en ve genişlik ölçülerine sahip olan elektrot boyutlarında ürün içerisinde daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilebildiği gösterilmiştir. Erdoğdu vd. (2017), RF çözdürme işleminin endüstriyel ölçekte bir sistemde gerçekleştirilen uygulamasında, ürün içerisinde homojen sıcaklık dağılımı sağlayabilmek için ürün ve elektrotun sistem içerisindeki hareket etkilerini geliştirdikleri matematiksel modeli kullanarak incelemişlerdir. Aynı zamanda proses sırasında sistem içerisindeki ürün miktarının da ürün sıcaklık değişimine etkisi bu çalışma kapsamında belirlenmiştir. Uygulama frekansına bağlı olarak elde edilen güç değerinin, MW prosesine göre daha rahat kontrol edilebilmesi ve dalga boyu – ürün dielektrik özelliklerine bağlı olarak RF çözdürme işlemi büyük hacimli ürünlerin çözdürülmesi için daha uygun bir proses olarak göze çarpmaktadir. Özellikle ürün içerisinde homojen sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi ve ürün yüzey – köşelerinde sıcaklık artışının kontrol edilebilmesinin, elde edilecek güç değerine bağlı olarak MW proseslerde daha zor olduğu dikkati çekmektedir. Bu açıklamaya bağlı olarak da tekil olarak dondurulmuş hacimsel olarak daha küçük olan ürünlerin çözdürülmesinde ise MW prosesin daha etkin olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca RF proses sırasında kullanılacak ürün miktarının ürün sıcaklık değişimine negatif etkisi Uyar vd. (2014) tarafından gösterilmiştir. Bu çalışmada RF uygulamada elektrotlar arası uzaklığı sabit kalması durumunda sistem içerisindeki ürün hacminin azalması ile üründe istenilen sıcaklık artışlarının meydana gelmediği bunun

da, RF uygulamada kullanılan dalga boyuna bağlı olarak, ürün – elektromanyetik dalga etkileşiminin gerçekleşmemesine bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, hacimsel olarak küçük kabul edilebilen tekli olarak dondurulmuş ürünlerinin prosesi ve çözdürülmesinde MW uygulamanın kullanılması daha optimal bir yaklaşım olarak göze çarpmaktadır.

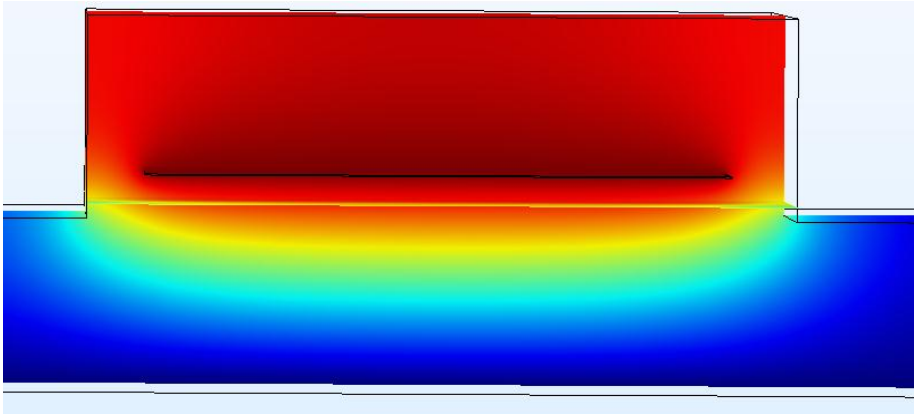
Elektromanyetik spektrumda mikrodalga frekansı 300 MHz (λ = 1 m) ile 300 GHz (λ = 1 mm) arasında bulunmaktadır. Ev tipi mikrodalga fırınlarda 2450 MHz (λ = 12.24 cm) frekans kullanılırken gıda endüstrisinde 915 MHz (λ = 32.79 cm) frekans kullanılmaktadır. Mikrodalga frekans değerleri radyo dalgaları ve radar frekans değerleri ile elektromanyetik spektrumda aynı bölgede bulunduğundan Birleşik Haberleşme Komisyonu (Federal Communication Commission, FCC) tarafından belirlenen 2450 ±50 ve 915 ±25 MHz frekanslar endüstriyel, bilimsel ve medikal alanlarda kullanılmaktadır. Mikrodalganın oluşturduğu elektromanyetik alan ürüne nüfuz ederek çözünmüş iyonları hareket ve polar birleşikleri rotasyon ettirerek meydana gelen sürtünme enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesiyle ürünün ısınmasını sağlamaktadır. Dalga boyunun kısa olması nedeniyle mikrodalga uygulama sırasında sistem içerisinde elektromanyetik enerjinin yoğun olduğu bölgeler oluşmakta ve ürünün proses sırasında bu bölgelerde elektromanyetik alana maruz kalmasıyla ürün sıcaklığı istenmeyen şekilde yükselmektedir. Bu problemin çözülmesi için ev tipi sistemlerde ürüne dönme hareketi verilirken endüstriyel sistemler de ürünün sistem içerisinde hareketi ile bölgesel ısınma ve fazla sıcaklık yükselmesinden kaçınılabilmektedir. Şekil 2.2, 2.3 MW (Şekil 2.2 bu tez çalışmasında kullanılan mikrodalga sistemi göstermektedir) ve RF uygulamaları sırasında kavite içerisinde meydana gelen elektrik alan dağılımını göstermektedir. Gözlenen elektrik alan Comsol V. 5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) sonlu eleman programı kullanılarak gözlenen kaviteler için, sistem içerisinde bir ürün olmadığı durumlarda hesaplanmıştır.

Dielektrik ısıtma/çözdürme deneyleri üzerinde çalışmak ve proses yöntemi belirlemek deneme – yanılma yöntemleri ile yürütülmekte, bu durum zaman ve para masrafına sebep olmaktadır. Deneysel verilerle doğrulanmış bilgisayar simülasyonları sayesinde dielektrik ısıtma prensibinin daha iyi anlaşılabileceğinden uzun proses denemelerinden

ve gereksiz harcamalardan kaçınılabileceği Pitchai vd. (2012, 2016) tarafından öne sürülmüştür. Pitchai vd. (2014) elektromanyetik ve ısı transferi modüllerini FDTD (sonlu fark zaman alanı) metodunda birleştirerek ev tipi mikrodalgada %1'lik agar (gellan gel) ısıtılması prosesinin matematik modellemesini yapmışlardır. MW prosesi sırasında ürün iç sıcaklığı fiber optikler sayesinde ölçülmektedir. Kavite içerisinde oluşan homojen olmayan elektromanyetik dağılımdan dolayı proses sırasında fiber optik probların konumundaki küçük değişim simülasyonun doğruluğunda kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Pitchai vd. 2014).



Şekil 2.2 Mikrodalga kavite içerisinde elektromanyetik alan dağılımı



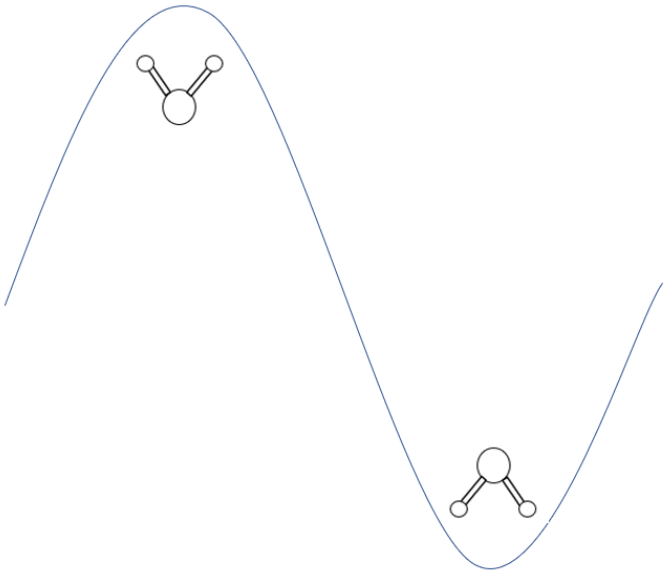
Şekil 2.3 Radyo Frekansı uygulamasında elektromanyetik alan dağılımı

MW teknolojisi İkinci Dünya Savaşı sırasında radarlar üzerine çalışma yapan Percy Spencer tarafından magnetronun keşfedilmesi ve 1947 yılında Raytheon (https://www.microwaves101.com/encyclopedias/history-of-the-microwave-oven 2001) şirketinin ürettiği ilk mikrodalga fırın ile başlamıştır. Bu tarihten sonra mikrodalga ile gıda proses alanında birçok uygulamada faydalanılmak üzere çalışmalar yapılmıştır. MW uygulama sırasında üründe meydana gelen sıcaklık artışına bağlı ısıtma performansı birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden en önemlisi ürünün dielektrik özellikleridir. Dielektrik özellikler; dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü ile tanımlanmaktadır. Dielektrik sabiti (ε'), elektromanyetik enerjinin ürün tarafından ne kadarının absorbe edilebildiğinin, dielektrik kayıp faktörü (ε'') ise absorbe edilen elektromanyetik enerjinin ne kadarının ısıya dönüştürüldüğünün bir göstergesi olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlar doğrultusunda MW uygulama ile çözdürme prosesinde dielektrik özelliklerin yanı sıra dielektrik özelliklere bağlı olarak ortaya çıkan kayıp faktörü (tanδ) (Eşitlik 2.2) değeri de göz önünde bulundurulmalıdır. Dielektrik özellikler aynı zamanda kompleks bağıl elektriksel geçirgenlik değeri (ε_r) (Eşitlik 2.1) ile de tanımlanmaktadır:

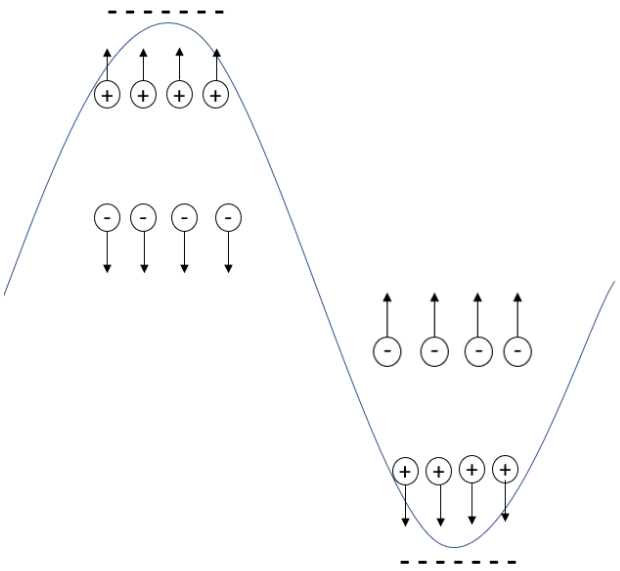
$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j * \varepsilon'' \tag{2.1}$$

$$tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{2.2}$$

Dielektrik özellikleri belirleyen iki temel faktör bulunmaktadır. Dipolar rotasyon (Şekil 2.4), elektromanyetik alana maruz kalan üründeki polar birleşiklerin (su molekülü) rotasyon hareketi yapmasıdır. MW frekansı olan 2450 MHz'de polar moleküllerde saniyede $4.9x10^{\wedge 9}$ kere rotasyon meydana gelmekte olup bu durum mikrodalga ısınmada temel etmen olarak kabul edilmektedir. İyonik iletim, serbest iyonların elektromanyetik alandan etkilenmesi sonucu hareket etmesi olup (Şekil 2.5), bu kapsamda üründe kinetik enerji oluşmakta ve bu enerji ısı enerjisine dönüşmektedir. İyonik iletim mekanizması sadece dielektrik kayıp faktörü üzerinde etkili olup; absorbe edilen elektromanyetik enerji üzerine doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır (Siguemoto ve Gut 2016).



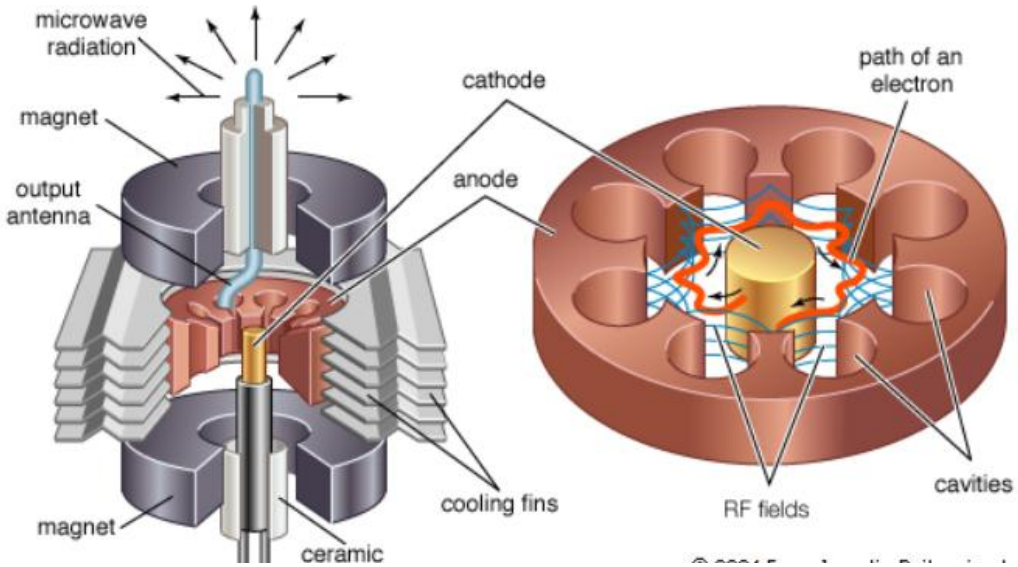
Şekil 2.4 Elektromanyetik alan etkisinde polar moleküllerin hareketi (Flores 2014'den modifiye edilmiştir).



Şekil 2.5 Serbest iyonların elektromanyetik alan etkisinde hareketi (Flores 2014'den modifiye edilmiştir).

Bir mikrodalga sistem üç temel bileşenden oluşmaktadır: magnetron, dalga kılavuzu ve prosesin gerçekleştiği kavite. Dalga kılavuzu, magnetron tarafından üretilen elektromanyetik dalgaların kaviteye doğru yol almasını sağlamakta olup;

elektromanyetik dalgalar, kavitenin şekli – boyutu ve aynı zamanda kavite içinde bulunan materyallere göre şekillenerek ürüne nüfuz etmektedir. Elektromanyetik dalgalar hava tarafından çok az absorbe edildiğinden mikrodalga prosesi sırasında hava transparan olarak kabul edilmektedir. Mikrodalga sistemlerde elektrik enerjisini mikrodalga enerjisine dönüştürmek için kullanılan magnetronlar mikrodalga frekans aralığında devamlı ya da kesikli bir şekilde elektromanyetik alanlar oluşturabilmektedir. Bir magnetronun enerji verimliliği yaklaşık %80 iken kullanım süresi yaklaşık 5000 saattir (Vollmer 2004). Şekil 2.6'da bir magnetronun genel bölümleri gösterilmektedir. Magnetron merkezinde elektron yayan bir katot ve katotu saran anottan oluşan bir vakum tüp olup, bu vakum tüpün başında ve sonunda mıknatıslar bulunmaktadır. Anotun içinde milimetre boyutunda içi boş rezonans bulunmaktadır. Katot (tungsten) içinden elektrik akımı geçince elektronlar hareket etmeye başlamakta ve bu elektronlar mıknatısların etkisinde bağlı olarak magnetron içerisinde sprial bir yol almaktadırlar. Elektronlar, bu hareket sonucu rezonant boşluklarına hızlı bir şekilde girip çıkmakta ve bunun sonucunda elektromanyetik enerji üretilmektedir. Elektromanyetik dalgalar birbirine dik bir şekilde oluşan elektrik ve manyetik alandan oluşmaktadır.



Şekil 2.6 Magnetron (https://www.britannica.com/technology/magnetron)

Magnetronda oluşan elektromanyetik dalgalar dalga kılavuzu yoluyla kaviteye doğru yol almaktadırlar. Dalga kılavuzlarının içi boş metal yapıda olup kesit alanları dairesel ve dikdörtgen olabilmektedir. Dalga kılavuzundan çıkan en küçük frekans değeri kesim frekansı olarak adlandırılmakta olup dalağa kılavuzunun karakteristik öz değeri (h) (Eşitlik 2.5) ve dalga sayısına (k) (Eşitlik 2.3) bağlı olan yayılma sabitinin sıfır olduğu durumda hesaplanmaktadır (Eşitlik 2.4). Kesim frekansının üzerinde elektromanyetik dalgalar dalga kılavuzu boyunca ilerleyerek kaviteye ulaşmaktadırlar. Dalga kılavuzu olarak çoğunlukla dikdörtgen dalga kılavuzu tercih edilmektedir ve genişliği a, yüksekliği b olan dalga kılavuzu için kesim frekansı (Eşitlik 2.7) aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanabilmektedir (Cheng 2012):

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \tag{2.3}$$

$$\gamma = \sqrt{h^2 - k^2} = \sqrt{h^2 - \omega^2\mu\epsilon} \tag{2.4}$$

$$\omega_c^2\mu\epsilon = h^2 \tag{2.5}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \tag{2.6}$$

$$f_c = \frac{h}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \tag{2.7}$$

Dikdörtgen dalga kılavuzları, TE_{mn} (transverse electric) ve TM_{mn} (transverse magnetic) modlarında çalışmaktadır. İlk alt indis x-yönündeki yarı-döngü değişimlerinin sayısını, ikinci alt indis de y-yönündeki yarı-döngü değişimlerin sayısını göstermektedir. Mikrodalgalarda TE mod kullanılmakta olup, kesim frekansı en küçük olan mod tercih edilmektedir. TE_{10} mod için eşitlik 2.8'deki öz değer denkliğinin eşitlik 2.7'de kullanılmasıyla eşitlik 2.9'da (m=1, n=0) değerleri için çözümlenmesi ile TE mod için en küçük öz değer elde edilmektedir. TE_{10} modu baskın mod olarak adlandırılmakta ve kullanılmaktadır.

$$h^2 = (\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2 \quad (2.8)$$

$$(f_c)_{mn} = \frac{h}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}}\sqrt{(\frac{m}{a})^2 + (\frac{n}{b})^2} \quad Hz \quad (2.9)$$

Kavite, mikrodalga sistemlerde prosesin gerçekleştiği bölümdür. Kavite duvarlarından elektromanyetik dalgalar yansıtılarak ürün tarafından absorbe edilmesi sağlanmakta olup, kavite içerisinde bulunan materyal tipleri de elektromanyetik alanın oluşumunda etkili olmaktadır. Mikrodalgaları yansıtan, (transparan) geçiren ve absorbe eden olmak üzere 3 tip materyal bulunmaktadır (Şekil 2.7). Yansıtan materyaller (metal, kavite duvarı) elektromanyetik dalgaları tamamen yansıtmakta olup, bu materyallerde ısınma gerçekleşmemektedir. Transparan materyaller mikrodalgaları geçirmekte ama absorbe edemediklerinden bir ısınma durumu oluşmamaktadır. Elektromanyetik dalgayı absorbe eden materyallerde ise (örneğin gıda ürünleri) ısınma ve buna bağlı olarak sıcaklık yükselmesi gerçekleşmektedir.

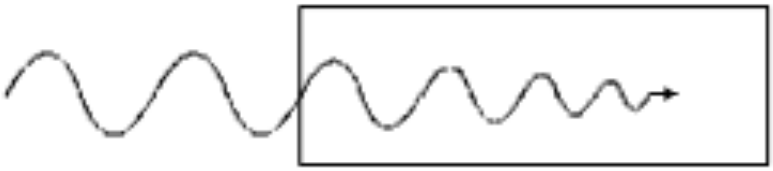
MW prosesinde ürün tarafından absorbe edilen gücün ürün şekline, hacmine ve ürünün dielektrik özellikleriyle değişmektedir (Zhang ve Datta 2003). Ev tipi mikrodalgada farklı şekiller içerisinde farklı hacimlerde mısır yağı, donmuş sebze, jambon, patates ve su proses edilmiş ve ürünler tarafından absorbe edilen güç karşılaştırılmıştır. Absorbe edilen güç ürünün hacmi arttıkça artış göstermiştir ancak absorbe edilen güç verimliliği azalmıştır. Küçük boyutlarda; yüksek kayıp faktörüne sahip (su), düşük kayıp faktörü (mısır yağı)'ne göre birkaç kat daha fazla ısınmıştır. Mısır yağı ve su ürünlerinin hacimleri büyüdükçe absorbe edilen güç verimliliği birbirine yakınlaşmıştır, mısır yağının özgül ısı kapasitesi sudan daha düşük olduğundan ısınma oranı daha hızlı olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.7 Materyallerin mikrodalgalarla etkileşimi
(http://mikrodalgauygulamalari.blogspot.com.tr/)

a. transparan materyaller, b. opak materyaller, c. elektromanyetik enerjiyi absorbe eden materyaller

Mikrodalga – elektromanyetik dalgaların zamanla boşlukta dağılımı Maxwell eşitlikleriyle açıklanmaktadır:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.10}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2.11}$$

$$\nabla . \vec{D} = \rho \tag{2.12}$$

$$\nabla . \vec{B} = 0 \tag{2.13}$$

Maxwell denklikleriyle elde edilen elektrostatik formüllerinde; D elektrik akı yoğunluğu vektörünü, E elektrik alan şiddeti vektörünü, B manyetostatik model için

manyetik akı yoğunluğu vektörünü, H manyetik alan şiddeti vektörünü tanımlamaktadır. ρ ise serbest yüklerin hacim yoğunluğunu gösterirken, J hem konveksiyon akımından (ρu) hem de iletkenlik akımından (σE) oluşabilen serbest akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Lineer ve yön bağımsız ortamlar için E ve D (Eşitlik 2.14); B ve H (Eşitlik 2.15) arasındaki ilişki, aşağıdaki eşitliklerle gösterilmektedir:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \times \vec{E} \tag{2.14}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \times \vec{H} \tag{2.15}$$

$$\vec{J} = \sigma \times \vec{E} \tag{2.16}$$

Mikrodalga ile hacimsel ısıtmada diğer bir önemli parametre ise elektromanyetik dalgaların ürün içerisine ne kadar penetre olabileceği konusudur. Elektromanyetik dalgaların ürün yüzeyine ulaşmasıyla ürün içerisinde ilerlemekte ve bu sırada ürün tarafından absorbe edilen enerji ve ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Penetrasyon derinliği, materyalin yüzeyinden itibaren e^{-1} (1/e=2.718 = %37) kadar derinliğe ulaşabilmekte olup, materyalin dielektrik özelliklerine de bağlı olarak bu değer eşitlik 2.17 ile hesaplanabilmektedir:

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon'} \sqrt{\sqrt{1+(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'})^2}-1}} \tag{2.17}$$

Penetrasyon derinliği uygulama frekansı ile ters orantılı olduğundan endüstriyel sistemlerde 2450 MHz yerine 915 MHz tercih edilmektedir. Aynı zamanda dielektrik kayıp faktörünün yüksek değerlere sahip olması da ürünün absorbe edilen enerjiyi ısıya daha çok çevirebilmesini göstermesine rağmen penetrasyon derinliğini azaltacağından hacimsel bir ısınma sağlanamayacaktır (Çizelge 2.1). Çok yüksek penetrasyon derinliği değeri, mikrodalga enerjinin çok az absorbe edildiğini; düşük penetrasyon derinliği değeri, mikrodalga enerjisinin materyalin yüzeyinde kaldığının bir göstergesi olarak kabul edilebilmektedir.

Çizelge 2.1 Saf su, % 2 ve % 4 (w/w) NaCl çözeltilerinin dielektrik özelliklerinin ve penetrasyon derinliğinin sıcaklıkla değişimi

	Saf Su			% 2 (w/w) NaCl çözeltisi			% 4 (w/w) NaCl çözeltisi		
Sıcaklık (°C)	ε'	ε''	d_p	ε'	ε''	d_p	ε'	ε''	d_p
8	83.0	16.5	1.08	79.2	34.0	0.521	74.3	51.6	0.343
20	79.7	11.1	1.57	73.9	34.1	0.504	68.0	52.7	0.325
38	73.2	6.4	2.61	65.0	40.9	0.401	60.7	63.7	0.264
57	67.3	3.9	4.1	64.4	49.4	0.337	55.7	80.8	0.212
77	61.3	2.5	6.1	58.8	57.2	0.286	50.7	100.3	0.175

Campanone vd. (2004) tüketicilerin 'hazır yemek' ve 'hızlı pişirme' yaşam sitiline kayması evlerde gıda ısıtmada mikrodalganın kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Ancak mikrodalga ısıtma işleminde gıda içerisinde sıcak ve soğuk noktaların oluştuğunu matematiksel modelleme ile incelenmiştir. Küre, silindir ve küp şeklinde hazırlanan patates ve kıyma etin mikrodalga prosesinde iç sıcaklığının matematiksel modellenmesinde sonlu farklar metodu kullanılarak 1, 2 ve 3 boyutlu olarak sıcaklık değişimi incelenmiştir. 7 cm çapı olan kıyma etin MW ile 48 s proses edilmesinde en yüksek sıcaklık ürünün merkez noktasında bulunmuştur. 8 cm çapı 6 cm yüksekliği olan silindir şeklindeki kıyma etin proses sırasında dönme etkili prosesinin matematiksel model sonuçlarında en yüksek sıcaklığın yüzeyde olduğunu ve en düşük sıcaklığın merkezle yüzey arasında bir noktada oluştuğu göstermişlerdir. Aynı zamanda MW prosesinde ürün etrafında oluşan homojen olmayan elektromanyetik alanın merkezde dönme etkisiyle tamamen elimine edilemediğini ürün içinde oluşan farklı sıcaklıklarla göstermişlerdir.

Mikrodalga uygulama çözdürme prosesi konusunda farklı çalışmalara gerçekleştirilmiş olup, bu çalışmaların ortak yönü üründe homojen bir sıcaklık dağılımını elde etme konusundadır. Llave vd. (2016), Tylose (metil selüloz ve saf su karışımı, hamur) dielektrik özelliklerini 300 – 3000 MHz'da -30 ile +60 °C sıcaklık aralığında

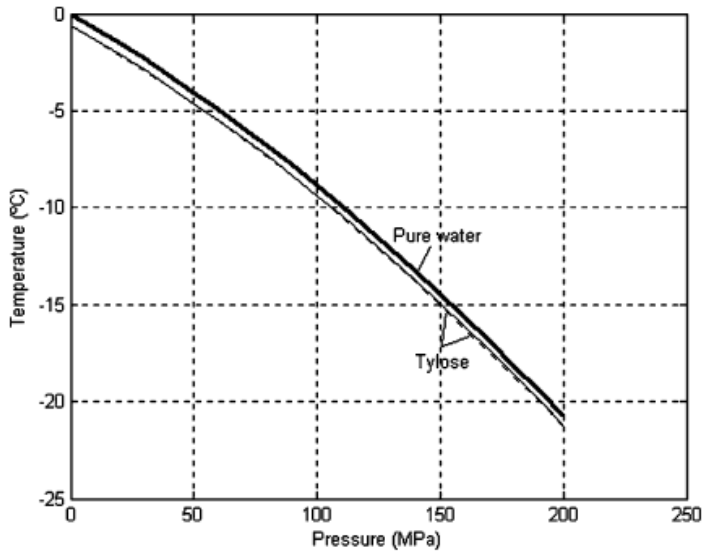
belirlemişlerdir. Tuzun (NaCl) dielektrik özellikler üzerine etkisinin incelemişlerdir ve %0.5 (g/g) NaCl karışımlı Tylose materyalinin dielektrik özelliklerinin donmuş yağsız orkinos balığına çok yakın olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda tuzun dielektrik kayıp faktörünü arttırdığı ancak penetre derinliğini azalttığı için çözdürme süresini ve homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı elde edildiğini göstermişlerdir.

Raj vd. (2011), ev tipi mikrodalgada silindir şeklinde %1'lik jellan jel kullanmışlardır. Mikrodalga prosesini 30 s - 1100 W güç kullanarak ve ürünü hem merkez hem de merkez dışında döndürerek gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda Comsol V5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) yazılımını kullanarak deney – simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Merkezde dönme hareketinde hareketli ağ yapısını kullanırken merkez dışı dönme hareketini MATLAB programındaki yazılımı Comsol programıyla birleştirerek gerçekleştirmişlerdir. Mikrodalga ısıtmada dönmenin etkisinin sıcaklık dağılımına etkisini göstermek için materyalin sabit durduğu ve döndüğü durumlarda analizler yapılmıştır ve karşılaştırılmıştır (Geedipalli vd. 2007). Yapılan çalışma sonucunda dönmenin etkisiyle daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Liu vd. (2012) sade ve %1 NaCl içeren patates püresi ile MW prosesi sırasında dönme hareketinin ürün sıcaklık dağılımına etkisini deneysel ve matematiksel modelle incelemişlerdir. Matematiksel modelde FEMAP (V10.2, Siemens PLM Software Inc., Plano, Texas, USA) ve PHOTO – Series (V7.2, PHOTON Co. Ltd., Kyoto, Japan) yazılımları kullanılmıştır. Matematiksel modelde ve deney sırasında ürün MW kavitenin merkezinde sürekli (30 ° s^{-1}) döndürülmüştür. Dikdörtgen prizma ve silindir kaplar kullanılarak yapılan analizlerde dikdörtgen yapıda kenarların ve köşelerin daha fazla ısındığı gözlenmiştir. Bu çalışmada 120 s yapılan matematiksel modelleme elektromanyetik alanı her saniye için baştan çözümlenmesinden dolayı 54 saat sürmüştür. Elektromanyetik alanın proses başında çözümlenip proses süresince aynı olduğu varsayıldığında modelin çözümlenmesi 8 saat almıştır. Ancak model sonuçları deneysel verilere göre düşük sıcaklıklarda kalmıştır. Matematiksel model sırasında her 10 saniyede bir elektromanyetik alanın çözümlenmesi ile ürün sıcaklık dağılımı deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Mikrodalga sistemlerde kullanılan magnetronların ısınması nedeniyle ürettikleri elektromanyetik alanlar kesikli bir şekilde oluşmaktadır. Özellikle ev tipi mikrodalgalar kesikli güç üretme prensibi ile çalışmaktadır. Ancak yeni bir sistem olan inverter sistemlerde istenilen güçte sürekli elektromanyetik alan üretimi kullanılabilir. Chen vd. (2016), farklı tuz oranlarındaki Tylose örneklerini sürekli ve kesikli mikrodalga sistemlerinde proses edilmiştir. Deney sırasında kullanılan fiber optikler sayesinde materyal içindeki sıcaklık değişimini elde edilmiştir. Sürekli ve kesikli mikrodalga sistem sıcaklık profilleri karşılaştırıldığında çok az bir fark olduğunu göstermişlerdir. Özellikle proses sonrasında ulaşılan son sıcaklıklar birbirine çok yakındır ama zaman içerisindeki sıcaklık artışı profilinde farklılıklar vardır.

Mikrodalga ile temperleme/çözdürme prosesi yaparken donma (çözünme) başlangıç noktasında materyalde faz değişimi yaşanmaktadır. Bu fiziksel değişim sonucunda materyalin ısı kapasitesinde, ısı iletkenliğinde ve dielektrik özelliklerinde sıcaklıkla farklılıklar olmaktadır. Watanabe vd. (2010) donmuş ton balığının mikrodalga ile çözdürülmesi çalışmasında termal özelliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.8 Saf suyun ve Tylose donma (çözünme) sıcaklığının basınç ile değişimi (Otero vd. 2006)

Bu kapsamda görülmektedir ki yüksek basınç altında çözdürme ile geleneksel – konvansiyonel çözdürmeye göre proses süresi kısalmakta ancak son ürün özelliklerinde istenmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Mikrodalga ile çözdürme prosesinde ise yine proses süresi kısaltılabilmekte ancak ürün sıcaklık dağılımı açısından problemler ortaya çıkabilmektedir. Otero vd. (2006) dielektrik özelliklerin tuz ile ayarlanarak et ve balık ürünlerin dielektrik özelliklerine benzetilebilen Tylose maddesinin termal özelliklerinin basınç ile değişimini göstermişlerdir (Şekil 2.8). Özellikle yüksek basınç altında termal özelliklerde önemli değişikler olduğu görülmektedir.

Bu çalışma doğrultusunda basıncın etkisiyle materyalin donma (çözünme) başlangıç noktasını düşürerek mikrodalga ile çözdürme prosesi uygulamaktır. Düşük basınç altında yapılan mikrodalga prosesinde materyalin sıcaklık dağılımı inceleneceği gibi Morina balığının mikrodalga prosesi ile çözdürülmesi sırasında fiber optiklerle iç sıcaklığı da incelenecektir.

Bu tez çalışmasında dondurulmuş ürünlerin MW uygulaması ile çözdürülmesi özel tasarım bir sistemde gerçekleştirilmiş, bu kapsamda istem içerisinde uygulanan basıncın çözdürme prosesine MW uygulaması sırasındaki etkileri araştırılmış, sistem içi elektrik alan dağılımı ve ürün sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiş ve sistem içi ürün hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu amaçlar doğrultusunda yapılan çalışmalar 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, kullanılan MW sistem içi elektrik alan dağılımını belirlemek ve buna bağlı olarak ürün sıcaklık değişimlerini hesaplamak amacıyla matematiksel model geliştirme çalışmaları (birinci ve ikinci aşama) yapılmıştır. Isıtma ve çözdürme sırasındaki sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla geliştirilen modellerin deneysel olarak doğrulama çalışmalarında ise %77 su içeriğinde Tylose (Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Germany: viskozite: 1,500 cP) kullanılmıştır. İkinci aşamada MW sistem içerisinde ürüne uygulanan dönme hareketinin, ısıtma ve çözdürme sırasında ürün sıcaklık değişimine etkisini belirlemek amacıyla matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, MW ısıtma ve çözdürme performansına basınç (2 bar) etkisini belirlemek amacıyla yine Tylose kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modeller deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise dondurulmuş morina balıkları için MW uygulayarak çözdürme çalışmaları yapılmış ve sistem içerisinde uygulanan dönme etkisinin ürün sıcaklık değişimine etkisi belirlenmiştir.

3.1 Materyal

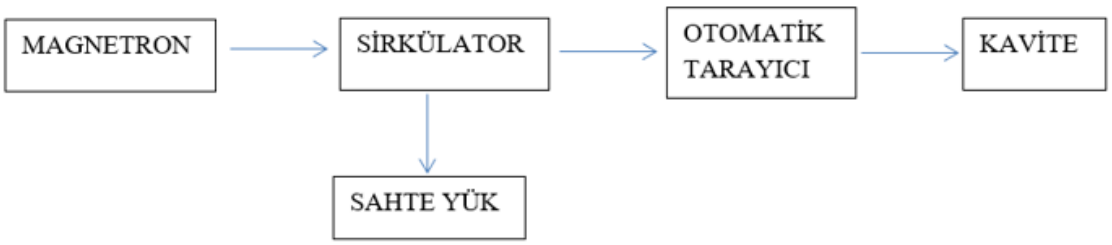
3.1.1 Çalışmalarda kullanılan mikrodalga sistem

Çalışmanın bütün aşamalarında, Nofima AS (Stavanger, Norveç)'de bulunan Gigatherm (Flawil, Switzerland) tarafından tasarlanan basınç altında da çalışabilen mikrodalga sistem kullanılmıştır (Şekil 3.1). Bu sistem 2450 MHz'de çalışmakta olup; magnetron, üç girişli sirkülator (circulator), sahte yük (dummy load), otomatik tarayıcı (Auto Tuner), dikdörtgen dalga kılavuzu, silindirik kavite, döner tabak ve fiber optiklerden meydana gelmekte olup magnetronda oluşan elektromanyetik alanın izlediği yol şematik olarak şekil 3.2'de gösterilmiştir. Sistemde bulunan magnetron, 1000 – 6000 W arasında güç verebilmekte olup kullanılan dalga kılavuzu dikdörtgen şeklinde TE_{10} dalga yayılımına uygun olarak tasarlanmıştır. Magnetrondan gelen elektromanyetik enerjinin bir kısmı dalga kılavuzu içindeki yansımalar sonucu geri dönebileceğinden ve

bunun sonucunda magnetronun ısınma problemi oluşacağından, bir ucu güç yüküne bağlı olan üç girişli sirkülator sistem içerisinde kullanılmıştır. Sirkülatörün diğer ucu ise sahte yüke bağlı olup, bu bölümde bulunan su ile sistemde yansıtan elektromanyetik enerjinin absorbe edilmekte ve magnetrona geri dönüşü engellenmektedir. Otomatik tarayıcı, sirkülatörden sonra dalga kılavuzundan geçen gücü birim zamanda hesaplayarak sistemde kullanılan gücün belli bir seviyede kalmasını sağlamaktadır (Saxena 2014). Kavite, materyalin yer aldığı ve ürünün ısınmasının gerçekleştiği bölüm olup, paslanmaz çelikten yapılmış duvarları ile gelen elektromanyetik enerjiyi absorbe etmeden yansıtmaktadır. Teflondan yapılmış olan döner tabla sistemin ortasında ve belli bir yükseklikte bulunmaktadır. Dönme hareketi saat yönünde 330 °'lik bir açıyla gerçekleşmekte ve devamında saat yönünü aksinde yine 330 ° olarak devam etmektedir. Bu mikrodalga sistem maksimum 4 bara kadar basınç altında çalışabilmektedir. Ancak 4 bar basıncın oluşabilmesi için gerekli süre çok uzun olduğundan ve bu süre içerisinde deneylerde kullanılacak ürün sıcaklığı yükselmeye başladığından deneysel çalışmalar 2 bar basınç kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



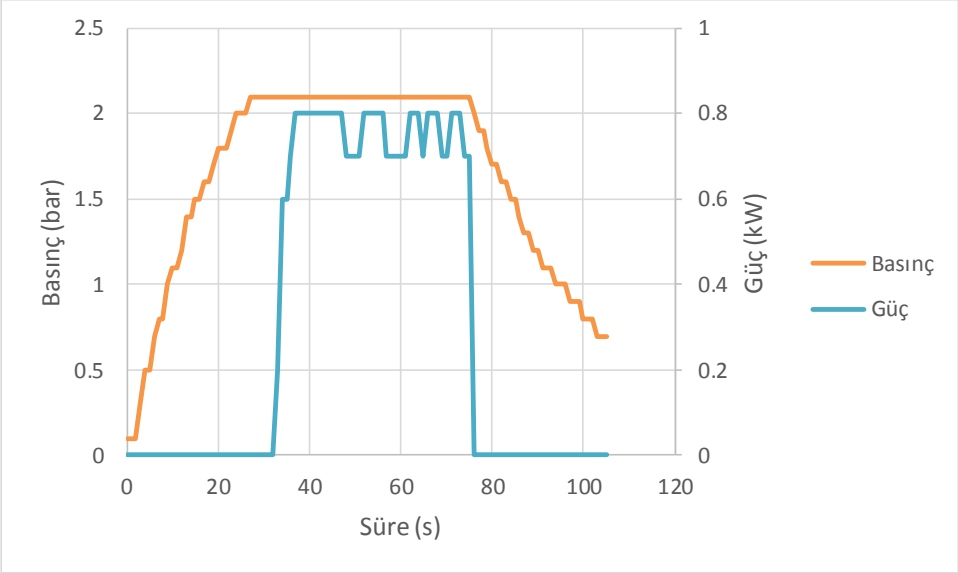
Şekil 3.1 Nofima AS (Stavanger, Norveç)'de gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan mikrodalga sistem (Gigatherm vd).



Şekil 3.2 Elektromanyetik alanın mikrodalga sistem içerisinde izlediği yol

Uygulama sırasında öncelikle MW sistem içerisinde basınç oluşturulmakta ve basınç sabitlendikten sonra magnetronun çalışmasıyla ısıl işlem gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.3 sistem içi basıncın dengeye gelmesi ve sonrasında 1 kW güç uygulamasında sistem

güç değerinde meydana gelen değişimi göstermektedir (basınç ve güç değişim değerleri aşağıda açıklanan çözdürme prosesine basıncın etkisinin belirlenmesi deneyleri sırasında kaydedilmiştir). Proses sonunda ise ilk önce magnetron devreden çıkmakta ve sonrasında sistem içerisindeki basıncın dengeye gelmesi beklenmektedir. Ürün sıcaklık değişimleri fiber optik problar kullanılarak belirlenmiştir. Proses sonrasında basıncın dengeye gelmesi sırasında ürün sıcaklık değişimleri devam ettiğinden termal kamerayla görüntü alınması işlemi tercih edilmemiştir.

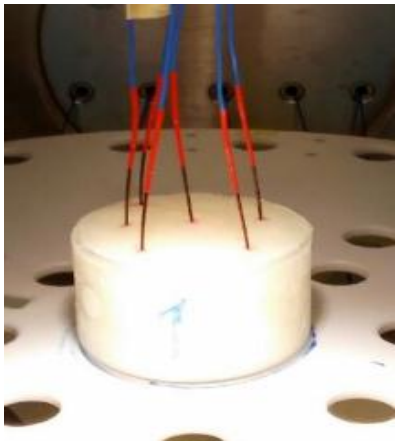


Şekil 3.3 Mikrodalga sistemde basınç ve güç değişim değerleri

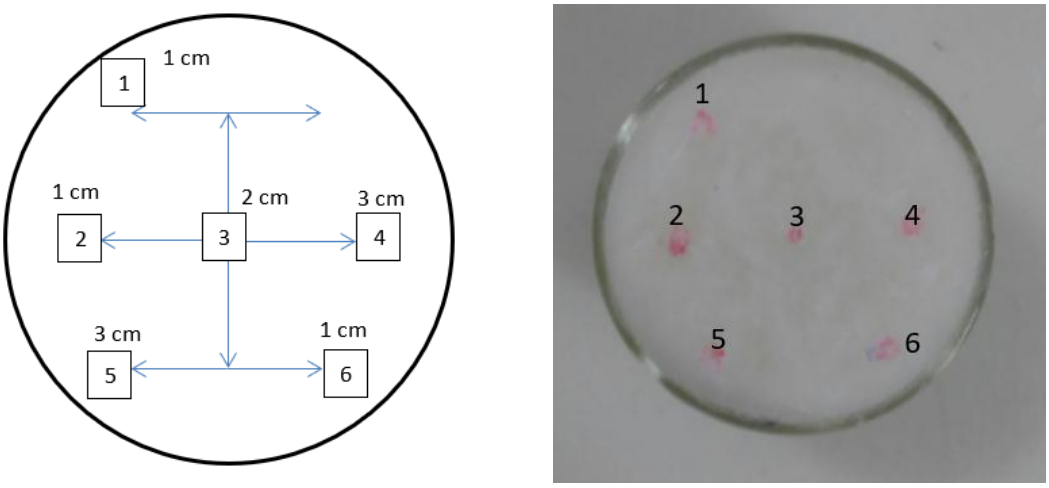
3.1.2 Kullanılan ürünler

Çalışmanın, yukarıda kısaca açıklanan ilk 3-aşamasında ürün olarak %77 su içeriğinde Tylose kullanılmıştır. Çözdürme çalışmaları için, hazırlanan Tylose örnekleri -18 °C'de dondurulmuş ve 1 gün bu sıcaklıkta depolandıktan sonra kullanılmıştır. MW ısıtma çalışmalarında ise hazırlanan Tylose örnekleri 1 gün +4 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Tylose örnekleri ile yapılan deneysel çalışma sonuçları farklı MW uygulama koşulları için geliştirilen matematiksel modellerin doğrulanmasında kullanılmıştır. % 77 su içeriğinde hazırlanan Tylose, gıda proses uygulamalarında deneysel çalışmalarda, ete benzer ısıl ve fiziksel özellikleri nedeniyle genel olarak tercih edilmektedir. Literatürde

bu konuda farklı çalışmalar olduğu gibi son yıllarda MW uygulama proseslerinde, hazırlanan jel yapısıyla farklı boyut ve geometrilere kolaylıkla uydurulabildiğinden tercih edilen bir ürün olmuştur (Zhang vd. 2005). Llave vd. (2016), % 77 içeriğindeki Tylose'un dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimini ve bu özelliklere eklenen NaCl etkisini detaylı olarak rapor etmişlerdir. Bu tez çalışmasında da aynı Tylose (Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Germany: viskozite: 1,500 cP) ürünü kullanılmış ve dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi Llave vd. (2016)'dan alınmıştır. Tylose jel materyali, metil selüloz tozu üzerine 65 °C'ye ısıtılmış saf su yavaş yavaş eklenmek sureti ile karıştırılarak elde edilmiştir. Hazırlanan Tylose maddesi yarıçapı 3.3 cm ve yüksekliği 3.8 cm olan silindir şekilli silika kaplara konmuş, +4 ve -18 °C'de 1 gün depolandıktan sonra MW proses sırasında sıcaklık ölçümünü gerçekleştirmek amacıyla fiber optik problar proses öncesinde belirlenen noktalara konumlandırılmıştır (Şekil 3.4, 3.5). Fiber optik problar ürün üst yüzeyinden T1'de 1 cm, T2'de 1 cm, T3'de 2cm, T4'de 3 cm, T5'de 3cm ve T6'da 1 cm derinliğe yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Isıl işlem ve çözdürme deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanmış olan Tylose örneği ve içerisine yerleştirilmiş fiber optik problar.



Şekil 3.5 Fiber optik probların tylose örneği içerisine yerleştirilmesi

(Belirtilen uzunlu değerleri probların belirtilen noktada yüzeyden olan derinlikdeğerini göstermektedir).

MW uygulama sırasında ürün sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesi OPTOCOM AG Fiber Optic Temperature Sensor TS3 (Dresden, Germany) sistem kullanılmıştır. Ayrıca, MobIR® M8 Thermal Camera (Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., China) kullanılarak ürün yüzey sıcaklık değişimleri proses öncesi ve sonrasında belirlenmiştir.

Tylose kullanılarak elde edilen deneysel verilerle geliştirilen matematiksel modellerin doğrulaması gerçekleştirilmiş ve sistem içi elektrik alan dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca basınç uygulamasının MW uygulama sırasında gerçekleşen sıcaklık değişimine etkisi belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan denemeler ve matematiksel modellemeler sonrasında dondurulmuş morina balığının çözdürülmesinde kullanılarak çalışma parametrelerine karar verilmiştir.

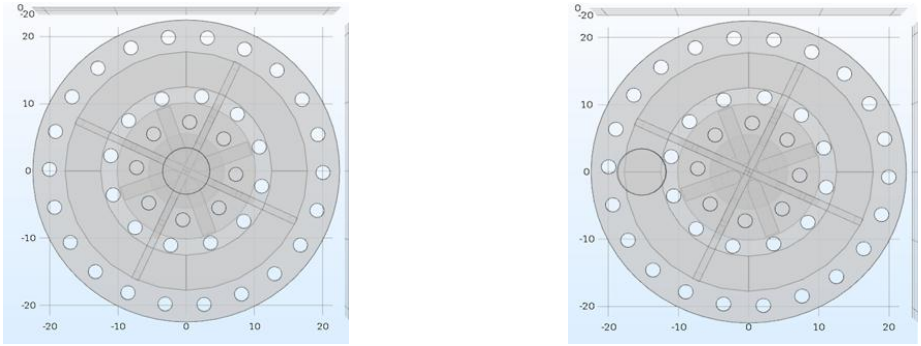
Çalışmanın son aşamasında MW uygulama ile dondurulmuş morina balıklarının çözdürülmesi gerçekleştirilmiştir. Morina balığının tercih edilmesinin en önemli nedeni, balıkların tekil olarak dondurulması ve MW uygulamanın tekil dondurulmuş ürünlerin çözdürülmesine olan uygunluğudur. Daha önce açıklandığı üzere MW uygulamada kullanılan frekans (2450 MHz) ve dalga boyu (λ = 12.24 cm)'na bağlı olarak tekil olarak dondurulmuş hacimsel olarak küçük boyutta olan ürünlerin çözdürülmesinde MW uygulama, RF uygulamaya göre, daha etkin olarak kullanılabilecektir. Norveç

Morina balığın lider tedarikçisidir (Ragnarsson ve Viðarsson 2017). Ayrıca, Morina balıkları Norveç deniz ürünleri ihracatında önemli bir paya sahip olup Türkiye'nin de Norveç'ten ithal ettiği ürünler arasında önemli bir yer tutmaktadır (http://www.fao.org/fishery/facp/NOR/en#CountrySector-Statistics,2017/http://www. disticaret. biz.tr/2016/10/su-urunleri-ihracati-ve-ithalati.html,2009).

3.2 Yöntem

3.2.1 Matematiksel modelleme çalışmaları

MW uygulama ise ısıtma ve çözdürme proseslerinde, prosesin gerçekleştiği kavite, kavite geometrisi ve materyali, kavite içerisindeki dönme sistemi ve bu sisteme ait parçaları sistem içi elektrik alan dağılımı ve buna bağlı olarak ürün sıcaklık değişimini etkilemektedir. Bu nedenle, farklı proses koşullarının test edilmesi amacıyla deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi zor ve maliyetli bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmada öncelikle sistem içi elektrik alan dağılımının ve ürün sıcaklık (ısıtma ve çözdürme proseslerinde) değişiminin belirlenmesi amacıyla öncelikle bir matematiksel modelin gerçekleştirilmesi ve bu modelin deneysel olarak doğrulanması planlanmıştır. Daha sonraki aşamalarda, geliştirilen matematiksel model, ürüne uygulanacak dönme hareketinin sıcaklık değişimine etkisinin belirlenmesi amacıyla modifiye edilmiş ve yine deneysel olarak doğrulanmıştır. Matematiksel modelleme ve geliştirilen modellerin deneysel olarak doğrulama çalışmaları tezin birinci ve ikinci aşamasını oluşturmuştur. Bu bölümde öncelikle Tylose'un MW sistem kavitesinde dönme tablasının merkez ve merkez dışı bir noktasında (Şekil 3.6) bulunduğu durum düşünülerek model geliştirme ve doğrulama amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde deneysel çalışmalar atmosferik basınç altında 1 kW güç uygulaması ile yapılmıştır.



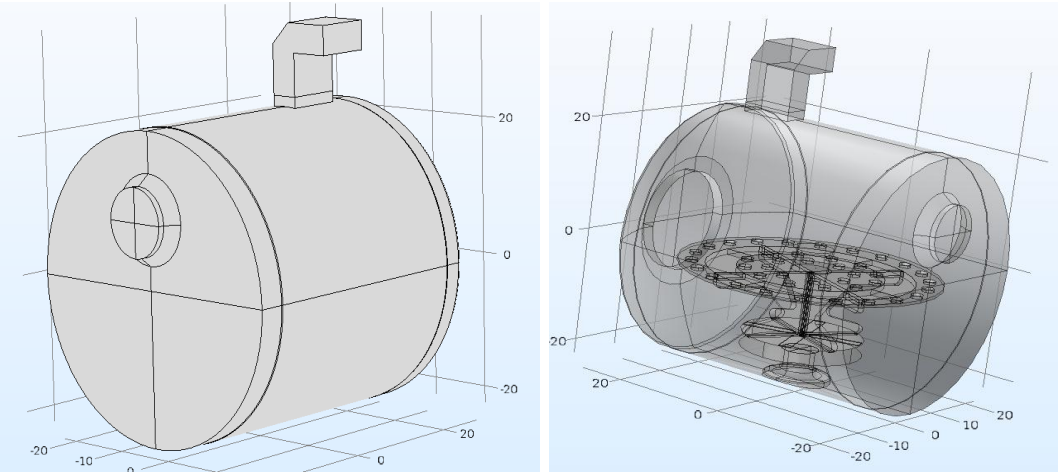
(a) (b)

Şekil 3.6 Tylozun MW sistem kavitesinin tablasında a. merkez, b. merkez dışı konumu

Matematiksel modelleme çalışmaları için Comsol V.5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik programı kullanılarak 5-adımda gerçekleştirilmiştir:

- Sistem geometrisinin oluşturulması:

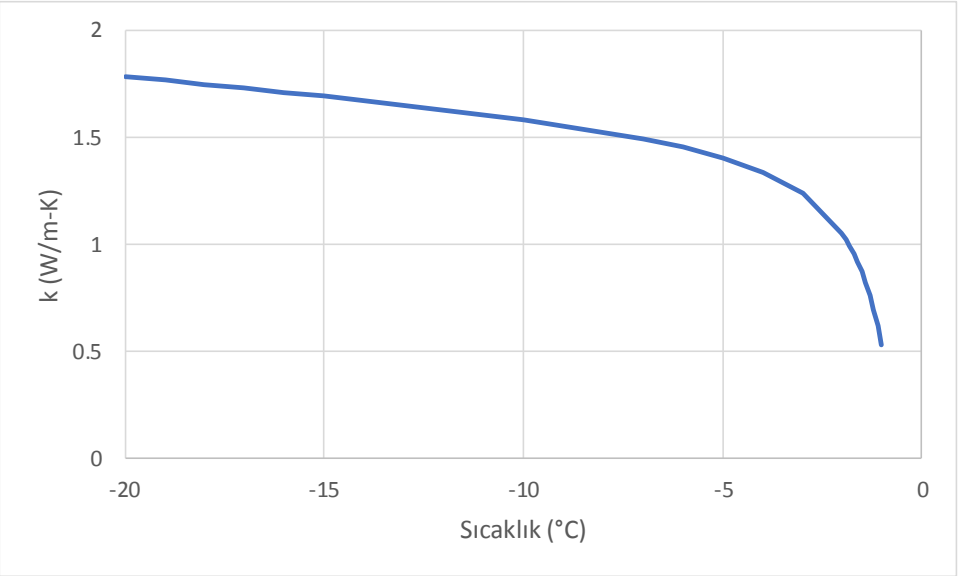
Gigatherm (Flawil, Switzerland) firması tarafından tasarlanan MW sistemin gerçek ölçülerinde Comsol programı geometrik oluşturma özellikleri kullanılarak hazırlanmış olan geometrisi şekil 3.7'de gösterilmektedir. Bu geometrik oluşumda, sistem kavitesi ve içerisindeki tasarımlar ile dalga kılavuzunun sisteme giriş yaptığı bölümü kullanılmış ve model çalışmalarına dahil edilmiştir. Silindirik kavitenin yarıçapı 22.5 cm olup geometri çizilirken merkezi 0(x)-0(y)-0(z) noktası alınmıştır. Kavite içinde yer alan tabla mekanizması ise -2.55 cm yüksekliğe yani kavite merkezinden 2.55 cm aşağıda bulunmaktadır. Ürünün yarıçapı 3.3 cm ve yüksekliği 3.8 cm'dir. Matematiksel modelde ürünün alt yüzeyi tablanın üst yüzeyi olan kavite merkezinden 2.55 cm aşağıda bulunurken üst yüzey yüksekliği modelin merkezinden 1.25 cm yüksekliğe denk gelmektedir.



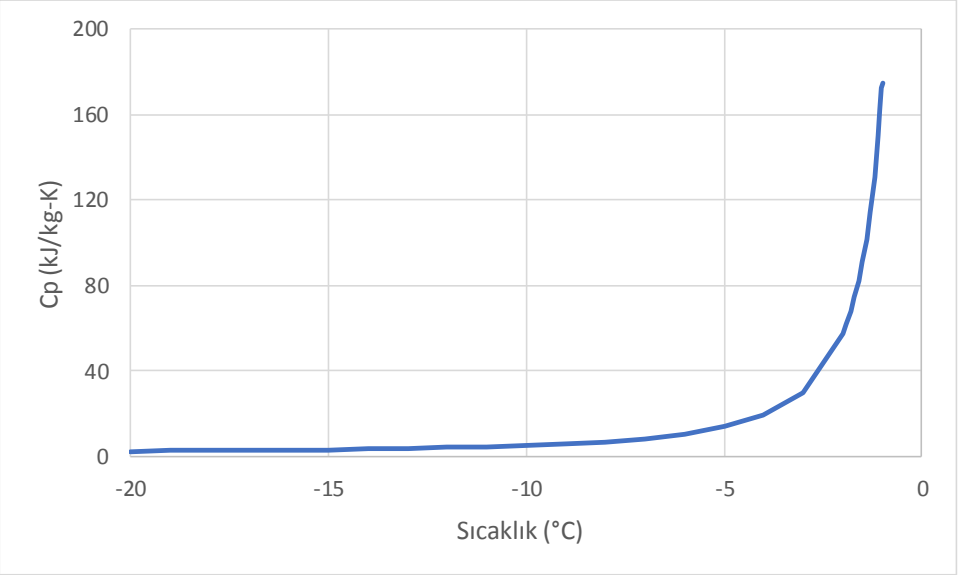
Şekil 3.7 Kullanılan mikrodalga sistemin geometrisi.

- Materyal özellikleri:

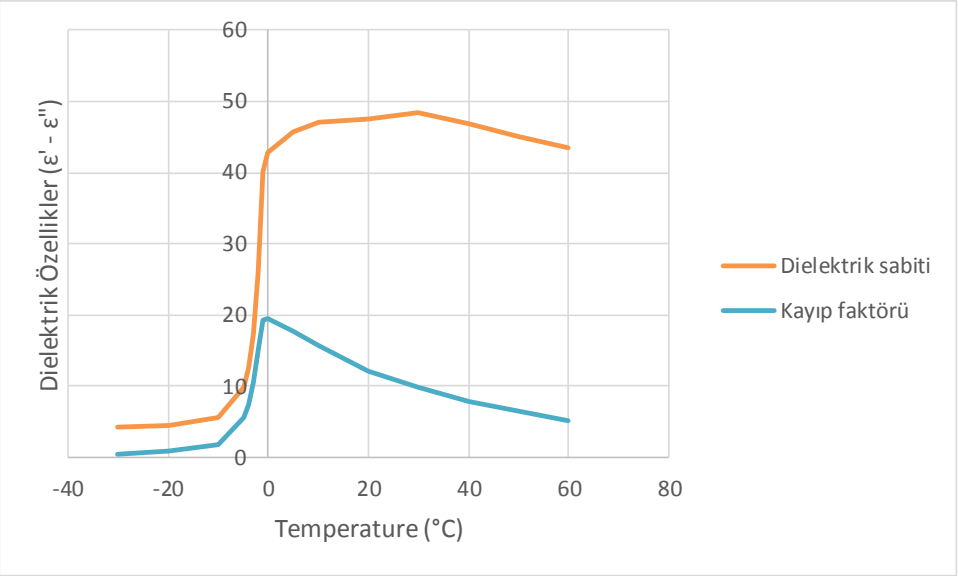
% 77 su içeriğinde hazırlanmış olan Tylose'un ısısal, fziksel (Llave vd. 2015) ve dielektrik özellikleri (Llave vd. 2016) sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Çözdürme çalışmalarında faz değişimine kadar olan bölgedeki ısıl iletim katsayısı ve özgül ısı değişimleri için kullanılan değerler şekil 3.8, 3.9'da gösterilmektedir. Faz değişimi sıcaklığı olan -1 °C'nin üzerinde olması durumunda ise ısıl iletim katsayısı 0.523 W/m-K ve özgül ısı kapasitesi değeri ise 3.65 kJ/kg-K olarak kullanılmıştır. Ürün yoğunluk değişimleri ise 1050 kg/m³ olarak sabit kabul edilmiştir (Llave vd. 2015) kabul edilecektir. Kavite içerisi, tylose dışında hava ile dolu olarak belirlenmiş; kavite duvarları ve dalga kılavuzu duvarları ise paslanmaz çelik olarak tanımlanmıştır. MW sistemin döner tablası teflondan yapılmış olduğundan, teflon için kompleks bağıl dielektrik geçirgenlik değeri 2.1 olarak kullanılmıştır. Tylose için kullanılan dielektrik özelliklerin sıcaklık değişimi ise şekil 3.10 (dielektrik sabiti ve kayıp faktörü)'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Tylose ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2015)



Şekil 3.9 Tylose ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2015)



Şekil 3.10 Tylose dielektrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (Llave vd. 2016)

- Başlangıç ve sınır koşulları:

Sistem içi elektrik alan değişimini belirlenmesi için Maxwell eşitliklerinin çözümü (Eşitlik 3.1) ve buna bağlı olarak ürün sıcaklık değişiminin belirlenebilmesi için Comsol V.5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik yazılımında, elektromanyetik alan ve ısı transferi modülleri çift olarak kullanılabildiğinden, mikrodalga ısıtma modülü kullanılmıştır.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu}\nabla \times \vec{E}\right) - \frac{\omega^2}{c}(\varepsilon' - i\varepsilon'')\vec{E} = 0 \qquad (3.1)$$

MW sistem kavitesi ve dalga kılavuzu bölgelerinde elektrik alan dağılımının belirlenmesi amacıyla Maxwell eşitliklerinin çözümü, 2450 MHz frekansında – TE_{10} modunda dikdörtgen dalga kılavuzu geometrisinde ve zamanla değişen güç değerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında elde edilen zamana karşı değişen güç değeri verileri matematiksel modelleme çalışmasında sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Kavite ve dalga kılavuzu duvarları ve tablanın alt tarafında bulunan 4 metal yüzey mükemmel iletken sınır koşulu olarak tanımlanarak duvarlara gelen elektromanyetik enerjinin tamamen yansıtıldığı kabulü yapılmıştır (Eşitlik 3.2). Teflondan yapılmış döner tabla

için ise düşük dielektrik özelliklerine rağmen elektromanyetik alanda belli bir kırılmaya sebep olabileceğinden dolayı, geçirgen sınır koşulu kullanılmıştır (Eşitlik 3.3).

$$n \times \vec{E} = 0 \tag{3.2}$$

$$n \times \left(\nabla \times (E)\right) - jkn \times (E \times n) = 0 \tag{3.3}$$

Ürün içerisindeki sıcaklık değişiminin belirlenmesi amacıyla gerekli olan ısı transferi denkliğinin çözümü (Eşitlik 3.4) için ise Katılarda Isı Transferi modülünde, elektromanyetik enerjiyi absorbe ederek ısınacak olan materyal Tylose olarak seçilmiştir. Ürün başlangıç sıcaklığı sabit ve tekdüze olarak kabul edilmiş, ürün alt yüzeyi hem silika kap hem de mikrodalga tabağı ile temas ettiğinden termal izole seçilirken ürünün diğer yüzeylerinde konvektif ısı transfer sınır koşulu uygulanmış (Eşitlik 3.5) ve ısı transfer katsayısı olarak 25 W/m² -K değeri kullanılmıştır.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q \tag{3.4}$$

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \tag{3.5}$$

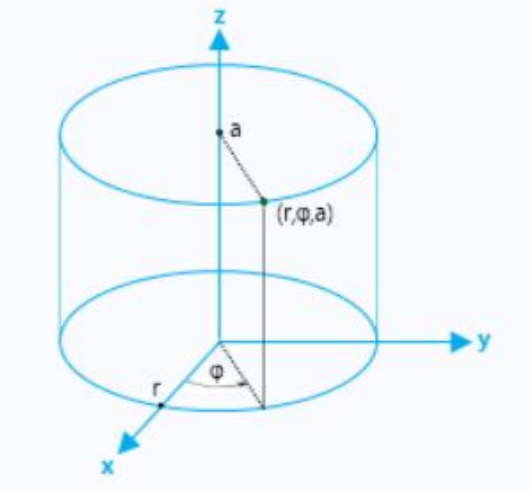
Daha sonra, mikrodalga ısıtma modülünde elektromanyetik enerji oluşumu ve ısı transferi çözümleri birbirine bağlanmıştır. Elektromanyetik enerjinin materyal tarafından absorbe edilmesi ve hacimsel ısınmanın hesaplanması için eşitlik 3.6 kullanılmıştır:

$$Q = \sigma\left|\vec{E}\right|^2 = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon''\left|\vec{E}\right|^2 \tag{3.6}$$

Dönme hareketinin yer aldığı matematiksel modeller için hareketli ağ modülü (moving mesh) kullanış ve bu hareket ürünün hareket edeceği dairesel yörüngeye bağlı olarak silindirik koordinat ekseninde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ürünün sistem içerisinde dairesel yörüngedeki konum (*sys2.r*) ve açısal hızı;

$$2 * \pi * rpm * sys2.r \tag{3.7}$$

olarak tanımlanmıştır. Bu eşitlikte ‘rpm’, sistem içerisinde uygulanan dakikadaki devir sayısı olup, ürünün 15 saniyede 330 °’lik yol alması için 3.67 rpm hızı kullanılmıştır. ‘*sys2.r*’, Comsol V5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) programında silindirik koordinat sistemindeki dairesel hareketin gerçekleştiği yarıçapı ve ürünün sistem içerisindeki konumunu göstermektedir. Bu eşitlik, ‘Hareketli Ağ’ yapısı modülünde, ağ hızı sınır koşulu içerisinde açısal hız olarak tanımlanmıştır. MW sistem döner tablasının 330 °’lik ilk hareketinden sonra aynı yörüngede geri dönerek başlangıç konumuna yine aynı sürede ulaşan bu hareketi proses süresince tekrarlanmaktadır. Matematiksel modellemede bu hareketin tanımlanması için analitik formül fonksiyonu kullanılarak 3.67 ve -3.67 rpm olan dairesel hareket hız değerleri kullanılmış ve her 15 s’de tekrar ederek şekilde tanımlanmıştır. Şekil 3.1, 3.12’de kavite içerisindeki tablanın tamamı proses sırasında dönmektedir. Matematiksel modellemede kullanılan iş istasyonlarının RAM yetersizliğinden (bu simülasyonların RAM ihtiyacı 96 Gbyte’dan daha yüksek olarak ortaya çıkmıştır) dolayı sadece ürünün döndüğü varsayımı yapılmıştır ve dönme hareketi sadece ürün için uygulanmıştır. Tablanın alt tarafında bulunan 4 metal yüzey dönme hareketinin olduğu deneyler sırasında elektromanyetik alan dağılımını değiştirmektedir. Dönme hareketinin olduğu matematiksel modellerde bu durum kullanılamamış ve simülasyon süresince metal yüzeylerin sabit konumda olduğu varsayımı yapılmıştır.



Şekil 3.11 Dönme simülasyonlarında kullanılan silindirik koordinat ekseni

- Ağ yapısının oluşturulması

  Belirtilen eşitlikler eş zamanlı olarak Comsol çoklu fizik sonlu eleman programında çözülmüştür. Bu amaçla geometri ağ yapısına bölünerek çözümleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısının oluşturulmasında Nyquist kriteri uygulanmıştır (Tuta ve Palazoğlu 2017);

$$S_{max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon'\mu'}} \tag{3.8}$$

  Nyquist eşitliğinde λ, dalga boyu (m); c, ışık hızı (m/s); f, frekans (Hz); ε', dielektrik sabitini; μ', bağıl geçirgenlik değerini temsil etmektedir. Comsol çoklu fizik programında çizilen geometrinin ağ yapısı programın her alan için farklı ağ yapısı seçme imkanından faydalanılmıştır. Bu özellikle ile yoğun ağ yapısı tercih edilirken kavite ve sistemin diğer parçalarında az yoğun ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan bu ağ yapısının özelliklerine ilişkin istatistik değerleri çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Comsol programı kullanılarak oluşturulan sistem ve ürün geometrinin ağ yapısına ilişkin istatistik değerleri

Ağ yapısı özellikleri	
Dörtgensel eleman sayısı	293094
Üçgensel eleman sayısı	44477
Köşe eleman sayısı	7312
Tepe eleman sayısı	848
Element sayısı	293094
Ağ hacmi (cm^3)	77480

Nyquist eşitliğine göre kullanılması gereken element boyutunun en az;

$$\frac{3\times10^8}{2*2.45\times10^9\sqrt{50*1}} = 8.65 \times 10^{-3}m \quad (3.9)$$

olması gerekmektedir. Eşitlik 3.9'da Tylose için dielektrik sabiti yüksek bir değer olarak alınmıştır (Şekil 3.10). Bu değerle karşılaştırmak amacıyla, ağ yapısı verilerinden toplam element sayısı ve toplam ağ hacmi kullanılarak elde edilen birim element hacim değerinden element boyutu hesaplanmıştır:

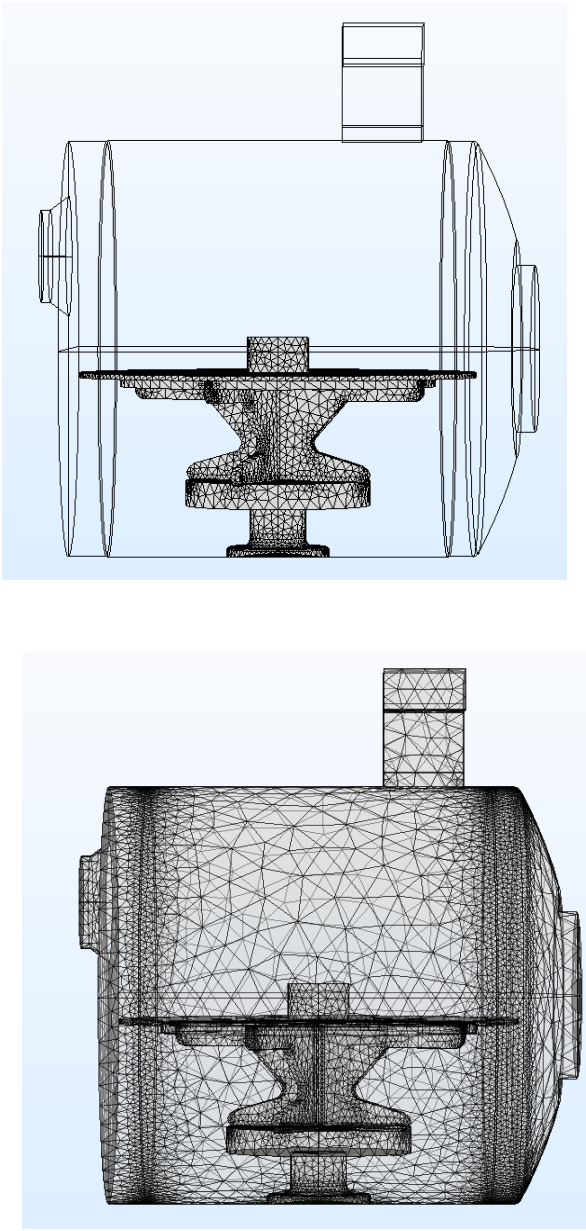
$$\frac{77480}{293094} = 0.026\ cm^3 \quad (3.10)$$

$$\sqrt[3]{0.026} = 0.296\ cm = 2.96 \times 10^{-3}\ m \quad (3.11)$$

$$S_{max} < \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon'\mu'}} \quad (3.12)$$

$$2.96 \times 10^{-3}\ m < 8.65 \times 10^{-3}m \quad (3.13)$$

Buna göre çalışmada kullanılan 2.96×10^{-3}m değeri Nyquist eşitliği kullanılarak elde edilen 9.68×10^{-3} m değerinden küçük olarak bulunmuş ve kullanılan ağ yapısının elektromanyetik alan hesaplaması simülasyonları için doğru olduğu gösterilmiştir. Ağ yapısı hazırlanırken, Tylose örneği içinde kullanılan element boyutu ise faz değişimi probleminin kompleksitesi de düşünülerek daha düşük oranda kullanılmıştır (Eşitlik 3.13 - $2.62 \times 10^{-3}\ m$). Modelleme çalışmaları için oluşturulan ve kullanılan ağ yapısı şekil 3.12'de göstermiştir.



Şekil 3.12 Matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılmak amacıyla oluşturulan ağ yapısı

- Çözüm:

Ürün sıcaklık değişimini, özellikle ürün içerisinde sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen elektrik alan değişimini ve dönme uygulanan simülasyonlarda sistem içerisinde sürekli olarak meydana gelen değişimlerin zamana bağlı çözümü amacıyla, frekans – zamana bağlı çözüm yöntemi kullanılmıştır.

Comsol modüllerinde tanımlanan başlangıç ve sınır koşulları doğrultusunda matematiksel eşitliklerin çözümü için Direkt (Direct) ve Tekrarlayan (Iterative) olmak üzere iki farklı çözüm yöntemi kullanmaktadır. Mikrodalga modülünün çözümü için Direkt (Direct) yöntemi tercih edilmiştir. Direkt yöntemi, LU ayrıştırma yöntemine dayanan MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver), PARDISO (Parallel Direct Sparse Solver) ve SPOOLES (SParse Object Oriented Linear Equations Solver) olmak üzere 3 çözüm seçeneği sunmaktadır. Bu 3 çözüm yönteminin de kullanılmasıyla sınır ve başlangıç koşulları bilinen durumlarda hazırlanan matematiksel modellerde sonlu elemanlar probleminin çözümünde aynı sonuç elde edilmektedir. Ancak, çözüm hızları ve çözüm için gereken RAM kapasiteleri farklılık göstermektedir. PARDISO en hızlı çözümü sunarken SPOOLES en yavaş çözüm seçeneği olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bu 3 çözüm yönteminin etkin çalışabilmesi için gerekli RAM ihtiyacı yüksektir. Bu nedenle, MUMPS ve PARDISO yöntemlerinin kullanılması, bu yöntemlerin çözümleri çekirdek dışında saklayabildiğinden, yani çözüm sırasında sabit diski kullanma özelliğine sahip (https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/, 2017) olmalarına bağlı olarak tercih edilmiştir. Buna rağmen ürünün sistem içerisinde merkez dışında bir konumda iken uygulanan dönme prosesinin simülasyonu için 2 × 12 çekirdekli Xeon -2.4 GHz hızlı bir iş istasyonunda ihtiyaç duyulan RAM 50 Gbyte olarak ortaya çıkmıştır. Bu koşullarda bu simülasyonun tamamlanması 30 saat sürmüştür. Dönme hareketinin olmadığı matematiksel model çalışmalarında da Maxwell denkliklerinin çözümü için MUMPS, enerji denkliğinin çözümü için PARDISO yöntemi tercih edilmiştir. Özellikle dönme işleminin uygulandığı modellerde, ürün hareketi sırasında, elektromanyetik alan ve ürün etkileşimin doğru ve kesin olarak hesaplayabilmek amacıyla model çözümlerinde kullanılan Δt değeri <0.1 s olarak kullanılmıştır. Uygulanan güç değerinde oluşan salınımların da doğru olarak model çözümüne (ve port sınır koşuluna) yansıtılabilmesi için düşük zaman aralığı kullanımı çözümlerin doğru elde edilebilmesi için önemli bir parametre olarak ortaya çıkmıştır.

- Deneysel doğrulama:

Geliştirilen matematiksel modellerin deneysel verilerle doğrulanması amacıyla, Tylose sistem içerisinde döner tablanın ortasına yerleştirilmiş, şekil 3.3-3.4 gösterilen

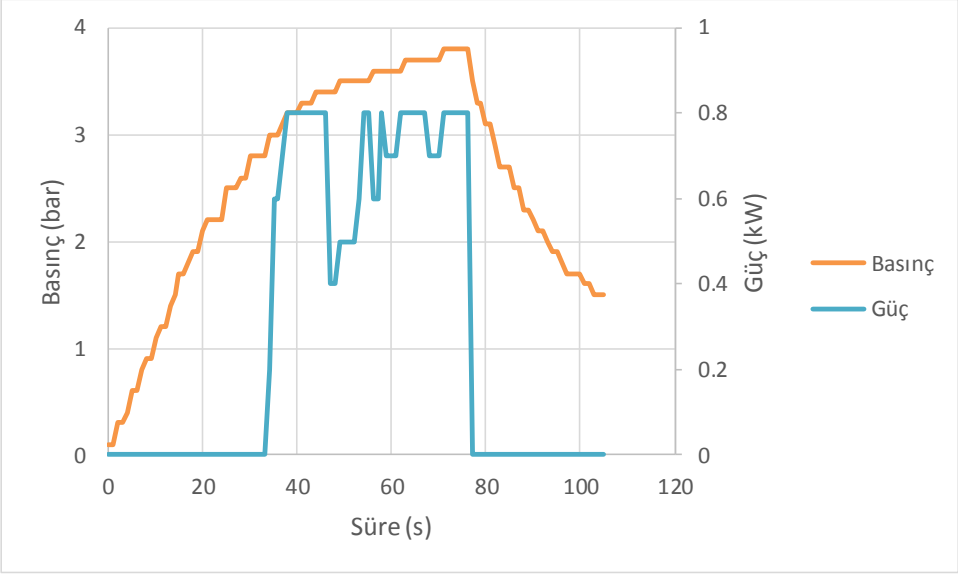
noktalardan 4 tanesine fiber optik problar yerleştirilmiş ve tablaya dönme uygulanmadan deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Model karşılaştırmalarında 3-deney çalışmasında elde edilen ortalama değerler kullanılmıştır. Model karşılaştırma sonuçları hem çözdürme hem de ısıtma kapsamında ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Proses sonrasında elde edilen yüzey sıcaklık değişimleri ise kızılötesi kamera kullanılarak elde edilen ısıl görüntülerle karşılaştırılmıştır.

MW uygulama çalışmalarında kullanılan materyalin sistem içerisindeki konumu, sistem içi elektrik alan dağılımına bağlı olarak sıcaklık değişimini etkilemektedir. Ayrıca sistem içerisinde ürünün konumlandığı tablaya dönme etkisinin uygulanması da ürün konumunun sistem içerisinde değişmesinden dolayı, özellikle merkez dışı konumlarda, önemli bir şekilde sıcaklık değişimini etkileyecektir. Ürün döner tabla merkezine yerleştirilmesi durumunda ürün kendi merkez noktası etrafında dönme hareketini gerçekleştireceğinden ve sistem içerisindeki konumu değişmeyecektir. Bu nedenle; merkez dışı bir noktada gerçekleşecek dönme hareketinin sıcaklık değişimine etkisi merkezdeki dönmeye göre daha önemli olabilecektir. Bu durumda, ürünün farklı bölgelerinin farklı elektromanyetik alan yoğunluğuna maruz kalması merkez noktadaki dönme durumuna göre daha belirgin olacaktır. Bu nedenle, ürünün döner tabla merkezine yerleştirilerek gerçekleştirilen model doğrulama deneylerinden sonra; ürünün merkez dışı bir noktaya (Şekil 3.6) yerleştirilmesiyle ve hem merkez hem de merkez dışı noktalarda dönme uygulanarak deneyler tekrarlanmış ve aynı koşullarda uygulanan model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. MW uygulamasında sistem içerisindeki dönme işleminin ürün sıcaklık değişimine etkileri kapsamında yapılan çalışmalar özellikle son 10 yılda artış göstermiştir. Geedipalli vd. (2007) MW sistemde tabla rotasyonunun ürün sıcaklık değişine etkisini sürekli bir dönme hareketi yerine ürün hareketini 24 aşamada tamamlayan 15 °'lik açı hareketi uygulayarak ve ürünün 0.417 s süre ile hareket etmediği varsayımına dayanarak geliştirdikleri modelle belirlemişlerdir. Raj vd. (2011) ise tabla rotasyonunu ağ yapısı hareketi modülü ile sadece merkez durum için gerçekleştirmişler ve ürünün kavite içerisindeki konumunun önemini göstermek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

3.2.2 Deneysel çalışmalar

3.2.2.1 Mikrodalga ısıtma ve çözdürme prosesine basıncın etkisi

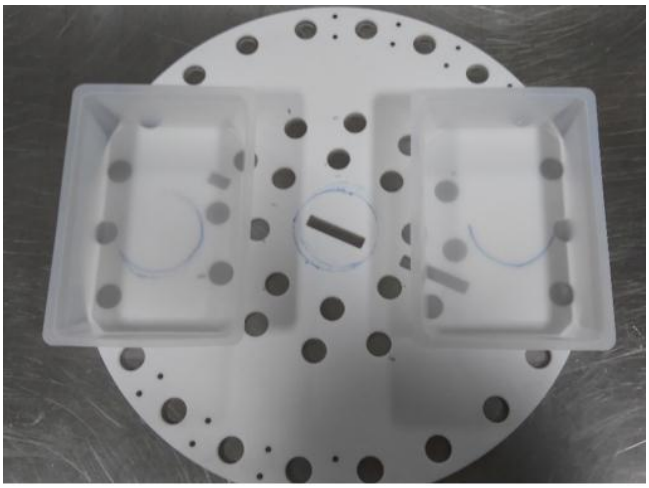
Bölüm 3.1.1'de detaylı olarak açıklandığı şekilde bu çalışmada kullanılan mikrodalga sistemde 4 bara kadar bir basınç oluşturulabilmektedir. Ancak, 4 bar basınç uygulamasında şekil 3.13'de görüldüğü gibi proses süresince sistem içindeki basınç 4 bara ulaşamamaktadır. Bu süreçte ürün sıcaklığında yükselme gözlendiğinden ön denemelerle belirlenen ve dengeye gelme süresi uygun olan 2 bar basınç uygulaması kullanılarak basıncın MW ısıtma ve çözdürme prosesine etkisi belirlenmiştir. Bu çalışmalarda ürün döner tablanın merkezine yerleştirilmiş ve dönme hareketi uygulanmadan ürün sıcaklık değişimleri hem çözdürme hem de ısıtma deneylerinde kaydedilmiştir. Daha sonra MW uygulamanın basınç altında gerçekleştirilmesi sürecinde belirlenen ürün sıcaklık değişimleri basınç uygulanmayan koşullarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13 MW sistemde proses sırasında sistem içinde 4 bar basıncı ulaşma süresi

3.2.2.2 Dondurulmuş morina balıklarının mikrodalga uygulama ile çözdürülmesi

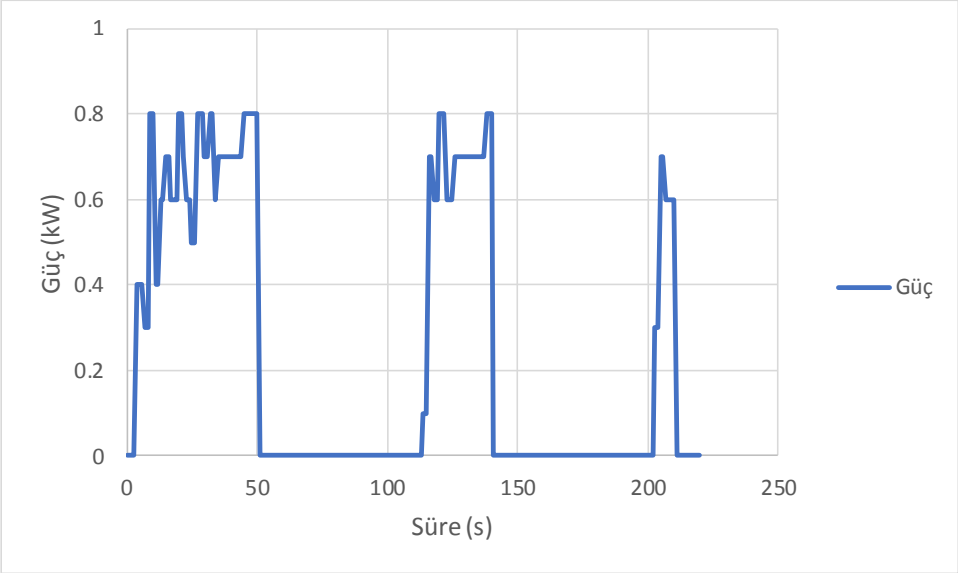
Çalışmanın son aşamasında tekil olarak dondurulmuş Morina balıklarının MW uygulaması ile çözdürme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmalarda önce döner tabla merkezinde tek bir ürün, dönme hareketi uygulamadan kullanılmıştır. Daha sonra, iki adet örnek tabla merkez noktası sağ ve sol tarafına merkezden eşit uzaklıkta (Şekil 3.14) yerleştirilmiş ve dönme hareketi uygulanarak çözdürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ürün yüzey sıcaklık değişimleri proses sonrasında termal kamera kullanılarak belirlenmiştir. Bu deneylerin ikinci bölümünde, daha önce gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları temelinde, hem merkez dışında dönme etkisiyle kavite içerisinde oluşan elektromanyetik enerjiden homojen bir şekilde yararlanarak üründe daha homojen bir sıcaklık dağılımının elde edilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.14 Morina balıklarının MW sistemin tabla üzerindeki konumları

Çalışmanın bu aşamasına kadar bütün deneyler 1 kW güç uygulamasında, şekil 3.3'de gösterilen güç değişimi koşullarında gerçekleştirilmiştir. Morina balıklarının çözdürme çalışmalarında sıcaklık artışı ve buna bağlı olarak da dielektrik özelliklerde meydana gelen artışa bağlı olarak ürün içerisindeki ısı transferinin de homojen edebilme özelliğinden yararlanmak amacıyla dur – kalk'lı bir güç döngüsü de uygulanmıştır (Şekil 3.15). Çözdürme işleminin tamamlanmasından sonra ürün sıcaklık dağılımının

homojen olması amacıyla ürünler +4 °C'de maksimum 5 saat depolanmış ve depolama sürecinde de sıcaklık değişimleri takip edilmiştir.



Şekil 3.15 MW sistemde kullanılan bir dur-kalk güç döngüsü

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

MW uygulamanın bir gıda prosesinde uygulanması, optimal proses koşullarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak proses tasarımın gerçekleştirilmesi genel olarak deneme – yanılma yöntemi ile yapılmaktadır. Bu durum hem proses öncesi tasarım için gerekli araştırma maliyetlerini yükseltmekte hem de önemli bir zaman kaybına neden olmaktadır. MW uygulamada ürün içi sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi, tekdüze bir sıcaklık dağılımının elde edilememesi ve ürün soğuk nokta – bölgesinin deneysel çalışmalarla belirlenmesindeki güçlükler gıda güvenliği sorunlarına yol açabilmektedir. Ayrıca, sistem içi elektrik alan dağılımına bağlı olarak ürünün sistemde yerleştireceği konum da sıcaklık dağılımını direkt olarak etkilemektedir. Genel olarak tercih edilen döner tabla kullanımında, döner tabla merkezinin tercih edilmesi, ürün hareket sırasında sürekli olarak aynı bölgedeki elektrik alana maruz kaldığından, ürün sıcaklık dağılımına beklendiği şekilde bir etki yapmamaktadır. Ürün sıcaklık değişimi ve dağılımında ortaya çıkan problemlere bağlı olarak, özellikle de gıda güvenliği açısında, bazen gereğinden fazla MW ile ısıl işlem uygulaması tercih edilmektedir. Buna bağlı olarak, ürün kalite kayıpları yaşanmakta ve proses maliyeti artmaktadır. Çözdürme işlemlerinde ise ürün içi sıcaklık dağılımı, ısıtma uygulanan örneklere göre daha kötü olduğundan (ürünün çözünmeye başlayan bölgeleriyle buzun dielektrik özellikleri arasındaki önemli farka bağlı olarak) proses sonrası uygulanan soğuk koşullarda depolama işlemi gereğinden fazla uygulanmakta bu durum da MW uygulama ile kazanılan prosesin kısaltılmasından elde edilen sürecin tekrar uzamasına neden olmaktadır.

Belirtildiği gibi, bir MW uygulama prosesinin verimli ve etkin bir şekilde kullanılabilmesi için öncelikle sistem içi elektromanyetik alan dağılımı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ürün sıcaklık değişimin belirlenmesi gerekmektedir. Prosese özel simülasyonların proses tasarımı amacıyla kullanılabilmesi için ise öncelikle ilgili proses için matematiksel modelin geliştirilmesi ve bu modelin deneysel olarak doğrulanması en uygun yaklaşım olarak kabul edilmektedir (Knoerzer vd. 2008, Erdoğdu vd. 2017). Bu tez çalışmasında kullanılan MW sistemin ısıtma ve çözdürme proseslerinde etkin olarak kullanılabilmesi amacıyla öncelikle bir matematiksel model geliştirilmiş ve bu

model deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu model Comsol çoklu fizik **(**Comsol AB, Stockholm, Sweden) programı kullanılarak geliştirilmiş; sistem – kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı ve bu dağılımın ürün sıcaklık değişimine etkisi belirlenmiş ve sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Deneysel doğrulama çalışmalarında, bir önceki bölümde açıklandığı şekilde önce Tylose (%77 su içeriğinde) kullanılarak sistem içerisinde yer alan döner tablanın merkez ve merkez dışı bir konumunda, tablanın döndüğü ve dönmediği koşullarda ısıtma ve çözdürme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Fiber optik problar kullanılarak noktasal ve kızılötesi kamera kullanılarak yüzeysel olarak elde edilen sıcaklık verileri, model doğrulama çalışmaları kapsamında, model sonuçları işe karşılaştırılmıştır. Sistem kavitesi içerisinde oluşturulan 2 barlık basıncın Tylose ısıtma ve çözdürme prosesinde sıcaklık değişimine etkisi ayrıca incelenmiş ve MW çözdürme prosesi dondurulmuş morina balıklarının çözdürülmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

4.1 Tylose Isıl İşlem Uygulaması ve Deneysel Doğrulama çalışmaları

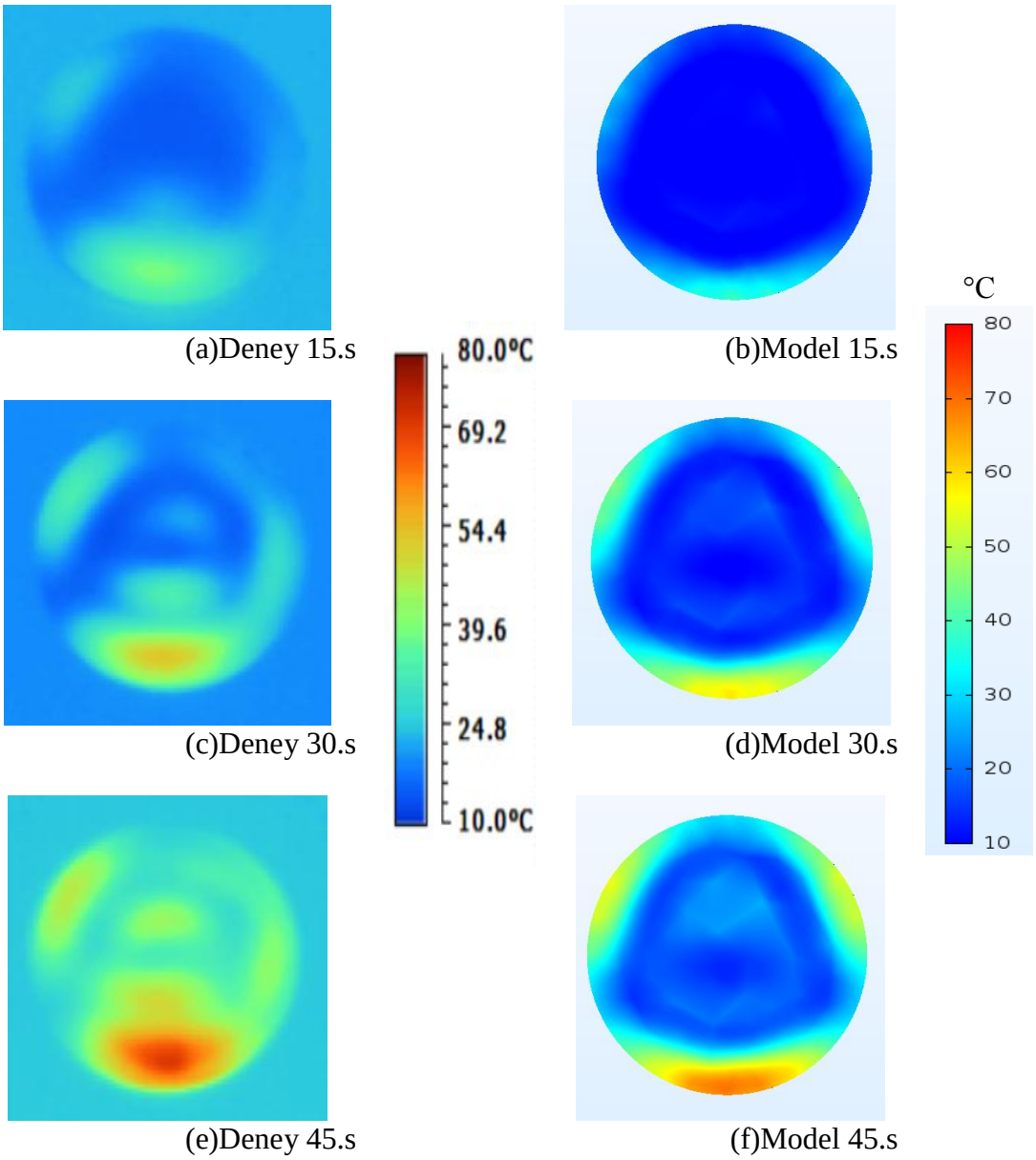
4.1.1 MW uygulama ile ısıtma çalışmaları

4.1.1.1 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durum

Silindirik silika cam erlen içerisinde bulunan Tylose örneği sistem içerisinde yer alan döner tabla merkez konumuna yerleştirilmiş ve şekil 3.5 konum ve yerleri belirtilen noktaların 4 tanesi kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Ek 1 Şekil 1). Deneysel verilerin model sonuçları ile karşılaştırılmasında 3-deney sonucunun ortalaması ve standart sapma değerleri kullanılmıştır. 45 s süren deneysel çalışmalarda fiber optiklerden alınan veriler proses sürecinde her saniyede kaydedilmiştir.

Sistem içerisinde yer alan tablaya dönme işleminin uygulanmadığı ve Tylose örneğinin tabla merkezine yerleştirilerek gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarının ikinci bölümünde yüzey sıcaklık değişimi 15, 30 ve 45 saniye proses edilen farklı Tylose

ürünlerin kızıl ötesi kamera kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar yine model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1 matematiksel model sonuçları ile deneysel verilerin ürün yüzey sıcaklık değişimi kapsamında karşılaştırmasını göstermektedir. EK 1 şekil 1, şekil 4.2'de matematiksel model sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu oldukları görülmektedir. Şekil 4.3'de ise geliştirilen matematiksel modelden elde edilen, ürün üst yüzey ve bu sistemin (z=1.25 cm) kesitindeki elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Gözlendiği gibi, ürün üst yüzeyinin alt bölgelerinde önemli bir elektrik alan yoğunlaşması olmaktadır. Buna bağlı olarak da bu bölgelerde önemli bir sıcaklık artışı ortaya çıkmaktadır. MW uygulamaları, literatürde ürüne hacimsel ısınma sağlamaları ve buna bağlı olarak, konvansiyonel sistemlere göre, üründe tekdüze sıcaklık dağılımı sağlayabilen sistemler olarak kabul edilse de EK 1 şekil 1, şekil 4.2'de gözlendiği gibi ürün yüzeyi (verilen görüntü açısına göre alt bölgelerinde) ve ürün içerisinde, elektrik alan odaklanmasına bağlı olarak (Şekil 4.3) önemli bir sıcaklık artışı olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği koşullarda ürün yüzeyi merkezinde elektrik alan odaklanması gerçekleşmediğinden bu bölgede sıcaklık artışının sınırlı olduğu açıkça gözlenmiştir. MW uygulamalarda bu olumsuz durumun çözülebilmesi ve ürün sıcaklık değişiminin tekdüze olarak elde edilebilmesi için ürüne sistem içerisinde döner bir hareket verilmesi genel olarak kullanılan bir yaklaşımdır.



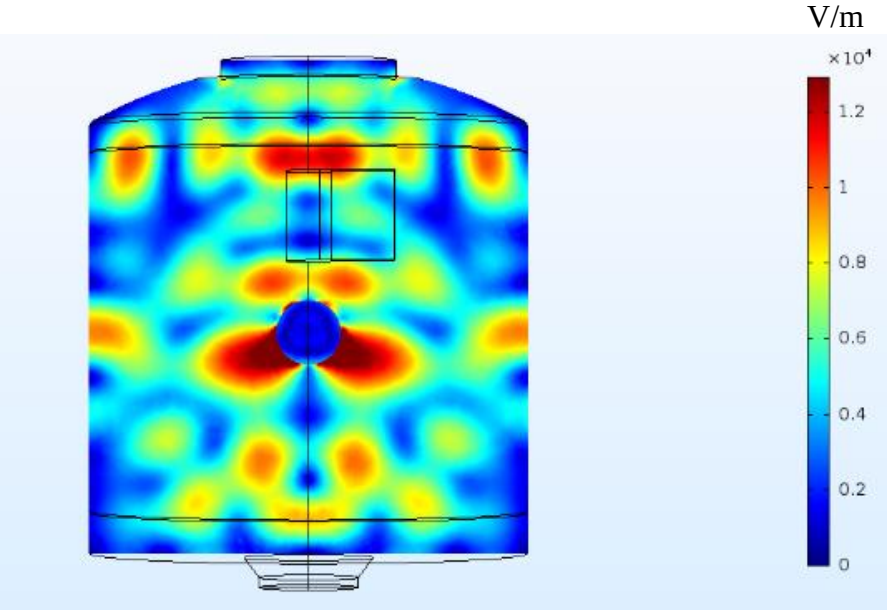
(a)Deney 15.s (b)Model 15.s

(c)Deney 30.s (d)Model 30.s

(e)Deney 45.s (f)Model 45.s

Şekil 4.1 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

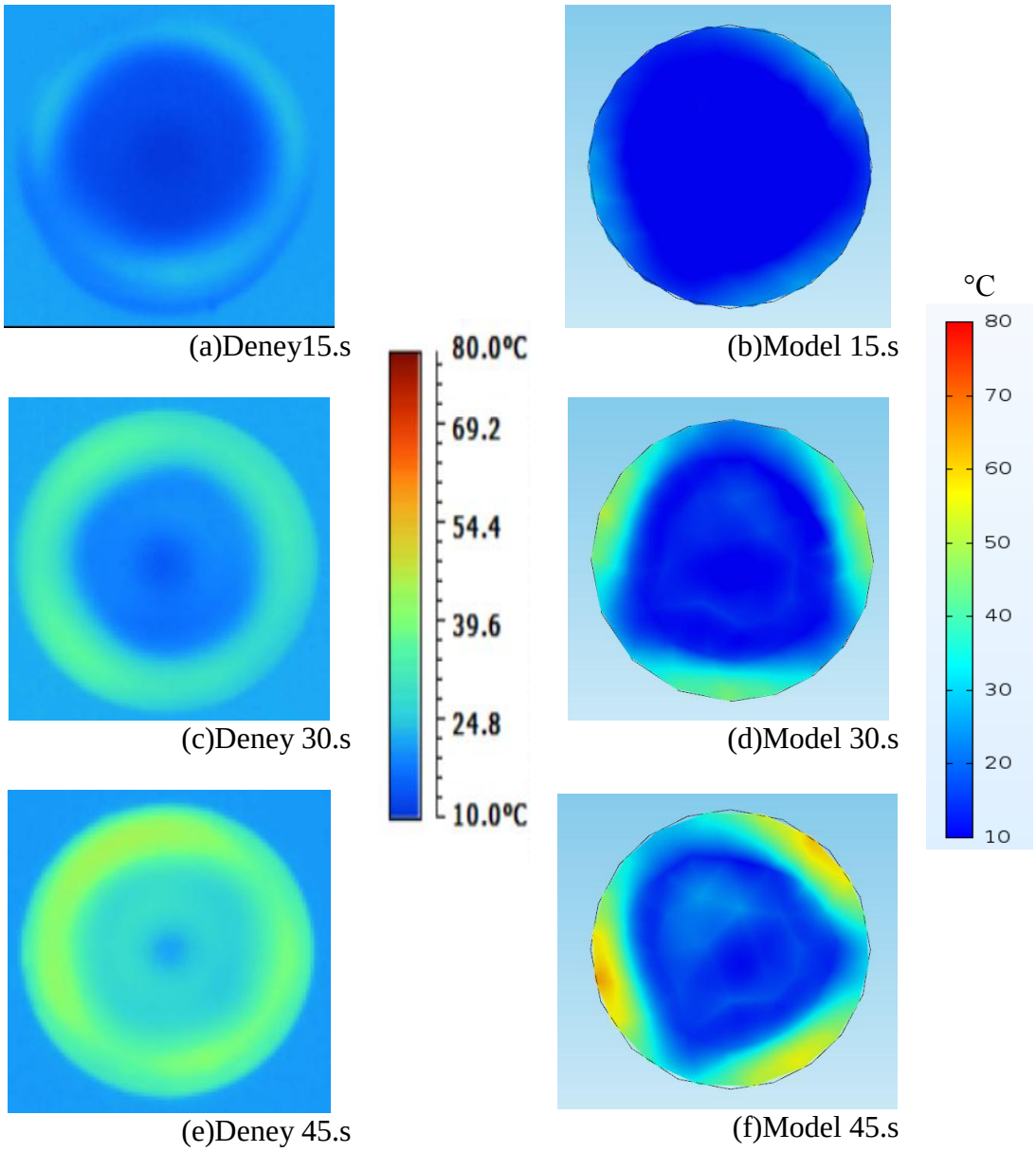
(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)



Şekil 4.2 Tylose merkezde dönme etkisinin olmadığı durumda kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımı (z=1.25)

4.1.1.2 Merkezde dönme işlemi uygulanan durum

Dönme uygulanmayan çalışmalarda, mikrodalga kavite içerisinde oluşan ve homojen olmayan elektromanyetik alan dağılımına bağlı olarak, sistem içerisinde döner tabla merkezinde bulunan ürün yüzeyinde sıcak ve soğuk noktaların oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle, tablaya uygulanacak dönme hareketi ile elektromanyetik alan yoğunluğunun ürün yüzeyi ve içerisinde daha tekdüze olarak dağılmasının sağlanması ve model sonuçlarının bu koşullarda da doğrulanması hedeflenmiştir. Döner tabla merkezine yerleştirilen ürüne uygulanan dönme hareketi (sistem içerisinde gerçekleşen dönme prosesinin tanımı Materyal ve Yöntem bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır) uygulaması sırasında ürün içerisinde 4 – farklı noktada gerçekleştirilen sıcaklık değişim sonuçları matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır (EK 1 Şekil 2). Dönme hareketi sırasında fiber optik probların dolaşmasını ve birbirleri ile etkilerini azaltabilmek amacıyla her deneyde 2 fiber optik kullanılmış ve her deneyde iki noktadan ölçüm gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında ürün üst yüzeyinin 15, 30 ve 45 saniyelerde farklı Tylose ürünlerinin prosesinden sonra kızıl ötesi kamera kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımlarının model sonuçları ile karşılaştırılması ise şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Merkezde dönme işlemi uygulanan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

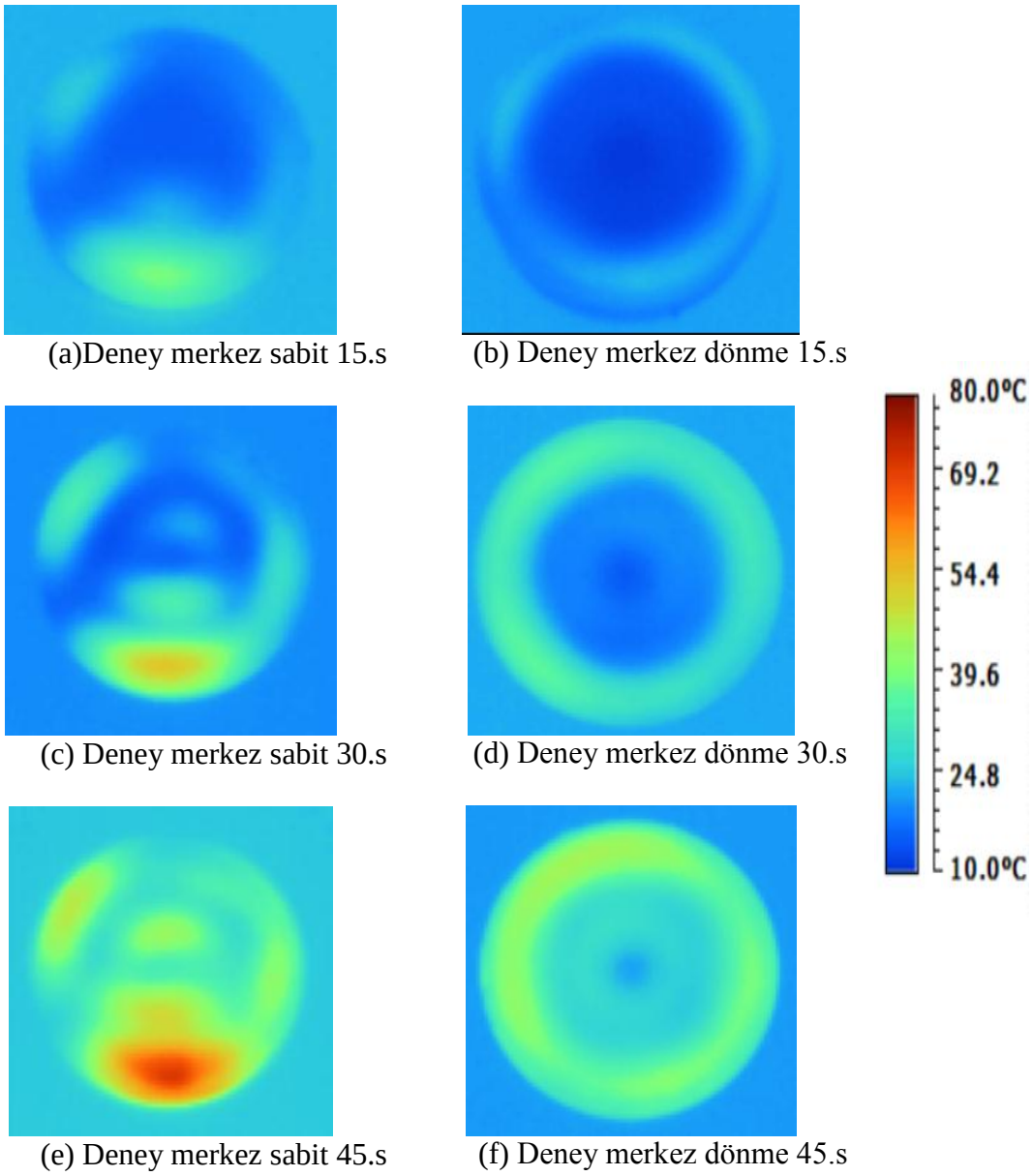
(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)

Dönme hareketinin uygulandığı simülasyon çalışmalarında ürün dönme hareketinin sabit olduğu, önce 330 ° saat yönünde gerçekleşen dönmenin daha sonra yine 330 ° saat tersi yönde gerçekleştiği ve bu şekilde yön değiştirerek devam ettiği daha önce açıklanmıştı. Deneysel çalışmalar sırasında, sistem tasarımına bağlı olarak dönme

hareketi sırasında olan saat yönü ve saat tersi yönüne geçişlerde olması gereken azalan hız bölgesinin ne kadar sürdüğü ise, sistemde uygulanan dönme prosesi tasarımından dolayı belirlenememiştir. Dönüş yönünün değişmesi anında gerçekleşen durma aralıklarının çok kısa geçiş süreleri olsa da her geçiş aşamasında değiştikleri deneyler sırasında gözlenmiştir. Bu nedenle, model çalışmalarında dönme hızının sabit olduğu (3.67 rpm) ve ilk dönme tamamlandıktan sonra hemen akabinde, bir bekleme süresi olmadan, ikinci dönme hareketinin başladığı ve bu işlemin proses süresince bu şekilde devam ettiği varsayımı yapılmıştır. Aynı zamanda proses sırasında kavite içerisinde bulunan tablanın tamamı dönmektedir, ancak matematiksel model bölümünde de açıklandığı gibi kullanılan bilgisayarın RAM kapasitesi yetmediği için proses sırasında sadece ürünün döndüğü yaklaşımı kullanılmıştır. Bu simülasyonlarda RAM ihtiyacının 96 Gbyte'dan daha yüksek olarak belirlenmiş, bu nedenle tabla ve tabla altında elektromanyetik alan dağılımını homojenize etmek amacıyla kullanılan 4-metal yüzeyin, ürüne dönme hareketi uygulanırken, sabit kaldıkları yaklaşımı uygulanmıştır. Bu nedenle, 4 metal yüzeyin dönme hareketinin olduğu deneylerde kavite içerisindeki elektromanyetik alan dağılımına etkisi matematiksel modellerde kullanılamamıştır. Ayrıca, sistemin dönüş hareketinin giderek hızlandığı ve bir tur sonunda geri dönüş hareketine başlamadan belli bir duraklamanın olabileceği bölümler, bu kapsamda bir veri elde edilemediğinden ve deneysel olarak hareket hızı ve dur – kalk bölgeler arası geçişler zamana bağlı olarak ölçülemediğinden yok sayılmıştır. Bu durum simülasyon sonuçlarını etkilemiş olup, şekil 4.2'de gösterilen elektriksel alan dağılımına bağlı olarak ürün üst ve yan yüzeylerinin deneysel sonuçlara göre, daha fazla elektrik alana maruz kaldığı ve ısındığı görülmektedir. Ayrıca, kızılötesi kamera kullanılarak yüzey sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi aşamasında, bu ölçüm sistem içerisinde gerçekleştirilemedeğinden, örneklerin sistem dışına alınması ve ölçüm gerçekleştirilene kadar geçen sürede meydana gelen soğuma etkisi simülasyonlarda kullanılamamıştır. Belirtildiği gibi dönme etkisi de simülasyonlara tam olarak yansıtmadığından şekil 4.3'de gözlenen ve deneysel olarak daha tekdüze elde edilen sıcaklık dağılımı değerleri, örneği sabit durduğu ve noktasal sıcaklık ölçümlerinin alındığı verilere göre model sonuçlarında bire bir elde edilememiştir. Bu durum, aşağıda da açıklanan bütün dönme simülasyonlarında gözlenmiş olup, sistem tasarımı kapsamında daha güçlü iş istasyonları kullanılarak bu çalışmaların kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Tylose'un sistem içerisinde döner tabla merkezinde dönme hareketi uygulanmadan ve uygulanarak gerçekleştirilen deneylerden edilen sonuçlara göre ürün yüzey sıcaklık karşılaştırılması şekil 4.4'de gösterilmiştir. Uygulanan dönme işlemi ile, dönme işlemi uygulanmayan durumdaki elektrik alanın ürün yan yüzeylerinde odaklanmasının önüne geçilebildiğinden ve dönme ile yan ve üst yüzeylerine eşit şekilde elektrik alana maruz kalmasından dolayı ürün yüzeyinde daha homojen bir sıcaklık profili elde edilmiştir ve istenmeyen sıcaklık yükselmelerinin de önüne geçilebilmiştir. Bu sonuçlar, MW uygulamada ürün sıcaklık dağılımının tekdüze olması ve yüksek sıcaklık artışlarının önlenmesi konusunda ürüne uygulanan dönme hareketinin önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu konuda literatürde de farklı çalışmalar bulunmaktadır. Geedipalli vd. (2007) ANSYS programını kullanarak ev tipi mikrodalgada sistemlerde kullanılan dönme hareketinin ürün sıcaklık değişimine etkisini göstermişlerdir. Bu çalışmada elde edilen, dönme hareketinin olmadığı ve dönme hareketinin olduğu durumlarda ürün yüzey sıcaklık dağılımı şekil 4.5'de görülmektedir. Aynı zamanda ürün içerisi maksimum sıcaklık artışına da dönme hareketinin önemli bir etkisi olduğu bu çalışma kapsamında belirlenmiştir (Şekil 4.5b).

Benzer olarak, geliştirilen ve doğrulanan matematiksel model kullanılarak dönme uygulanan ve uygulanmayan durumlarda ürün yüzey – hacim ortalama -maksimum sıcaklık ve ürün tarafından absorbe edilen güç değeri değişimleri ek 2 şekil 1'de gösterilmektedir. Gözlendiği gibi merkezde yer alan ürüne uygulanan dönme işlemi sonucunda deneysel verilere göre sıcaklık dağılımının ürün yüzeyinde görsel olarak (Şekil 4.4) daha homojen olduğu gözlense de sayısal olarak şekil 4.5'de gösterildiği gibi bir iyileştirme geçekleşmemiştir. Bu durum sistem içi elektrik alan dağılımı ile ilgili olup, sistem tasarımına bağlı olarak sistem içerisinde ev tipi mikrodalga fırınlara göre daha homojen bir elektrik alan dağılımının oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, ürünün sabit olduğu ve dönme işleminin uygulandığı durumlarda ürün tarafından absorbe edilen güç miktarının da benzer olması (EK 2 Şekil 2d) ürün sıcaklık değişimlerinin de benzer olmasını etkilemiştir.



(a)Deney merkez sabit 15.s (b) Deney merkez dönme 15.s

(c) Deney merkez sabit 30.s (d) Deney merkez dönme 30.s

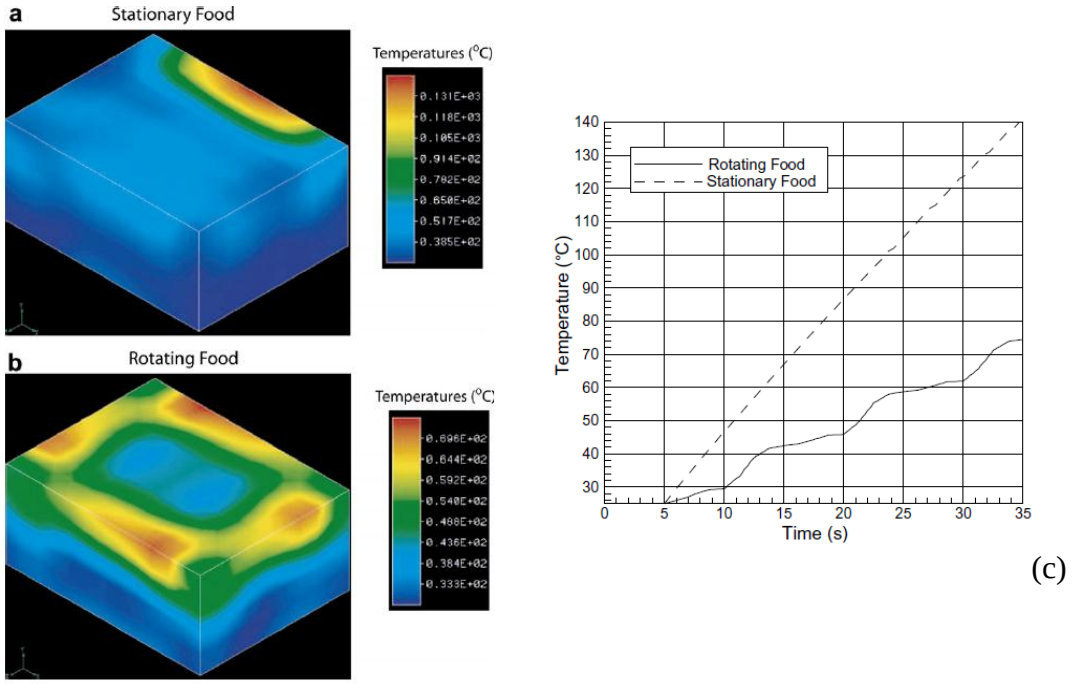
(e) Deney merkez sabit 45.s (f) Deney merkez dönme 45.s

Şekil 4.4 Merkezde dönme işlemi uygulanan ve uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

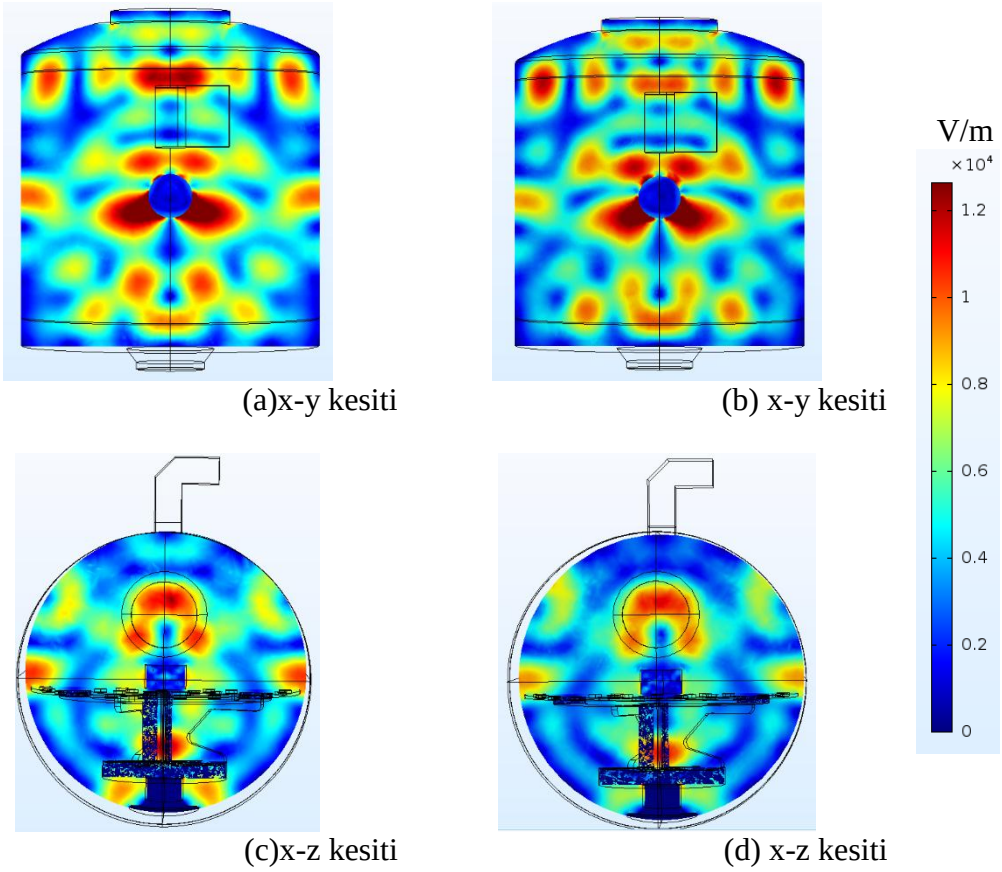
(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki merkez – sabit sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki merkez – dönme sonuçları)

Şekil 4.6.a,b,c,d dönme uygulanan ve uygulanmayan durumlarda ürünün iki ayrı kesitinde (x-y ve x-z kesitlerinde) gerçekleşen elektrik alan dağılımını ve dönme uygulanmayan duruma göre sistemde kullanılan güç miktarı değişimini (Şekil 4.6e) göstermektedir. Dönme uygulanan durumda daha düşük seviyede gerçekleşen güç uygulama oranlarında bağlı olarak, ürün yüzey sıcaklık ortalaması, hacimsel sıcaklık

ortalaması ve maksimum sıcaklık değeri değişimleri dönme uygulanmayan duruma göre daha düşük çıksa da sonuçlar arasında önemli bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır (EK 2 Şekil 1.a,b,c). Bu durum ürün tarafından absorbe edilen güç oranı ile direkt ilişkili olup EK 2 şekil 2.d'de ise bu iki durum için ürün tarafından proses süresince absorbe edilen güç miktarı değişimi gösterilmektedir. Merkez – dönme durumunda ürünün absorbe ettiği güç proses sırasında kaviteye gelen güç miktarı salınım göstersede iki durum için önemli bir fark ortaya çıkmamıştır.



Şekil 4.5 Ev tipi mikrodalgada ürünün merkezde sabit ve dönme etkisinin ANSYS modelleme 35. saniyedeki ürün yüzey sıcaklık dağılımı (a-b), üründeki maksimum sıcaklık değişimini (c) (Geedipalli vd. 2007)

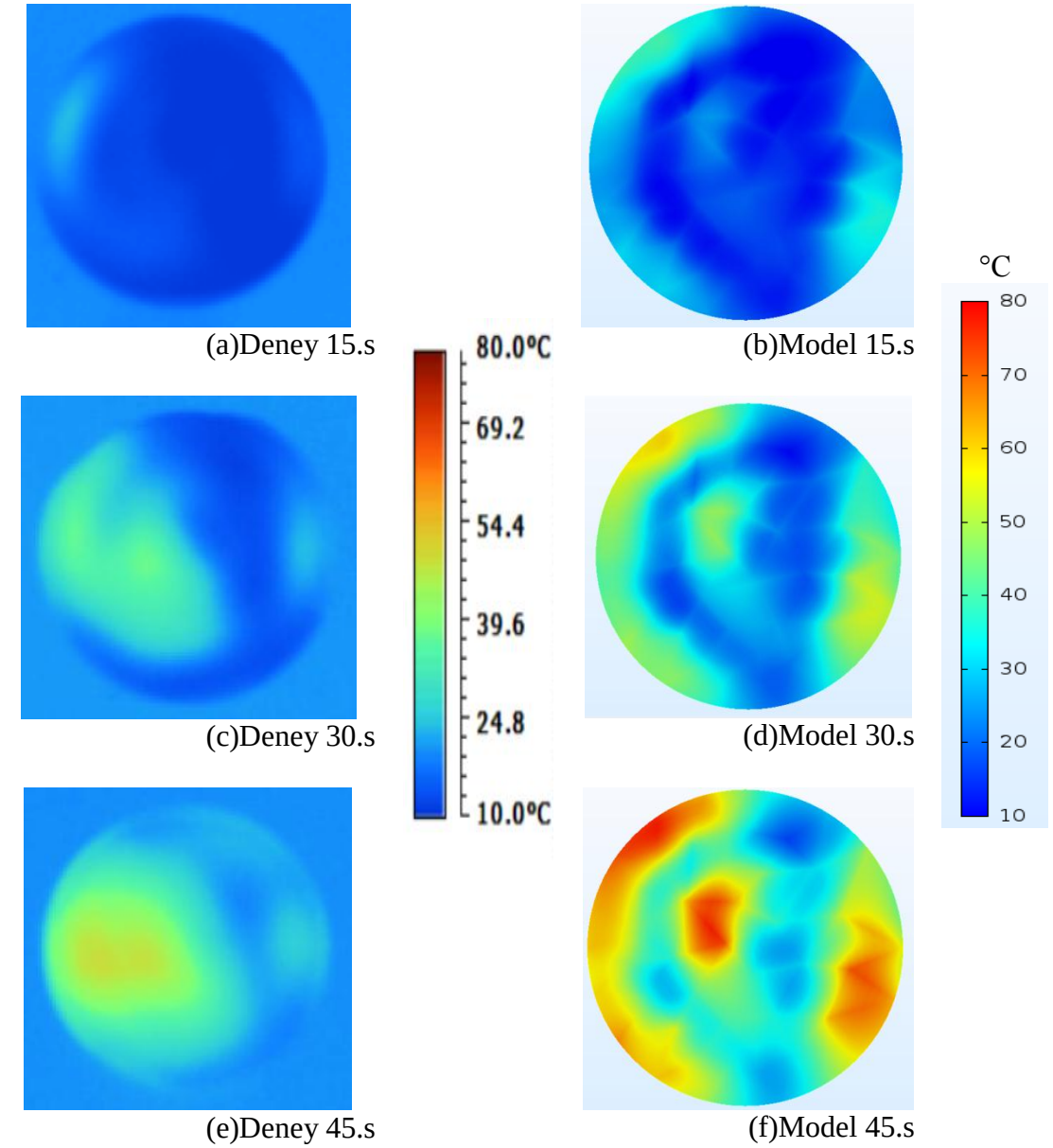


Şekil 4.6 Merkez – sabit ve merkez – dönme matematiksel modellerinde kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alan karşılaştırılması

(a) merkez – sabit (x-y; z=1.25),(b) merkez – dönme (x-y; z=1.25), (c) merkez – sabit (x-z; y=0), (d) merkez – dönme (x-z; y=0), (e) model süresi boyunca kaviteye gelen güç miktarı karşılaştırılması

4.1.1.3 Sistem merkezi dışında dönme işlemi uygulanmayan durum

Kavite içerisindeki elektromanyetik alan yoğunluğuna (Şekil 4.9.a,b,c,d) bağlı olarak farklı konumlarda ürün sıcaklık değişiminin farklı olması beklenmektedir. Ürünün MW sistem içerisinde merkez dışı bir konumda bulunması durumunda ürün sıcaklık profiline etkisini belirlemek için Tylose sistem içerisinde döner tablanın şekil 3.6.b'de gösterilen konumuna yerleştirilmiş ve bu kapsamda deneysel ve matematiksel model çalışmaları tekrarlanmıştır. Deneysel veriler ile model doğrulama çalışmalarında, şekil 3.5'de konum ve yerleri belirtilen noktaların yine 4 tanesi kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmıştır (EK 1 Şekil 3). Her nokta içim 3-deney sonucunun ortalaması ve standart sapma değerleri kullanılmış ve 45 s sürecinde model sonuçları ile karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Kızılötesi kamera kullanılarak 15, 30 ve 45 s'de yapılan yüzey sıcaklık ölçümleri de yine model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. EK 1 şekil 3, şekil 4.7'de gözlendiği şekilde matematiksel model sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu oldukları görülmektedir.



Şekil 4.7 Merkez dışında dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)

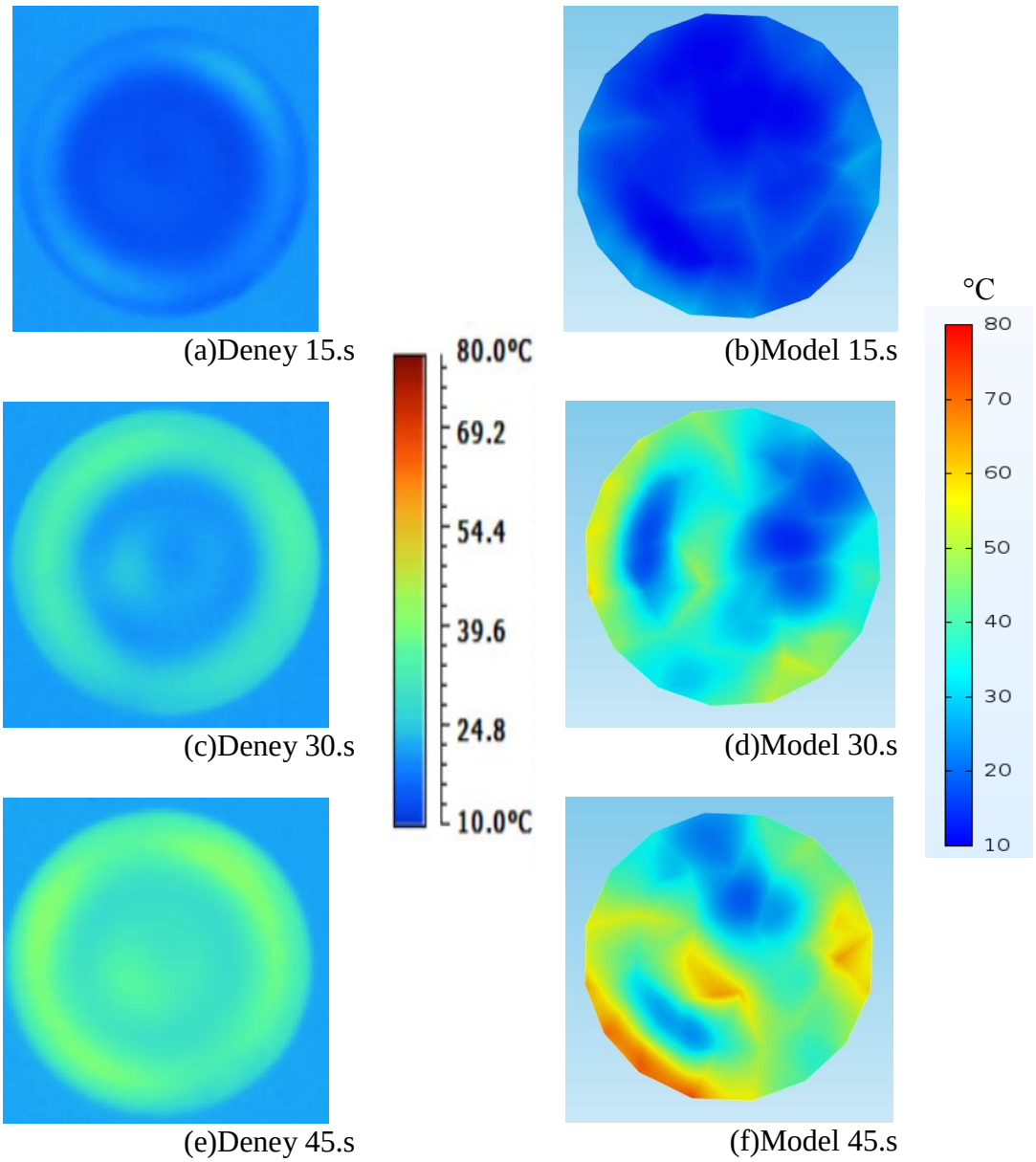
Ürünün MW sistem içerisindeki konumunun ürün sıcaklık dağılımına etkisini karşılaştırmak için merkez – sabit ve merkez dışı – sabit konumlarda dönme hareket, olmayan matematiksel modellerde Tylose'un yüzey, hacim sıcaklık ortalaması ve üründe ulaşılan maksimum sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır (EK 2 Şekil 2.a,b,c). MW sistemlerde ürünün bulunduğu konumun ürün sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir şekilde etkili olduğu bilinmektedir. Ürün tarafından proses sırasında absorbe edilen güç değerlerindeki değişim merkez dışı durumda ürünün daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasını açıklamaktadır (EK 2 Şekil 2.d). Merkez – dışı sabit durumda ürün tarafından absorbe edilen güç değerinin 30. saniyedeki düşüşü ise kaviteye gelen güçteki düşüşle ilişkilendirilmiştir (EK 2 Şekil 2.d).

4.1.1.4 Merkez dışında dönme işlemi uygulanan durum

Sistem merkezine yerleştirilen ürün sıcaklık değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen çalışmalara benzer şekilde, ürünün sistem merkezi dışında bir konumda bulunması durumunda dönme prosesi uygulamasının da ürün sıcaklık değişimine etkisini belirlemek amacıyla deneysel ve matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda fiber optiklerin birbirine karışması ve zarar görmeleri ihtimalinden dolayı bu durumda sadece kızılötesi kamera kullanılarak elde edilen ısıl görüntüler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda üst yüzey sıcaklığı 15, 30 ve 45 saniye proses edilen farklı Tylose'lardan elde edilen kızıl ötesi kamera görüntüleri ve matematiksel model sonuçları ile karşılaştırılmaları şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Ürünün sistem merkezi ve merkez dışı konumlarında dönme hareketi uygulanması sonucu elde edilen yüzey sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması ise şekil 4.9'da gösterilmiştir. EK 2 Şekil 3.a,b,c'de ise ürünün merkez ve merkez dışında konumlanması durumunda uygulanan dönme hareketinin ürün yüzey, hacim ortalama ve maksimum sıcaklık değişimine etkisini göstermektedir. Gözlendiği şekilde merkez dışı konumda bulunan ürün sıcaklık değişimleri merkez konumdaki ürüne göre daha hızlı yükselmiştir. Bu durum merkez konum dışında bulunan ve dönme etkisi altındaki ürünün daha uzun süre daha yoğun elektromanyetik alandan geçişi ile açıklanmıştır. Merkez dışı – dönme durumu için geliştirilen matematiksel model sonuçlarında ise

öngörüldüğü gibi ürünün MW sistem içerisinde proses sırasında hacimsel olarak yer değiştirmesinden dolayı ürün tarafından merkez – dönme durumuna göre daha fazla güç absorbe edilmiştir (EK 2 Şekil 3.d).



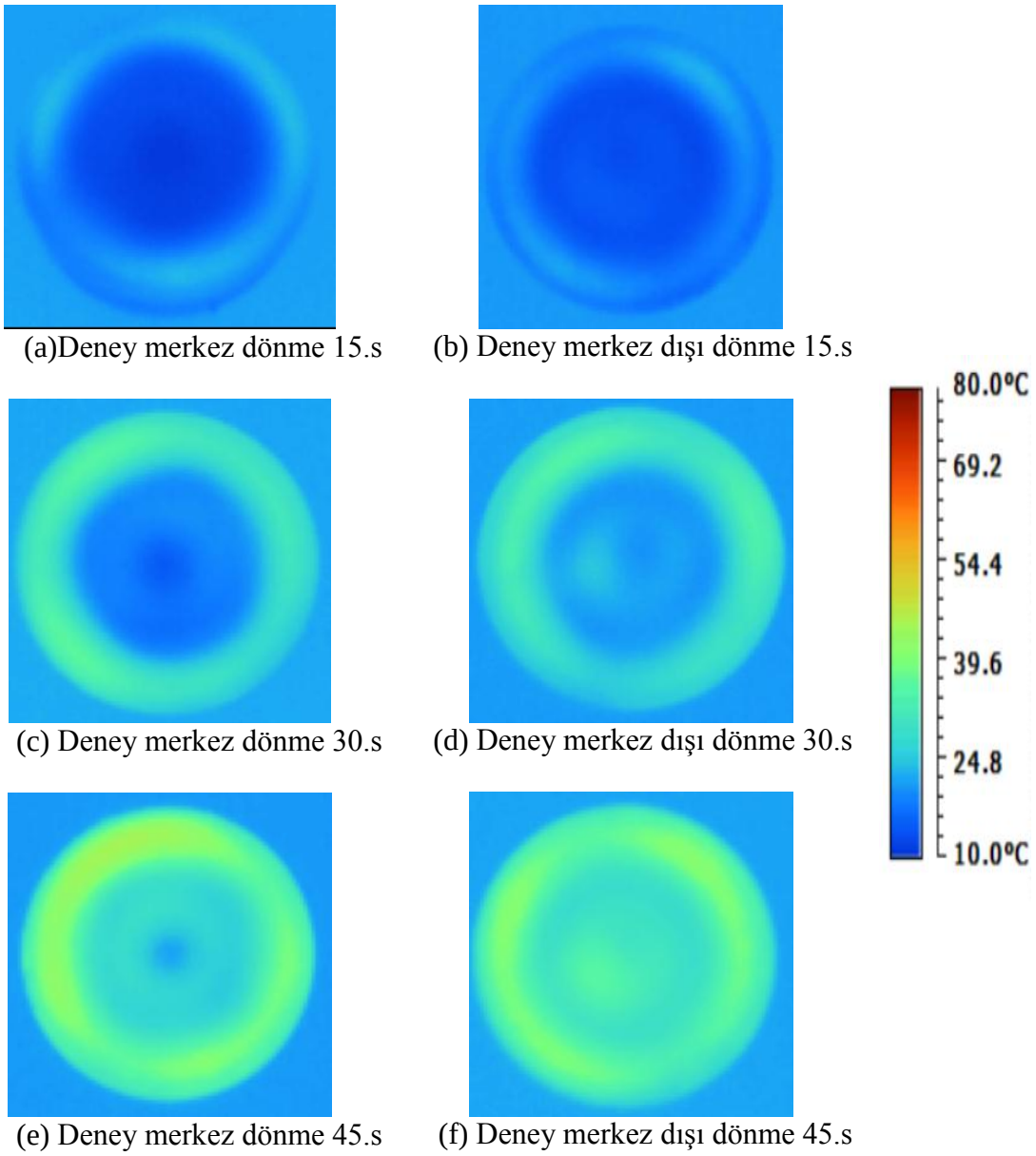
(a)Deney 15.s (b)Model 15.s

(c)Deney 30.s (d)Model 30.s

(e)Deney 45.s (f)Model 45.s

Şekil 4.8 Merkez dışında dönme işlemi uygulanan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)



(a)Deney merkez dönme 15.s (b) Deney merkez dışı dönme 15.s

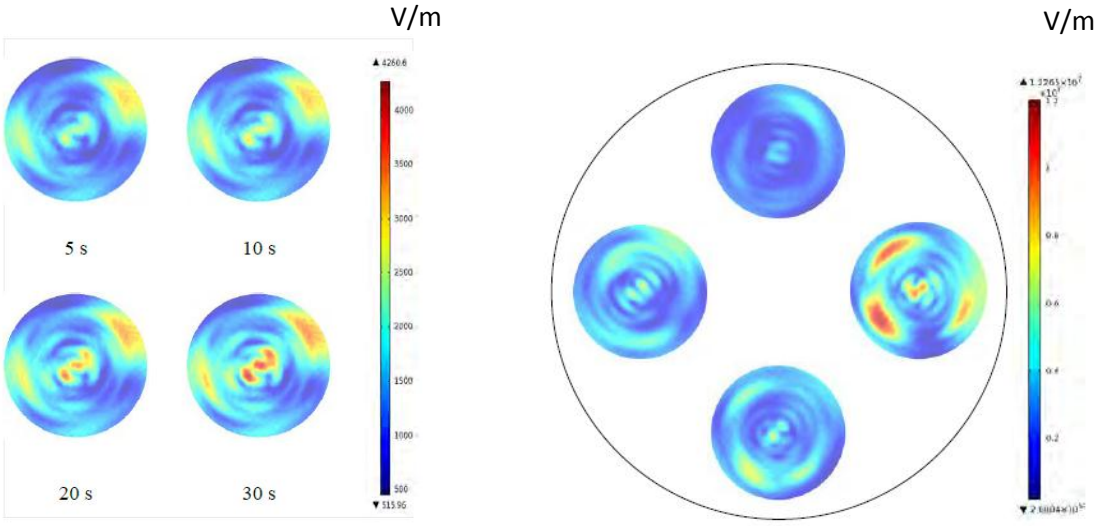
(c) Deney merkez dönme 30.s (d) Deney merkez dışı dönme 30.s

(e) Deney merkez dönme 45.s (f) Deney merkez dışı dönme 45.s

Şekil 4.9 Merkez dışında dönme işlemi uygulanan ve uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – sabit sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – dönme sonuçları)

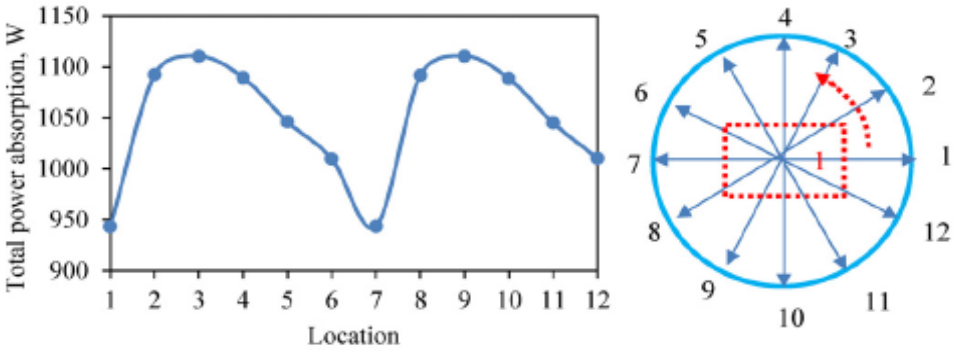
Dönme etkisinin ürün sıcaklık değişimine etkisinin gösterilmesi konusunda Raj vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada Comsol V4.2'de hareketli yağ yapısı kullanılarak bir matematiksel model gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada merkez dışı dönme kapsamında, ürüne sürekli bir dönme hareketi yerine kesikli bir dönme hareketi uygulanmış ve ürünün dairesel hareket sırasında farklı zamanlarda farklı konumlarda olduğu varsayımı yapılmıştır (90 °'lik hareket uygulaması ile 4 konumlamada dairesel hareket tamamlanmıştır). Bu çalışmada merkezde dönme hareketinin ürün içi elektrik alana etkisi olmadığı ancak merkez dışında konumlandığında dönme etkisiyle ürünün hacimsel yer değiştirmesi sonucu ürün içinde oluşan elektromanyetik alanın değiştiğini ve bu değişimin ürün sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olacağını göstermişlerdir. (Şekil 4.1). Bu tez çalışmasında da merkez ve merkez dışında dönme etkisiyle yapılan matematiksel modellerde ürün tarafından absorbe edilen güç değerleri ürün konumunun değişmesi durumunda maruz kaldığı elektromanyetik alan farklılık gösterdiğini kanıtlamaktadır (EK 2 Şekil 3.d).



Şekil 4.10 Ev tipi mikrodalgada ürün merkez – dönme a.ve merkez dışı – dönme, b. matematiksel modellerinde ürün içindeki elektromanyetik alan değişimi (Raj vd. 2011)

Chen, vd. (2016)'da dondurulmuş 550 g püre patatesi 1250 W güç ile 6 dakikalık prosesinin matematiksel modellemesini yapmışlardır. Proses sırasında merkezde dönme hareketini 12 harekette tamamlayan MATLAB programı ile yapmışlardır. Her pozisyon

da ürünün toplam absorbe ettiği enerji miktarını çalışmalarında göstermişlerdir (Şekil 4.11). Dönme hareketinin etkisiyle ürün farklı elektromanyetik alana maruz kalmaktadır bu yüzden ürünün toplam absorbe ettiği enerji değişmektedir. Ürün mikrodalga sistemin merkezinde, kendi etrafında dönme hareketini gerçekleştirdiği için ürün 180 ° dönüp aynı pozisyona geldiğinde benzer bir enerji absorbe etmektedir.



Şekil 4.11 Ev tipi mikrodalgada dondurulmuş patates püresinin merkez – dönme matematiksel modelinde ürünün absorbe ettiği güç ve dönme hareketinde kullanılan konumlar (Chen vd. 2016)

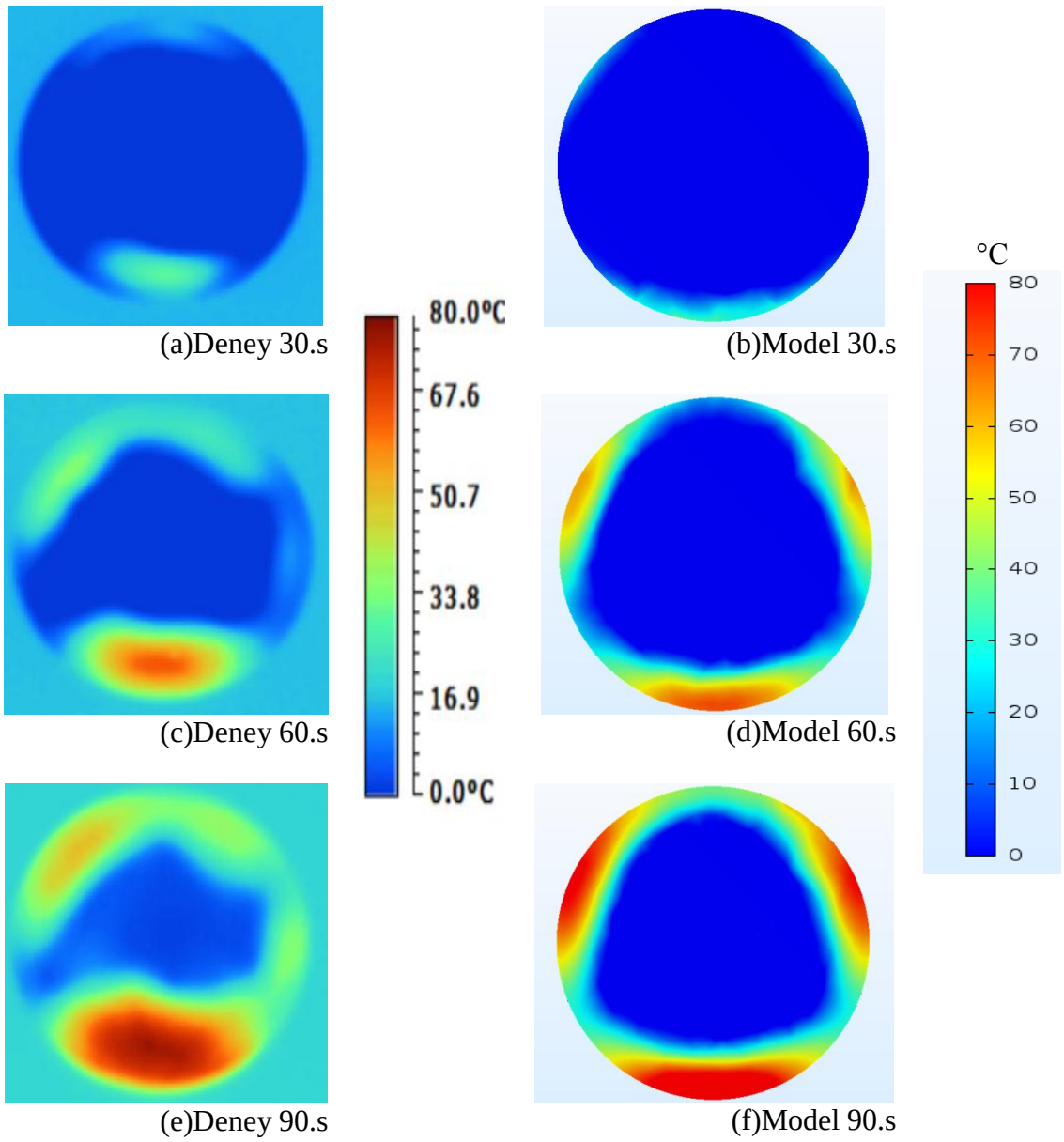
4.1.2 MW uygulama ile çözdürme çalışmaları

4.1.2.1 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan ve uygulanan durum

Bu bölümde, matematiksel model doğrulama amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Bölüm. 4.1.1'de açıklandığı şekilde uygulanmıştır. Model sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırılmasında 3-deney sonucunun ortalaması ve standart sapma değerleri 90 s (bu süre ürün yüzey sıcaklık değişiminin belirlenmesi kapsamında yapılan ön denemelerle belirlenmiştir) proses sürecinde kullanılmıştır. Dönme uygulanan durumda ise tek paralel olarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda dondurulmuş Tylose örneklerine fiber optik probların yerleştirilebilmesi amacıyla ince uçlu bir matkap kullanılarak belirlenen koordinat ve derinlikte yuvalar açılmıştır. EK 1 şekil 4, şekil 4.12 (yüzey sıcaklık değişimleri)'de ürüne dönme hareketi uygulanmadığı; EK1 şekil 5, şekil 4.13 (yüzey sıcaklık

değişimleri)'de ise dönme hareketi uygulanan durumda deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Çözdürme prosesi sırasında deney düzeneğinin hazırlanması aşamasında – fiber optiklerin ürün içerisine yerleştirilmesi sürecinde ürün başlangıç sıcaklığı değişiminden dolayı ürün başlangıç sıcaklıkları arasında farklılıklar bulunmaktadır (EK 1 Şekil 4-5).



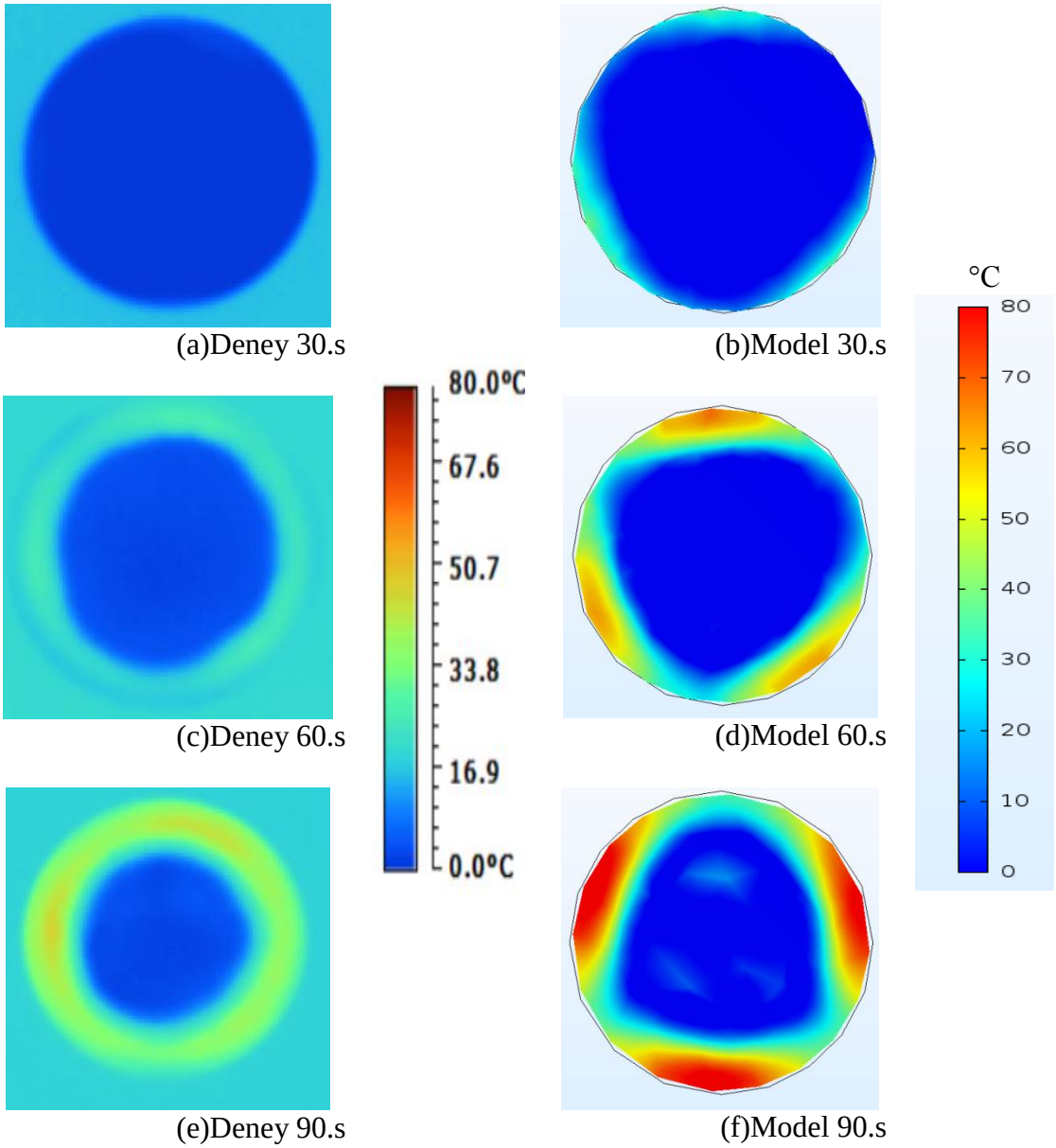
(a)Deney 30.s (b)Model 30.s

(c)Deney 60.s (d)Model 60.s

(e)Deney 90.s (f)Model 90.s

Şekil 4.12 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)



(a)Deney 30.s (b)Model 30.s

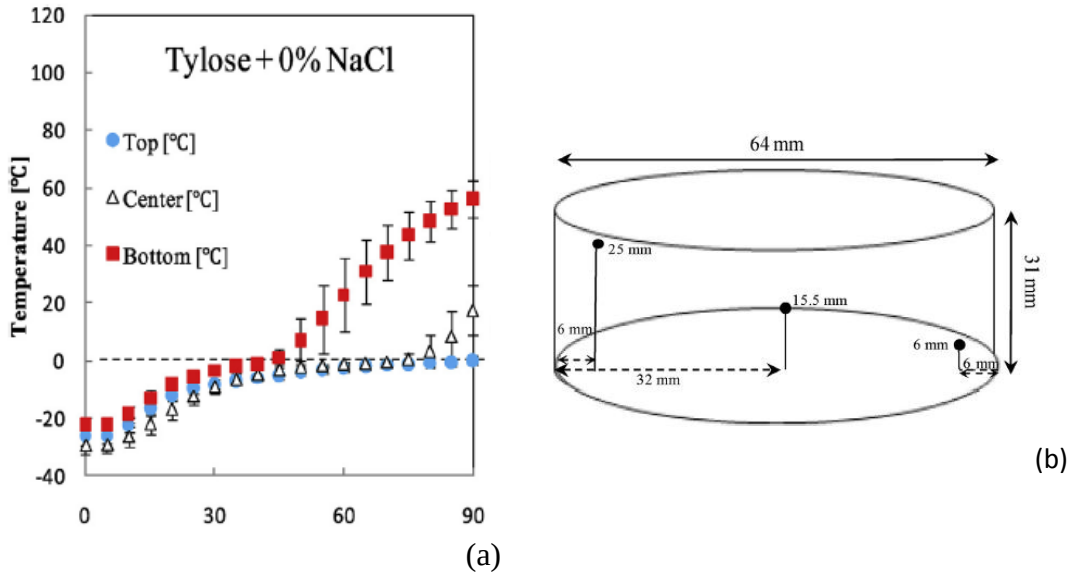
(c)Deney 60.s (d)Model 60.s

(e)Deney 90.s (f)Model 90.s

Şekil 4.13 Merkezde dönme işlemi uygulanan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

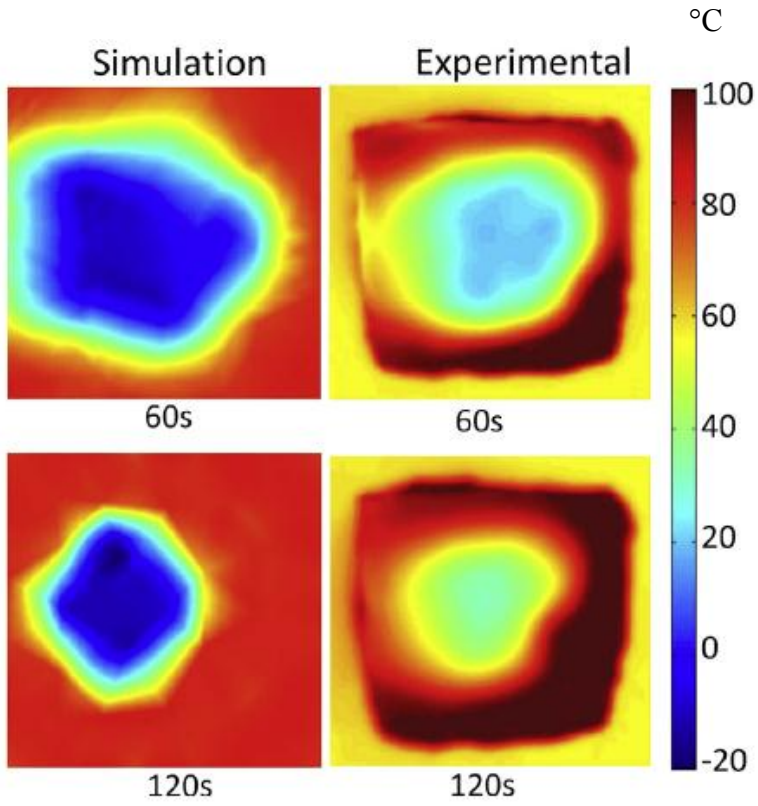
(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)

Gözlendiği şekilde hem dönme uygulanan hem de dönme uygulanmayan durumda deney sonuçları ile model sonuçları uyumlu çıkmıştır. Hem ısınma hem de çözdürme model karşılaştırma sonuçlarında gözlenen farklılığın MW uygulama sırasında ürün içerisinde hızlı gelişen sıcaklık artışı ve çözdürme durumunda su ile buzun dielektrik özellikleri arasındaki radikal değişikliğe bağlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, ürün içerisine yerleştirilen fiber optik probların yerlerinin tam olarak belirlenmesi ya da deneyler sırasında meydana gelebilecek oynamalar sonucunda sıcaklığı ölçülen noktadaki absorbe edilen enerjinin değişimine bağlı olarak önemli sıcaklık farklılıkları oluşmaktadır. Ayrıca absorbe edilen enerjiye ve ürünün sistem içerisinde olan konumuna bağlı olarak ürün sıcaklık değişimleri arasında önemli farklar meydana gelebilmekte, ürünün bir kısmı hala donma bölgesindeyken değer kısmın sıcaklığı çözdürme amacının çok dışında meydana gelebilmektedir. Tylose dielektrik özelliklerinin deneysel olarak belirlendiği ve ürün sıcaklık değişimlerinin deneysel olarak ölçüldüğü bir çalışmada (Llave vd. 2016) dondurulmuş Tylose'un sıcaklık değişimi mikrodalga ile çözdürme sürecinde 3 ayrı noktada kaydedilmiş ve ürün üst ve alt bölgeleri arasında oluşan sıcaklık farkı gösterilmiştir (Şekil 4.14). Gözlendiği üzere ürün üst yüzeyi 90 s mikrodalga uygulaması sürecinde 0 °C iken alt yüzey sıcaklığı 60 °C'ye ulaşmaktadır.



Şekil 4.14 MW uygulama ile ev tipi mikrodalgada (a) çözdürme prosesi deney sonuçları, (b) fiber optik konumları (Llave vd. 2016)

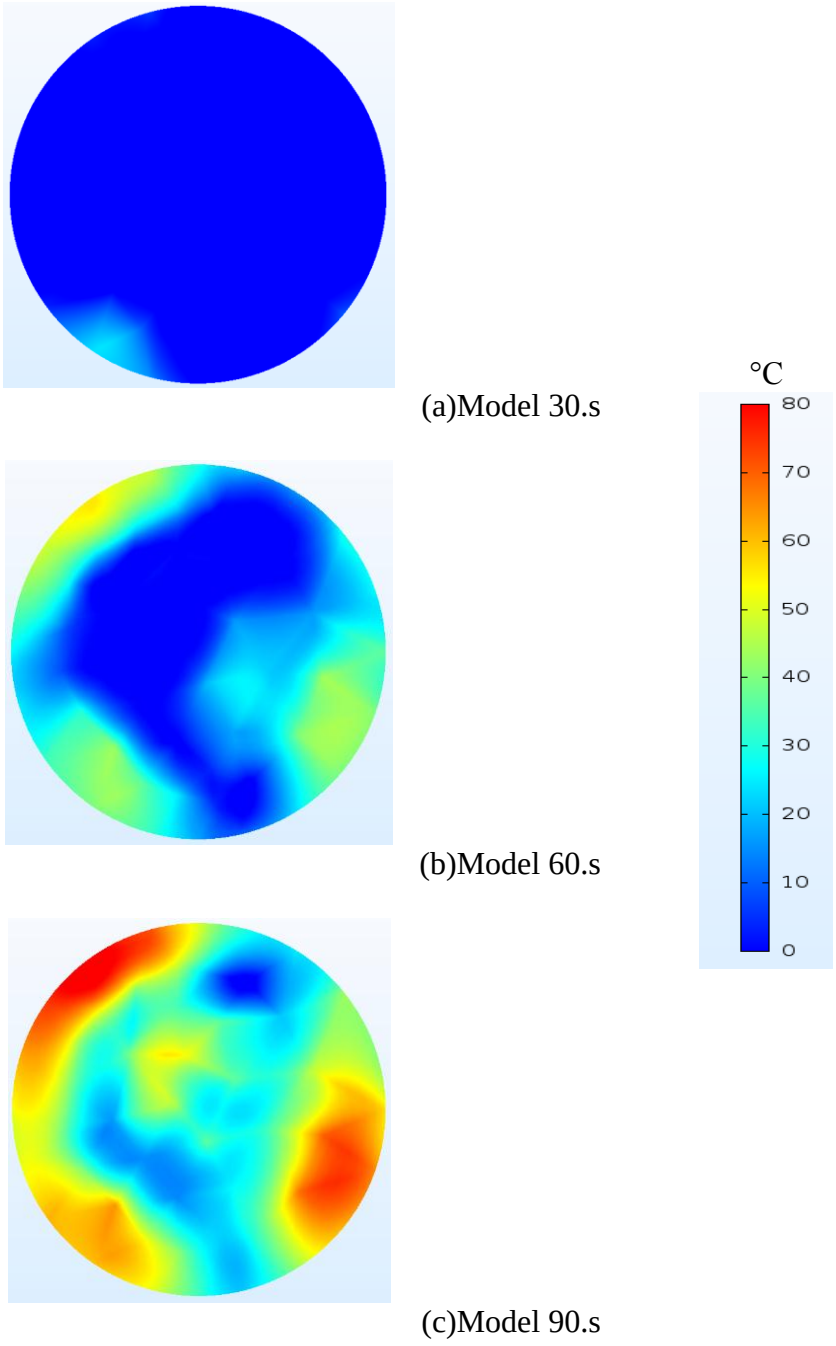
Chen vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen bir modelleme çalışmasında ise 5 cm boyutunda küp şeklinde hazırlanan Tylose'un mikrodalga uygulama işe çözdürülmesi sırasındaki sıcaklık değişimleri belirlenmiş ve sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.15). Sistem içerisinde dönme hareketi uygulanmadan gerçekleştirilen bu çalışmada deney ve simülasyon sonuçları arasında önemli farklar gözlenmiş ve ürün yüzey sıcaklığının -20 ile +100 °C arasında değiştiği gözlenmiştir



Şekil 4.15 MW uygulama ile Tylose çözdürme deney ve matematiksel modelde ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı (Chen vd. 2016)

4.1.2.2 Merkez dışında dönme işlemi uygulanmayan ve uygulanan durum

Merkez dışı konumda yapılan ısıtma deneylerinin sonucu doğrultusunda, çözdürme deneylerinde merkez dışı noktada dönme uygulanmadığı durumda deneysel analiz yapılmamıştır. Şekil 4.16 merkez dışı konumda dönme uygulanmayan koşullarda simülasyonlardan elde edilen üst yüzey sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu çalışmada ürün başlangıç sıcaklığı -12 °C olarak kullanılmıştır.



(a)Model 30.s

(b)Model 60.s

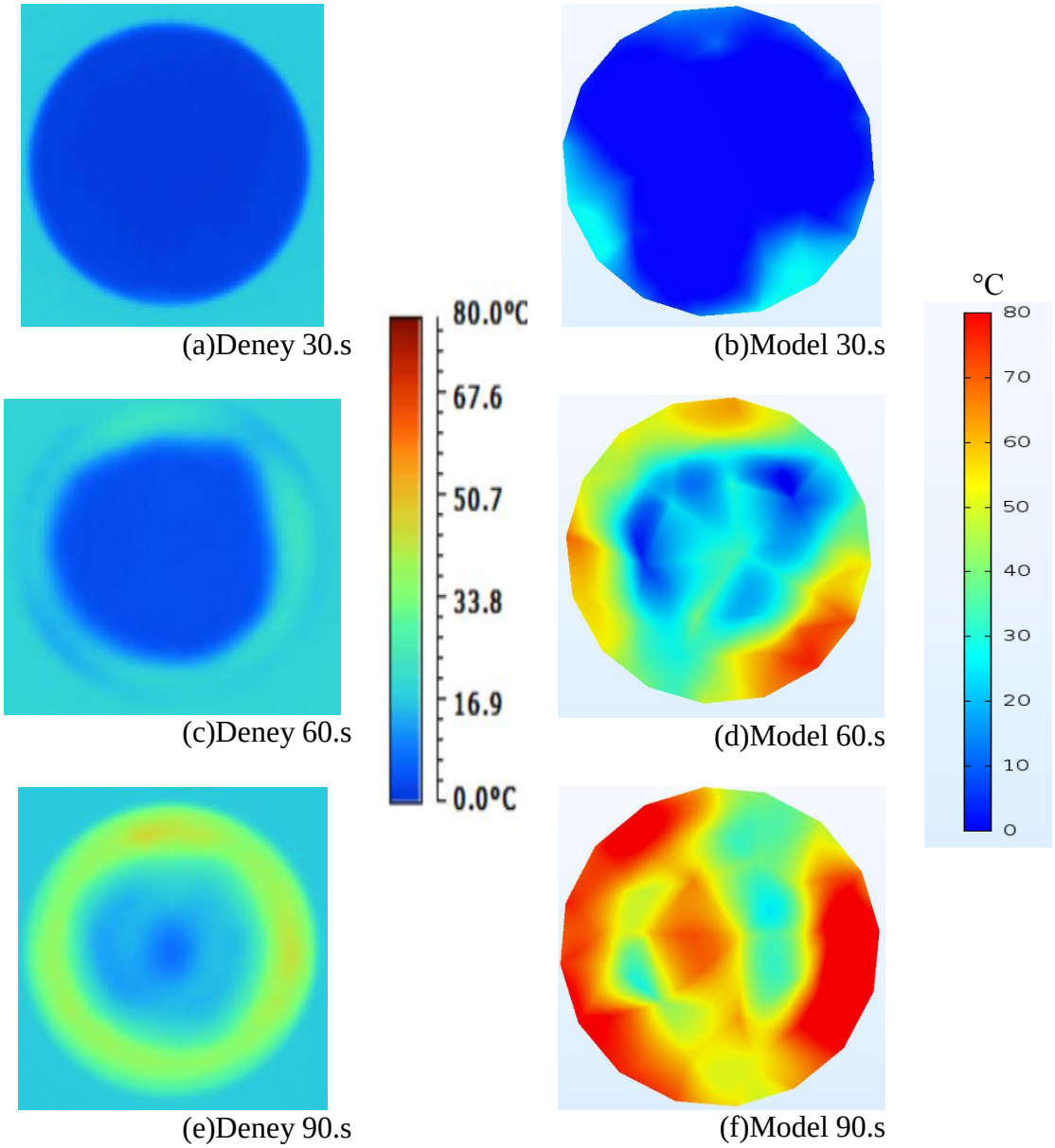
(c)Model 90.s

Şekil 4.16 Merkez dışı sabit çözdürme işlemi uygulanan durumda Tylose matematiksel model sonuçları

(a-30, b–60 ve c- 90. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)

Dönme uygulanan durumda ise 30, 60, 90 s sonunda kızılötesi kamera ile elde edilen üst yüzey sıcaklık dağılımı sonuçlarının matematiksel model sonuçlarıyla karşılaştırılması şekil 4.17'de gösterilirken, şekil 4.18 merkez ve merkez dışı konumda dönme uygulanan durumda elde edilen deneysel sıcaklık değerlerinin karşılaştırılmasını

göstermektedir. Model sonuçları ile deneysel sonuçlar uyumluluk gösterirken, merkez dışı konumda dönme uygulanan durumda ürün yüzey sıcaklığının daha homojen olduğu gözlenmiştir.



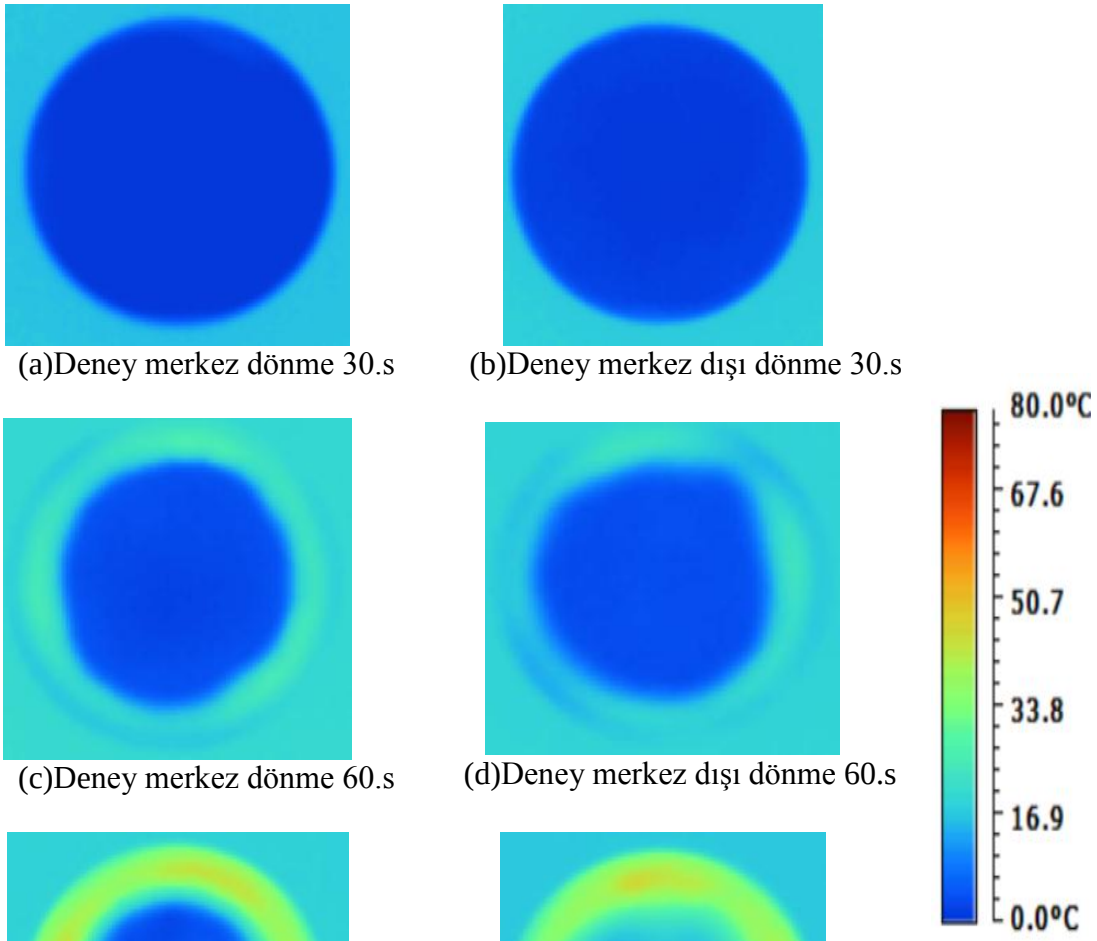
(a)Deney 30.s (b)Model 30.s

(c)Deney 60.s (d)Model 60.s

(e)Deney 90.s (f)Model 90.s

Şekil 4.17 Merkezde dışı dönme işlemi uygulanan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki deneysel sonuçları; b-d-f, 15-30-45. saniyelerdeki matematiksel model sonuçları)



(a)Deney merkez dönme 30.s (b)Deney merkez dışı dönme 30.s

(c)Deney merkez dönme 60.s (d)Deney merkez dışı dönme 60.s

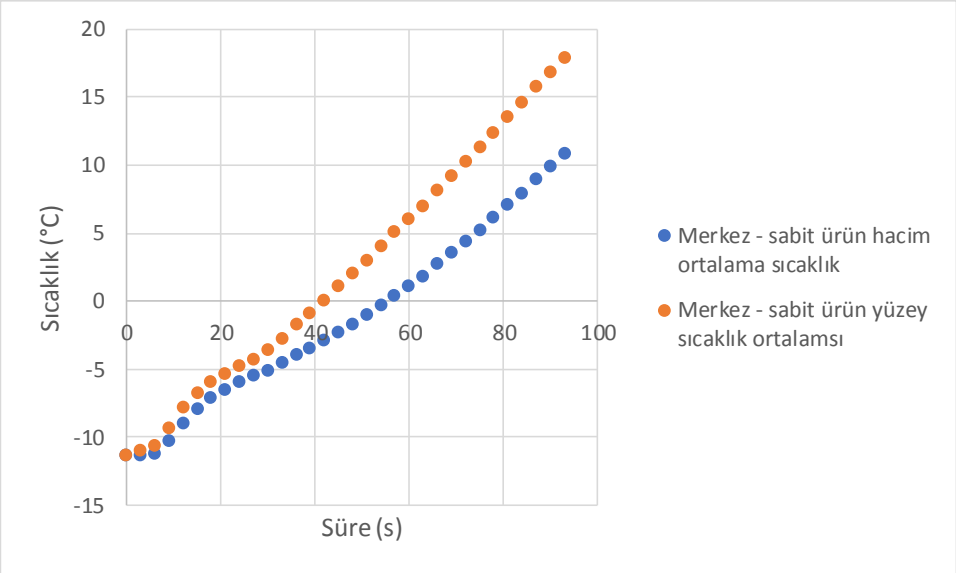
(e)Deney merkez dönme 90.s (f)Deney merkez dışı dönme 90.s

Şekil 4.18 Merkez dışında dönme işlemi uygulanan ve uygulanmayan durumda Tylose çözdürme deney sonuçlarının ürün üst yüzey sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

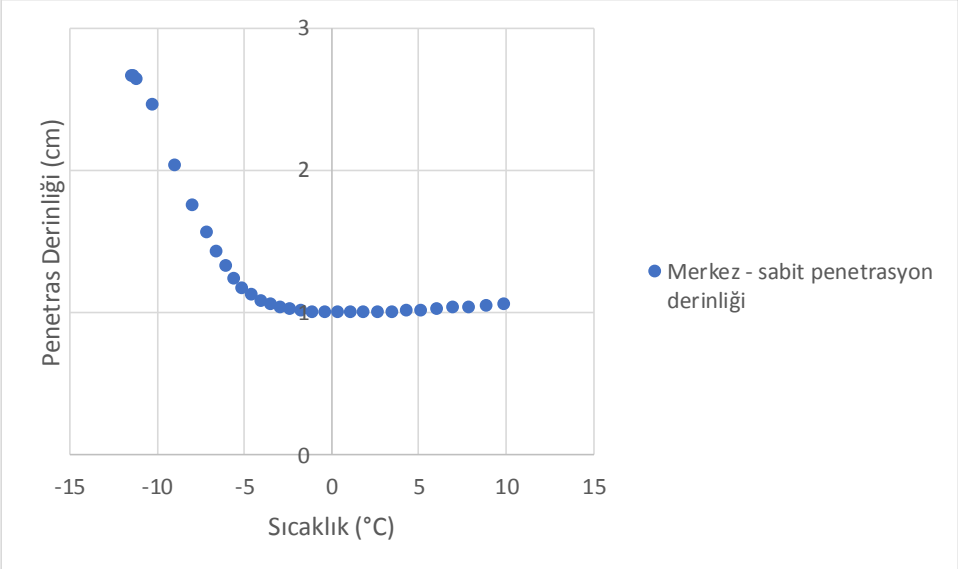
(a-c-e, 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – sabit sonuçları; b-d-f 15-30-45. saniyelerdeki merkez dışı – dönme sonuçları)

4.1.2.3 Penetrasyon derinliğinin ürün sıcaklık değişimine etkisi

Tylose örneğinin MW sistemin merkezinde konumlandırıldığı ve dönme hareketinin olmadığı durumda ürün sıcaklık değişimi deneysel olarak doğrulanan matematiksel model kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.19.a ürün yüzey ve hacim ortalama sıcaklık değişimini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.19 Merkez – sabit çözdürme matematiksel modelinde a. Tylose hacimsel sıcaklık değişimi, b. Tylose penetrasyon derinliği

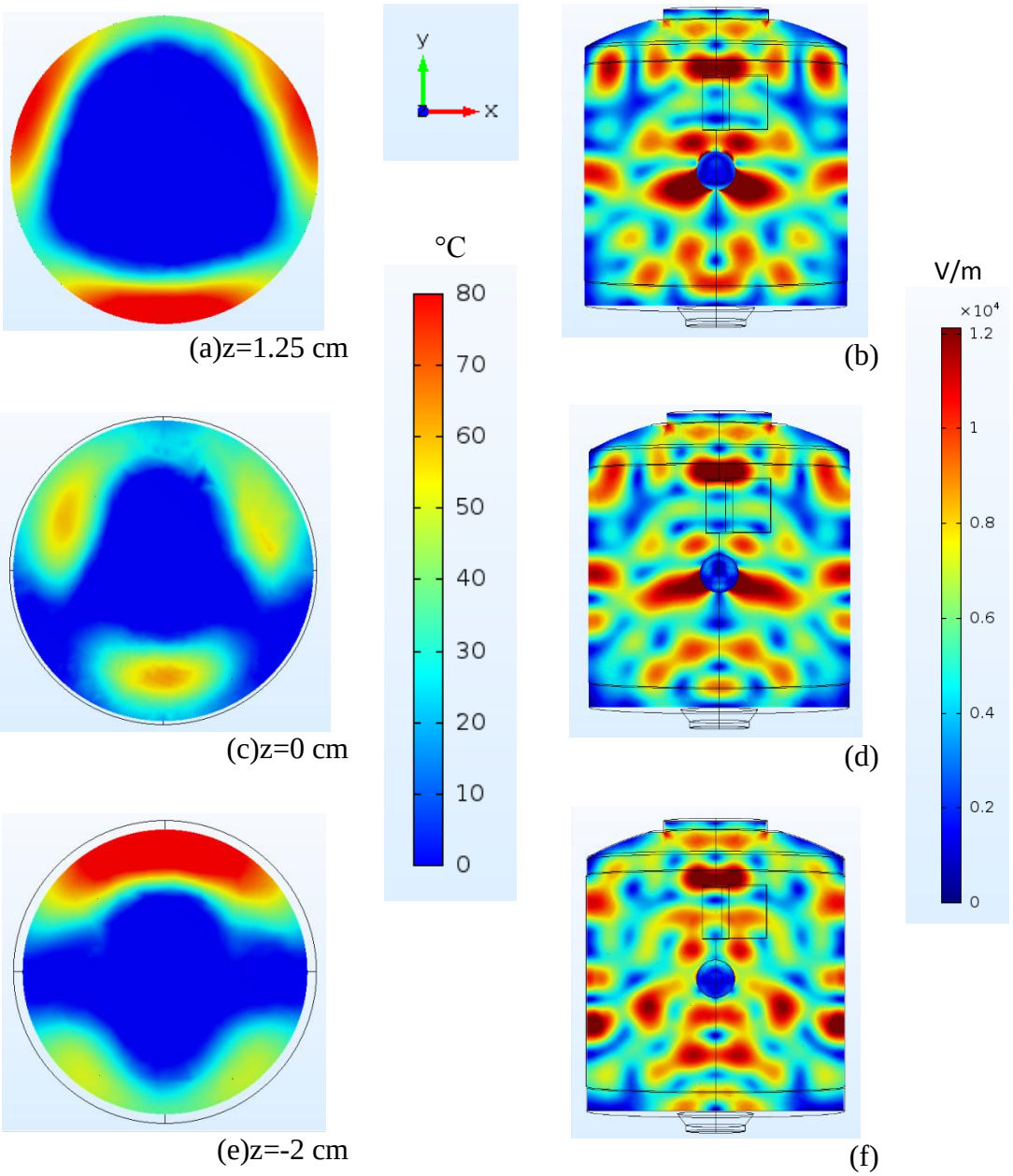
MW uygulamalarında ürün sıcaklık değişimi, proses uygulama frekansı ve ürün dielekrik özelliklerine bağlı olarak değişen penetrasyon derinliğine (Eşitlik 2.17) bağlı olarak değişmektedir. Sistemde kullanılan dalga boyu (2450 MHz – 12.24 cm) ürün içi sıcaklık değişiminin hacimsel bazda gerçekleşmesini etkilemektedir. Penetrasyon derinliğinin kullanılan ürün ve proses koşullarına bağlı olarak sıcaklıkla değişimi şekil 4.19.b'de gösterilmiştir. Gözlendiği gibi sıcaklık artışı ile birlikte penetrasyon derinliği azalmakta ve -2 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yaklaşık 1 cm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sıcaklıktan düşük olan ve çözdürme prosesinde baskın olan sıcaklık değerlerinde ise 3 – 1 cm aralığında değişse de bu bölgedeki dielektrik özelliklere bağlı olarak ürün elektromanyetik enerjiye transparan özellik gösterdiğinden etkin bir ısınma gerçekleşmemektedir (2450 MHz'de buzun dielektrik sabit ve bağıl dielektrik kayıp faktörü değeri sırasıyla 3.2 ve 0.0029 olarak verilmektedir). Buna bağlı olarak, çözdürme prosesinde kullanılan Tylose'un x-z kesitinde (EK 3 Şekil 1.a) zamana (3, 12, 30, 45, 72 ve 90 s) bağlı olarak gerçekleşen sıcaklık değişimleri EK 3 şekil 1.b-g'de gösterilmektedir

Simülasyonun 3'üncü saniyesinde halen sistem içerisine uygulanan güç değeri "0" olduğundan (Şekil 4.6.e) kavite içerisinde herhangi bir elektrik alan oluşmamış olup ürün köşelerinde konveksiyonla gerçekleşen ısı transferine bağlı olarak sıcaklık değişiminin başladığı gözlenmektedir. Penetrasyon derinliği ürünün etrafında oluşan elektromanyetik alanla ilgili olduğundan ve ürün etrafında elektromanyetik alan yoğunluğu fazla olduğunda ürünün o yüzeyinde penetrasyon derinliğinin sıcaklık artışına etkisi görülmektedir. Bu kapsamda ürün üst tarafında elektromanyetik alan yoğunluğunun az olduğu şekil 4.6.c'de görülmektedir. Bu kapsamda prosesin 12. Saniyesinde (Ek 3 Şekil 1.c), belirtilen x-z kesitinde, ürün sıcaklık ortalaması -9.01 °C olup penetrasyon derinliği de yaklaşık 2.03 cm değerindedir. Ürün yarıçapı 3.3 cm olduğundan elektromanyetik enerjinin yaklaşık olarak ürün merkezine kadar ulaşabildiği bu şekilde gözlenmektedir. Proses süresi ilerledikçe ve ürünün ortalama sıcaklığı arttıkça penetrasyon derinliği azaldığından, elektromanyetik enerjinin ürün iç yüzeylerine etki etmesi de kısıtlanmaktadır. Bu durum ürün x-z kesitinde 30. S'den itibaren gözlenmektedir (EK 3 Şekil 1.c,d,e). Örneğin 72. s'de (EK 3 Şekil 1.f) ürünün ortalama sıcaklığı +4.3 °C iken penetrasyon derinliği 1.01 olup azalan penetrasyon

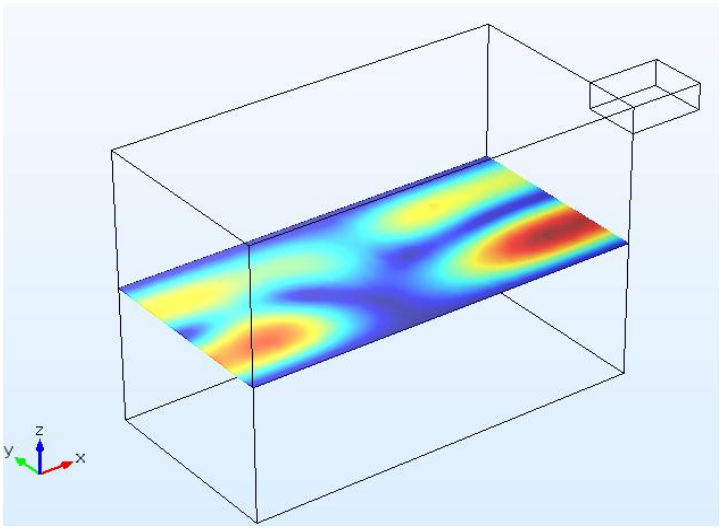
derinliğine bağlı olarak ürün iç yüzeylerinde sınırlı bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. 72 ve 90'ıncı saniyelerde ürünün kenarlarında çözünme başlamasına (dielektrik özelliklerin buza bağlı değerlerden suya bağlı değerlere de geçmesiyle 78, 12.48) (Singh and Heldman 2001) ve sıcaklık artışı gözlenmesine rağmen MW penetrasyon derinliğine bağlı olarak iç bölgelerde benzer bir etki gözlenememek olup bu bölge halen 0 °C'nin altın bir sıcaklığa sahiptir. Çözünmenin başlamasından sonra ürün sıcaklığının artmasının penetrasyon derinliğine etkisinin sınırlı olduğu (EK 3 Şekil 1.f,g –1.01 (4.32 °C) - 1.06 (10.78 °C) cm) EK 3 şekil 1.f,g'de net olarak gözlenmektedir. Ürün yüzeyinde oluşan elektromanyetik enerji yoğunluğuna bağlı olarak ürünün üst bölgesinde alt bölgesine göre sıcaklık artışı daha hızlı olmakta ve penetrasyon derinliğinin bu duruma etkisi de EK 3 şekil 1.d,e,f,g'de net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

4.1.2.4 Sistem içi elektromanyeik alan dağımına sistem geometrisinin etkisi

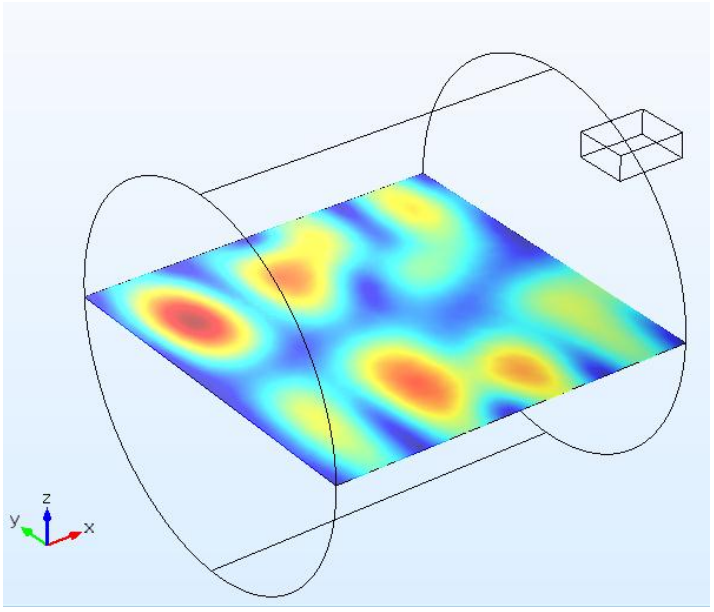
MW sistem ile merkezde dönme etkisi olmadan yapılan çözdürme matematiksel modelinde 90. saniyede ürünün farklı 3 yüksekliğinde (z=1.25, z=0, z=-2) ürünün içindeki sıcaklık değişimi ve aynı yükseklikte ürün içinde ve ürün etrafında oluşan elektromanyetik alan değişimi sistem x-y kesitinde şekil 4.20'de gösterilmiştir. MW sistemin kavite tasarımının silindirik olmasına bağlı olarak elektromanyetik dalgaların kavite duvarlarından yansıması ve buna bağlı olarak sistem içerisinde, dörtgen kavite kullanımına göre, daha homojen bir elektromanyetik alan dağılımının oluştuğu şekil 4.21'da gösterilmiştir. Bu karşılaştırma 2450 MHz uygulama frekansında Comsol V. 5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) kütüphanesinde yer alan mikrodalga ısıtma örneği kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.20 Merkez – sabit durumda Tylose çözdürme prosesinde 90. saniyede z=1.25 (ürün üst yüzeyi), 0, -2 yükseklik hizalarında ürün içindeki sıcaklık dağılımı ve kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alan



(a)



(b)

Şekil 4.21 Comsol çoklu fizik matematiksel modelleme programında hazırlanmış çalışma kütüphanesindeki mikrodalga fırın çalışmasında kavite içerisindeki a. elektromanyetik dağılım aynı boyutlarda silindir kavite içerisinde oluşan, b. elektromanyetik alan

4.2 Basınç Altında Tylose Isıl İşlem Uygulamaları

Kullanılan MW sistemin önemli bir özelliği kavite içerisinde basınç oluşturabilmesidir. Basıncın etkisinin MW sistemde tylose ile tablanın merkezinde ve dönme etkisiz yapılan ısıtma ve çözdürme prosesleri 2 bar basınç altında bir kez daha yapılmıştır.

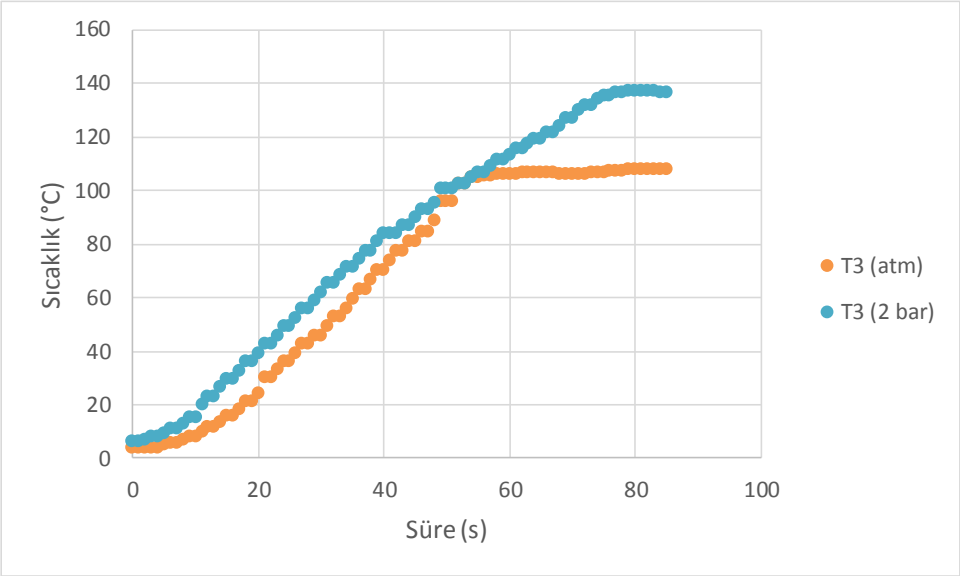
4.2.1 Döner tabla merkez konumunda 2 bar basınç altında ısıl işlem uygulaması

Tylose MW sistemin tablanın merkezine konumlandırılmıştır ve dönme hareketi olmaksızın ısıtma deneyi 3 tekrarlı yapılmıştır. MW sistemin kavitesi içerisinde 2 barlık basınç oluşturulabilmesi 30 saniye sürmektedir. Aynı zamanda proses sonrasında kavite kapağının açılmadan önce kavite içerisindeki basıncın salınması için 30 saniye süre geçmektedir. Atmosferik basınç altında ve 2 bar basınç altında yapılan Tylose ısıtma deneylerinin karşılaştırılması için basınç altında yapılan deneylerde prosesin 45s'lik MW ısıtma bölümü kullanılmıştır.

Deneyler sırasında fiber optiklerle elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda (EK 4 Şekil 1), basıncın sıcaklık artış hızına herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Basıncın etkisiyle Tylose'un termal özellikleri belli oranda değişse bile mikrodalga ısıtma prosesinde ürünün asıl ısınmasını dielektrik özellikler belirlemektedir. Deney sonuçlarına göre de basıncın dielektrik özellikler üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

Deneyler sırasında fiber optiklerle elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda, basıncın sıcaklık artış hızına herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Basıncın etkisiyle Tylose'un termal özellikleri belli oranda değişse bile mikrodalga ısıtma prosesinde ürünün asıl ısınmasını dielektrik özellikler belirlemektedir. Deney sonuçlarına göre de basıncın dielektrik özellikler üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı sonucu çıkarılabilir. Basıncın kaynama noktasını arttırdığı bilinmektedir, bu nedenle mikrodalga ısıtma prosesinin süresi uzatılmıştır. Şekil 4.22 görüldüğü gibi 2 bar basınç altında yapılan proseste 85 saniye sonunda 3 numaralı noktada sıcaklık ≅137 °C ulaşmakta ve sabitlenmektedir. MW uygulama ile

sterilzasyonun amaçlandığı bir ısıl işlem uygulamasında kavite içerisinde basınç oluşturularak ürün içerisinde istenilen sıcaklıklara ulaşılabilecektir.



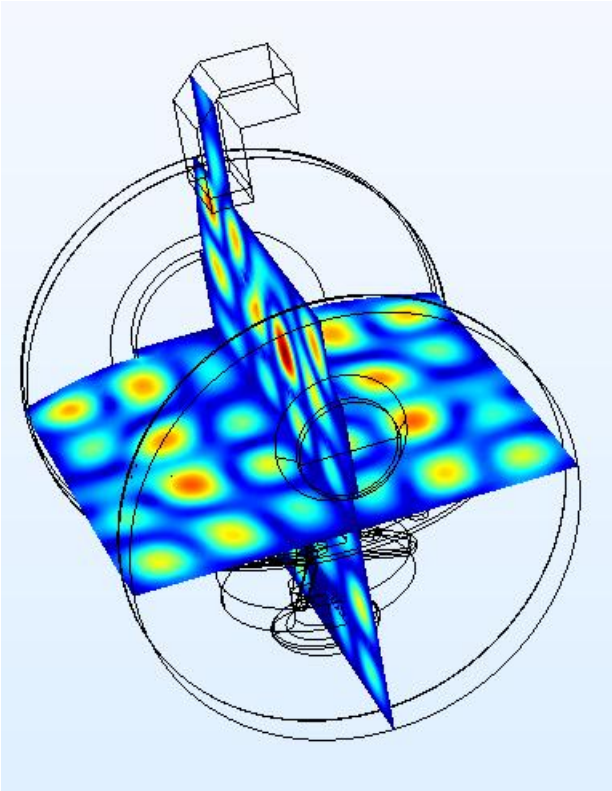
Şekil 4.22 Merkez – sabit durumda 85s Tylose ısıtma atmosferik ve 2 bar basınç altındaki noktasal sıcaklık sonucunun karşılaştırılması

4.2.2 Döner tabla merkez konumunda 2 bar basınç altında çözdürme çalışması

Atmosferik basınç altında tylose ile merkezde dönme hareketi olmadan yapılan deneyle aynı koşullar altında kavite içerisinde 2 bar basınç altında çözdürme deneyleri 3 tekrarlı yapılmıştır. Deneyin ilk 30 ve son 30 saniyesi kavite içerisinde basınç oluşturma ve basıncın salınması için harcanırken 90 s MW ısıtma prosesi uygulanmıştır.

Basıncın donma (çözünme) başlangıç sıcaklığı üzerine etkisi olduğu bilinmektedir. Bunun karşılaştırılması için 2 bar altında yapılan deneylerin sadece 90 saniyelik mikrodalga ısıtma prosesi bölümü kullanılarak deneylerin sıcaklık ortalaması ve standart sapmaları kullanılmıştır. Her verinin kendi içinde karşılaştırılması ise EK 4 şekil 2'de gösterilmektedir.

Bu sonuçlar kapsamında 2 barlık basıncın çözünme (donma) başlangıç noktası üzerine bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Bunun nedeni 2 bar basıncın yüksek basınç altında çözdürme prosesindeki gibi çözünme noktası üzerinde etkili olacak kadar yeterli olmamasına bağlanmıştır. Bu yapılan analizler doğrultusunda kullanılan MW sistemde donmuş morina balığının çözdürülmesi için ürünün merkez dışı konuma yerleştirilmesi, dönme hareketinin kullanılması ve atmosferik basınç altında deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca şekil 4.23'de görüldüğü gibi ürün tablanın sol tarafına konumlandırıldığında kavitenin sağ bölgesinde kullanılmayan elektromanyetik alan oluşmaktadır. Kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alandan faydalanmak için tablanın sol ve sağ tarafına merkezden eşit uzaklıkta ve paralel bir şekilde 2 tane dondurulmuş morina balığının konumlandırılmasına karar verilmiştir.



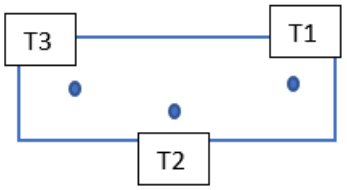
Şekil 4.23 MW kavite içerisinde ürün yokken oluşan elektromanyetik alan

4.3 Dondurulmuş Morina Balıklarının Mikrodalga Uygulama ile Çözdürülmesi

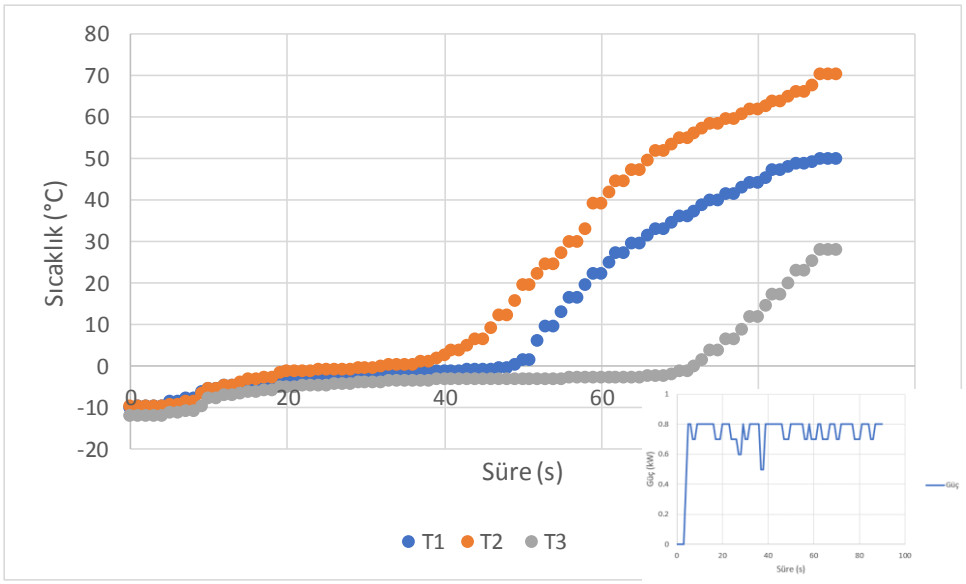
MW sistemde Tylose ile yapılan farklı kombinasyonlardaki ısıtma ve çözdürme deneyleri ve bu deneyler doğrultusunda hazırlanan matematiksel modellerin doğrulanmasından sonra gıda endüstrisi uygulaması örneği amacıyla MW sistemde dondurulmuş morina balıklarının çözdürülmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tylose ile yapılan deneyler ve matematiksel modeller doğrultusunda ürünün MW sistem tablasının merkez dışı konumda dönme hareketi ile üründe homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Morina balığının dielektrik özelliklerinin Tylose'dan farklı olacağı, dondurulmuş ürünün etrafındaki ince bir tabaka olarak yer alan buz tabakasının ve morina balıklarının geometrisinin sıcaklık değişimini etkileyebileceği düşünülerek MW sistemde ön denemeler yapılarak ürün içi ve yüzey sıcaklık dağılımları belirlenmiş ve buna bağlı olarak sistem içerisinde tek ve iki ürün kullanılarak çözdürme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Sistem merkezinde tek ürün bulunması ve dönme işlemi uygulanmayan durumda gerçekleştirilen çözdürme çalışmaları

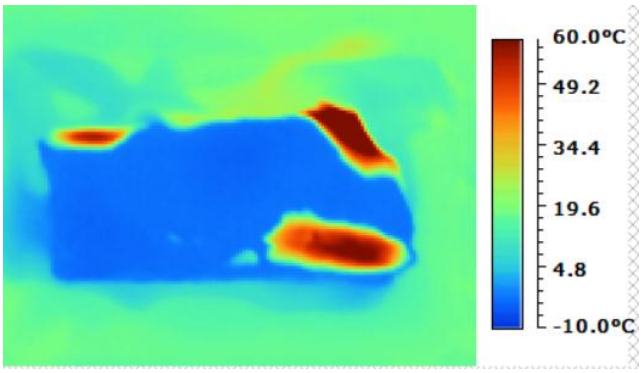
Dondurulmuş morina balığı MW sistemde merkez konuma yerleştirilmiş ve Tylose çözdürme prosesinde olduğu gibi 90 s ve 1 kW güç değeri kullanılarak dönme işlemi uygulanmadan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dondurulmuş örnekte yan yüzeyin merkezinden 2 cm derinliğe yerleştirilen 3 fiber optik proses sırasında sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesi amacıyla kullanılmıştır (Şekil 4.24.a,b). Faz değişimi bölgesi geçildikten sonra sıcaklık artış hızı ürünün içindeki buz kristallerinin suya dönüşmesi ve çözünmüş iyonların serbest kalmasıyla ısınma hızı artış göstermiştir. Çözdürme prosesinin tamamlanmasından elde edilen sonra ürün üst yüzeyinin sıcaklık profili şekil 4.23.c'de görülmektedir. Ürün üst yüzey ve köşelerinde sıcaklığı fazla yükselmiş noktalar (T>60 °C) oluşurken çözünme prosesinin tamamlanmamış olduğu bölgelerde gözlenmiştir (Şekil 4.23.c).



(a)



(b)

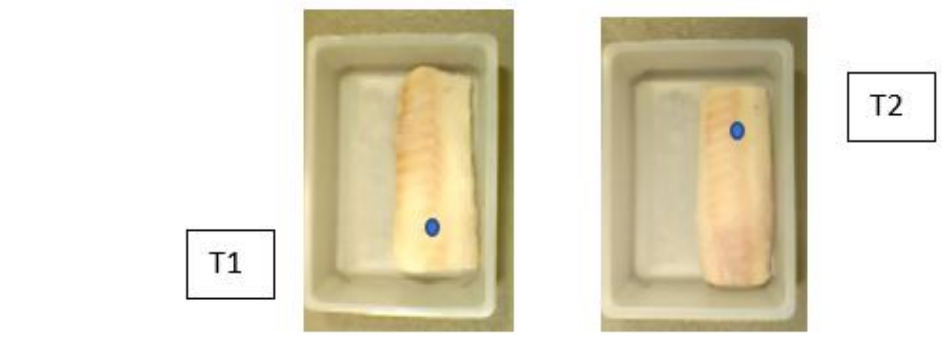


(c)

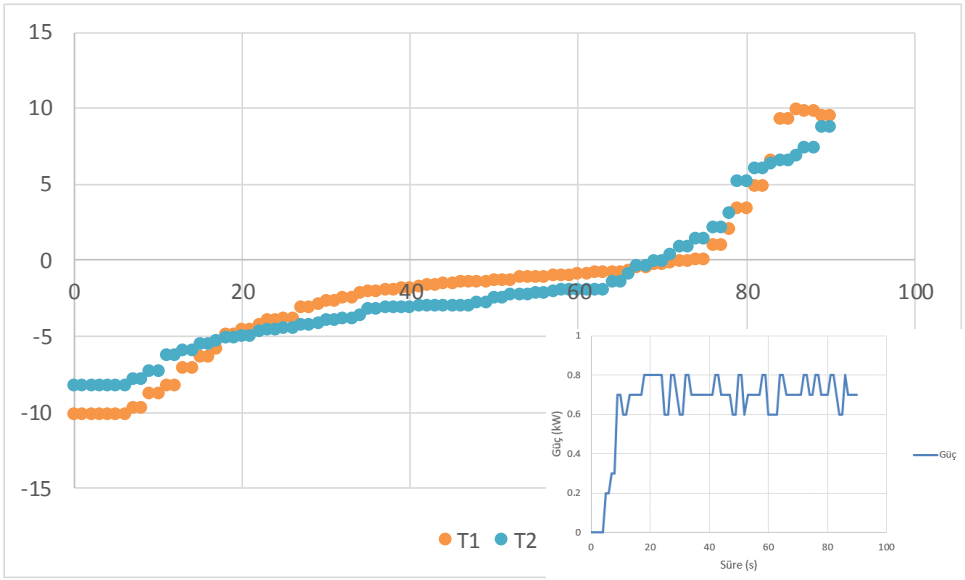
Şekil 4.24 Dondurulmuş Morina balığı merkez – sabit çözdürme prosesi a. fiber optik noktalar, b. noktasal sıcaklık sonucu, c. proses sonrası ürün üst yüzey sıcaklık dağılımı

4.3.2 Merkez dışı konuma yerleştirilen ve dönme işlemi uygulanan durumda iki ürünün eş zamanlı çözdürme prosesi

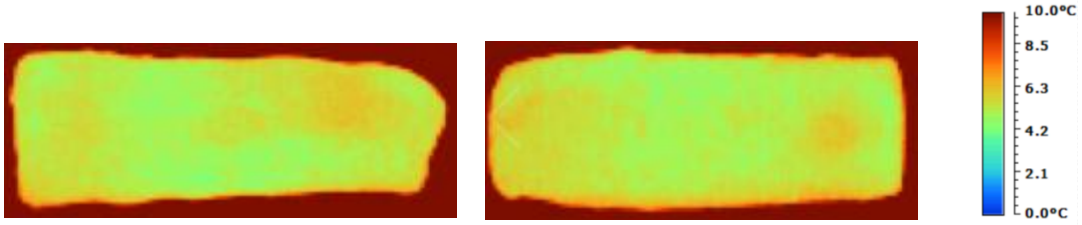
Tylose deneylerinin sonuçları doğrultusunda karar verilen 2 dondurulmuş morina balığının aynı anda proses edilmesi ve mikrodalga tabak üzerinde merkez konum dışında dönme hareketi ile prosesler yapılmıştır. Dondurulmuş morina balıkları MW sistem içerisinde döner tabla üzerine paralel olarak yerleştirilmiş (Şekil 3.14) ve dönme işlemi uygulanarak 1kW güçte 90 s sürede proses edilmiştir. Her balığın yan yüzeyinden 2 cm derinliğe bir fiber optik probe deney öncesinde yerleştirilmiştir. Fiber optik probların konumları ve proses süresince elde edilen sıcaklık değişimleri şekil 4.25.b'de gösterilmektedir. Ürün sıcaklık değişimleri, başlangıç sıcaklık değerleri arasındaki farka bağlı olarak meydana gelen değişim dışında, proses sürecinde benzer bir artış hızı göstermiştir. Bu sonuç uygulanan dönme prosesi sürecinde ürünlerine benzer bir elektromanyetik enerjiye maruz kaldıklarını ve benzer güç absorbe ettiklerini göstermektedir. Balıkların proses sonrası yüzey sıcaklık değişimleri ise şekil 4.25c'de gösterilmiştir. Donmuş balıkların proses başlangıcında etraflarında yer alan ince buz filmi proses sonunda tamamen erimemiş olup bu durum ürün yüzey sıcaklık artışlarının da kontrollü olmasını sağlamıştır. Kızıl ötesi kamerayla çekilen görüntülerde yüzey sıcaklık değerlerinin 0 °C'nin üzerinde gözlenmesinin ölçüm sırasında ışınların yansımasına bağlı olarak doğru ölçüm yapılamadığı düşünülmektedir. Tylose deneylerinde ise ürün yüzeyini kaplayan bir buz tabakası bulunmadığından ve ürün yüzeyinde çözünme gerçekleştiğinde bu problemle karşılaşılmamıştır.



(a)



(b)

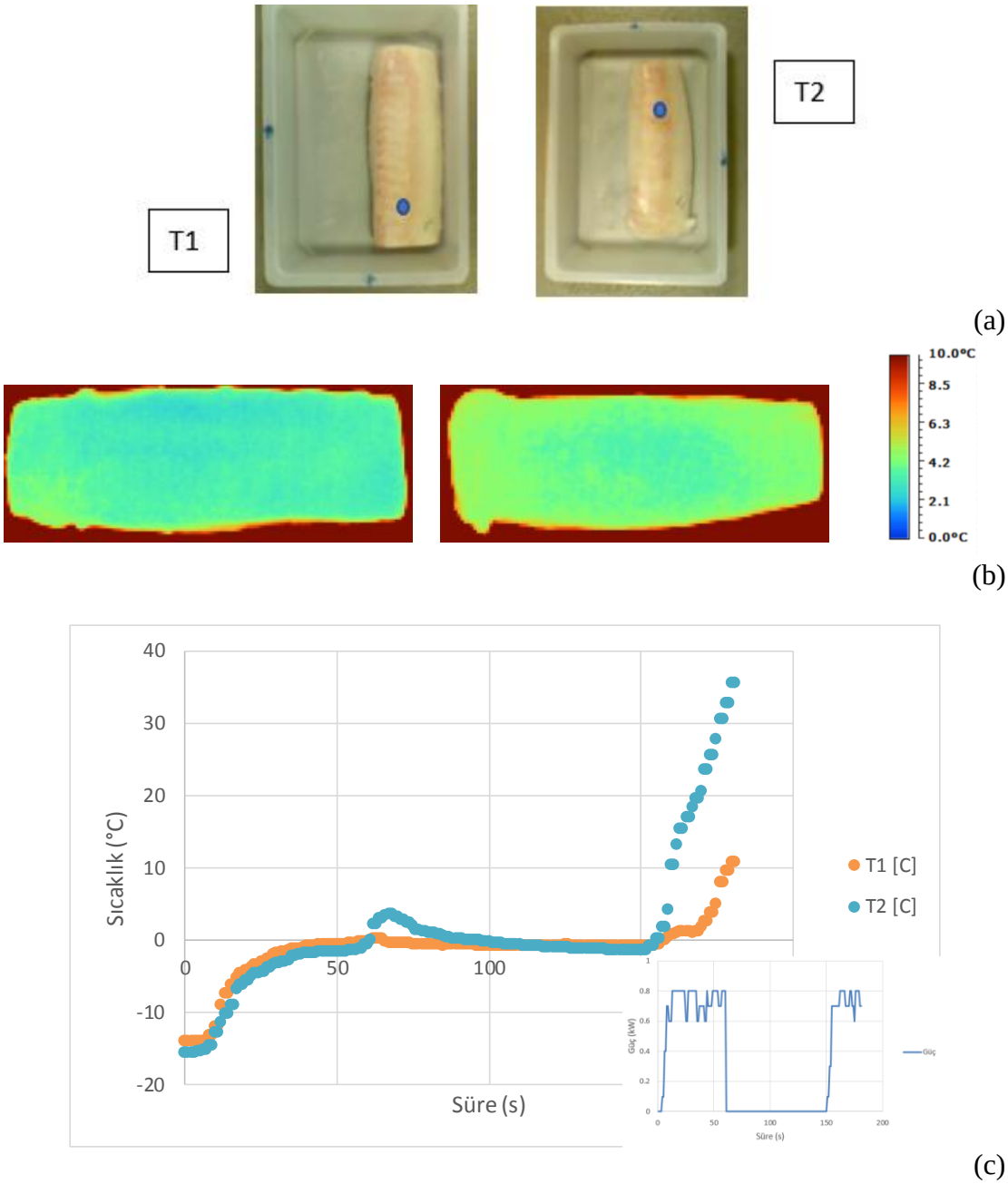


(c)

Şekil 4.25 2 tane dondurulmuş Morina balığının dönme etkisiyle çözdürülmesi, a. fiber optiklerin yerleri, b. proses sırasında noktasal sıcaklık dağılımı, c. proses sonrası balıkların üst yüzey sıcaklık dağılımı,

4.3.3 Merkez dışı konuma yerleştirilen ve dönme işlemi uygulanan durumda iki ürünün dur - kalk güç uygulaması ile çözdürülmesi

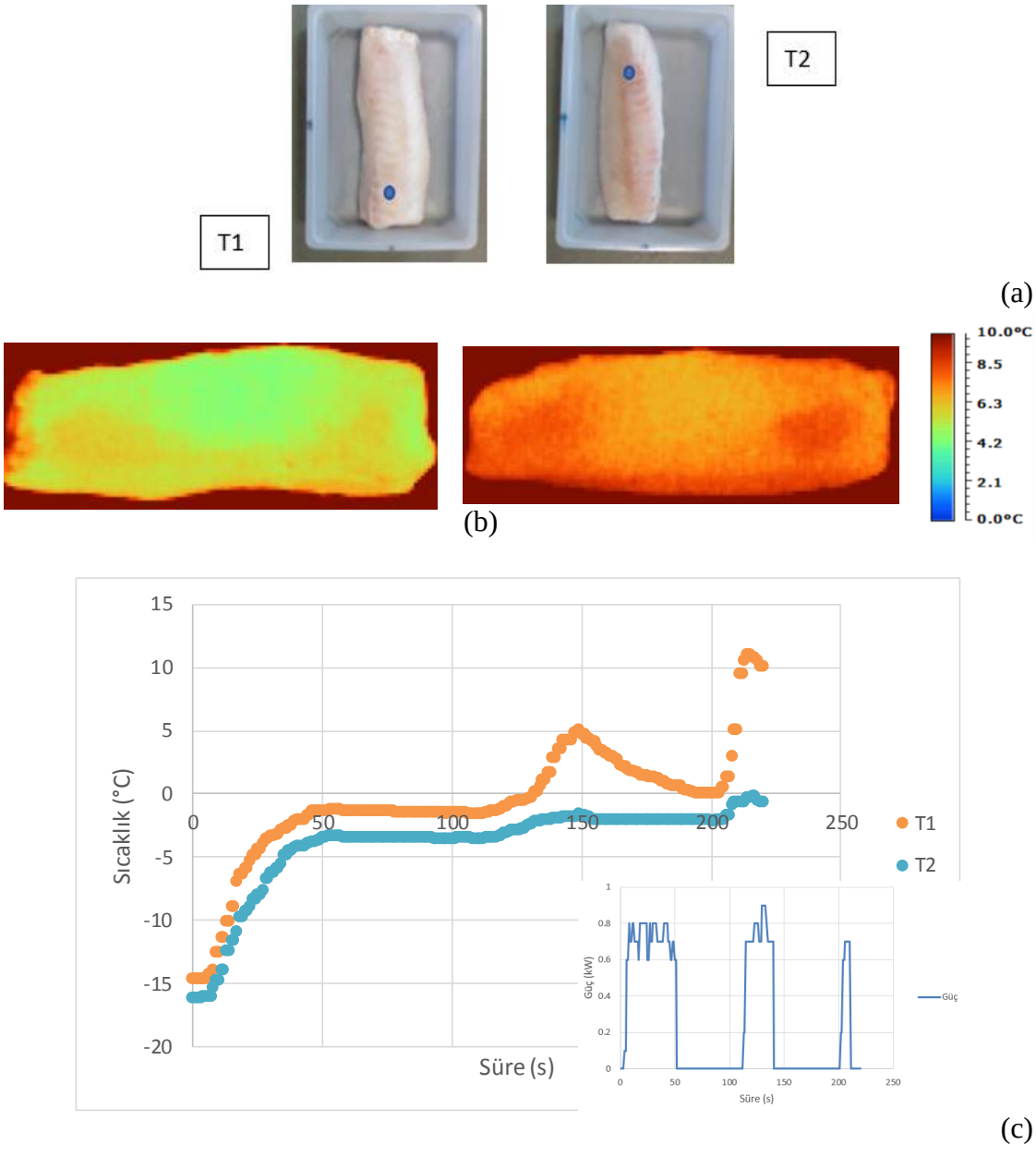
Bu deneylerde, MW sistem içerisinde döner tabla üzerinde merkezden aynı uzaklıkta olan iki noktaya (Şekil 3.5) yerleştirilen ürünler için hem dönme hem de dur – kalk güç uygulaması kullanılarak çözdürme prosesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.26.c noktasal – yüzeysel sıcaklık artışları ve güç değişiminde görüldüğü gibi 60 s MW uygulamasından sonra 90 s uygulama gücünün sıfır olduğu bölüm ve tekrar 30 s MW uygulamasının yer aldığı bir proses uygulanmıştır. Proses sürecinde ürüne dönme işlemi uygulanmış olup, Şekil 4.26.a'da gösterilen (ürün yan yüz merkez noktasından 2 cm derinlikte) noktalarda elde edilen sıcaklık değişimleri şekil 4.26.b'de ve proses sonrası ürün yüzey sıcaklık değişimleri de şekil 4.26.c'de gösterilmiştir. Şekil 4.26.b'de gözlendiği şekilde 90 s'lik MW uygulaması sonrası ürün sıcaklık değişimleri göreceli olarak faz değişim noktasında devam etmiş ve son 10 s'lik MW uygulaması ile istenmeyen şekilde artmıştır. Proses sonrasında elde edilen ürün üst yüzey sıcaklık profilleri birbirine benzer olarak gözlenmiştir (Şekil 4.25.c, Şekil 4.26.c). Bu deney sonuçlarına bağlı olarak çözdürme prosesinde alternatif ısıtma aralıklarının sıklaştırılmasına karar verilmiş ve prosesin tamamlanmasından sonra ürünler +4 °C'de bekletilerek iç sıcaklık artışları kontrol edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.26 Dondurulmuş 2 Morina balığın dur – kalk yöntemi ile çözdürülmesi, deneme-1

Bu kapsamda, ilk 50 s MW uygulama sonrası 60 s MW uygulaması yapılmamış, 30 s MW uygulamasından sonra tekrar 60 s bekleme süresi uygulanmış ve proses en sonunda 10 s MW uygulaması ile tamamlanmıştır. Şekil 4.27, dur – kalk uygulamalı çözdürme çalışmasının son 10 s MW uygulama bölümü haricinde istenilen sıcaklık değişimine ulaşıldığını göstermekte olup son bölümde gerçekleşen sıcaklık artışının

donmuş ürünle çözünmüş ürün dielektrik özellikler arasındaki farktan kaynaklanmıştır. Proses edilen iki ürün arasında ise yüzey sıcaklık değişimleri açısından 2 - 3 °C'lik bir sıcaklık farkı meydana gelmiştir (Şekil 4.27.c).



Şekil 4.27 Dondurulmuş 2 Morina balığın dur – kalk yöntemi ile çözdürülmesi, deneme-2

Bu çalışmalar sonucunda dondurulmuş morina balıklarının çözdürme prosesinde dur – kalk MW güç uygulama yöntemimin şekil 4.27'de görüldüğü şekilde uygulanmasına, deneyler sırasında her balık örneğinde iki ölçüm yapılmasına ve proses sırasınca balık

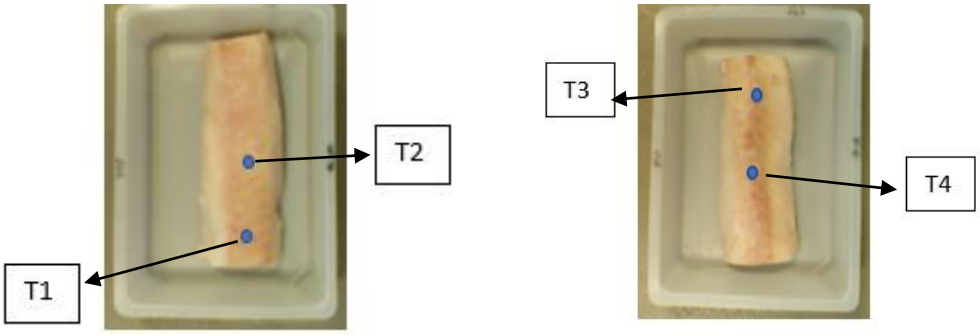
örneklerinin sıcaklığının dengeye gelmesi için +4 °C'de depolanmalarına karar verilmiştir. Şekil 4.28 bu deneylerde kullanılan fiber optik probların yerini göstermektedir.

Çizelge 4.1, bu aşamada çözdürme deneylerinde kullanılacak olan morina balıklarının (4 ayrı deneysel çalışmada kullanılan 8 balık örneği) geometrik ölçülerini göstermektedir Her deney çalışmasında özellikle birbirine yakın boyuttaki ürünler tercih edilerek ürün boyutunun sıcaklık profili üzerine etkisi kapsamında karşılaştırmalarda yapılmıştır.

Çizelge 4.1 Dondurulmuş Morina balıklarının yaklaşık boyutları

Proses		Genişlik (cm)	Derinlik (cm)	Yükseklik (cm)
Deney-1	Ürün-1	15.1	5.6	3
	Ürün-2	15	5.5	3.2
Deney-2	Ürün-3	13.2	6.5	3.3
	Ürün-4	13.1	7.1	3.4
Deney-3	Ürün-5	14.9	6.4	3.2
	Ürün-6	14.9	5.8	2.8
Deney-4	Ürün-7	17.2	5.7	3.1
	Ürün-8	17.3	5.7	3

EK 5 şekil 1, belirtilen 4 deneyde elde edilen sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Bu sonuçlara göre T1, yani mikrodalga tabağın sol tarafında konumlandırılan morina balığın görüntüye göre alt bölgesinde gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinde göre bütün deneylerde sıcaklık 0 °C'nin üstüne istenmeyen şekilde çıkmıştır. Buna göre ürün içerisinde önemli bir sıcaklık farkı olduğu düşünülerek MW uygulaması sonrası örneklerin +4 C'de bekletilerek hem aşırı sıcaklık yükselmesinin etkilerinin azaltılması hem de çözdürme prosesi kapsamında endüstriyel proses koşulları için bir yöntem önerilmesi düşünülmüştür.



Şekil 4.28 Dondurulmuş 2 Morina balığına prosesten önce yerleştirilen fiber optiklerin konumu

T1 ve T4 görüntünün sağ ve sol tarafından 2 cm derinliğe, T2 ve T3 görüntünün alt ve üst tarafından ortasından 2 cm derinliğe yerleştirilmiştir

Çalışmanın son aşamasında şekil 4.40'da sıcaklık değişimleri gösterilen örnekler +4 °C'de çizelge 4.2'de gösterildiği şekilde son sıcaklık değerleri >0 dolana kadar depolanmışlardır. Bu süreçte iç sıcaklık değişim değerleri kaydedilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 MW prosesinden sonra balıkların her saat başı iç sıcaklık değerleri

Proses		1.saat	2.saat	3.saat	4.saat	5. saat
Deney-1	Ürün-1 (T1/T2)	-1.1/-0.7	-1/-0.6	0.5/0.9	1.7/3.3	-
	Ürün-2 (T3/T4)	-0.8/-0.8	-0.7/-0.6	-0.7/-0.5	-0.5/-0.3	2.4/3.5
Deney-2	Ürün-3 (T1/T2)	-0.7/-1.1	-0.2/-0.3	2/3	-	-
	Ürün-4 (T3/T4)	-1/-1.4	-0.8/-1.1	-0.3/-1	2.6/0.8	-
Deney-3	Ürün-5 (T1/T2)	-0.8/-1.1	-0.5/-1	-0.7/-0.2	2.4/3.6	
	Ürün-6 (T3/T4)	-1.1/-1.2	-0.8/-0.9	-0.6/-0.2	2.4/3.5	-
Deney-4	Ürün-7 (T1/T2)	-0.8/-1.5	-0.4/-1.4	2.7/-0.3	3.3/2.5	-
	Ürün-8 (T3/T4)	-0.9/-1.1	0/-0.1	1.8/3.4	-	-

Bu deneyler sırasında MW uygulama sonrası, ürünlerin etrafını saran buz kalıbının tamamen erimediği gözlenirken +4 °C'de depolama sürecinde bu tabakanın eridiği

belirlenmiştir. MW uygulama sırasında, buz dielektrik özelliklerine ve ince film tabakasına bağlı olarak bu tabakanın güç absorbe edemediği ve edebildiği gücü de ısı enerjisine çeviremediği doğrulanmış ve bu durumun MW çözdürme proseslerinde ürün yüzey sıcaklık değişimlerinin kontrol edebilmek amacıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.

Matzler ve Wegmuller (1987) buzun sıcaklığa bağlı değişimlerini belirtmişler; saf buzun dielektrik sabitinin -30 – 0 °C aralığında 3.16 – 3.19 bağıl dielektrik kayıp faktörü değerinin ise aynı sıcaklık aralığında 2×10^{-4} – 5×10^{-4} aralığında değiştiğini göstermişlerdir. Rattanadecho (2004) MW uygulaması sırasında aynı kap içerisinde buz ya da suyun üstte ya da altta olması durumunda meydana gelen sıcaklık artışını incelemiştir. Bu çalışmada da buzun dielektrik özelliklerinden dolayı elektromanyetik alana karşı transparan özellik gösterdiğini ve sıcaklık değişimin çok az olduğunu deneysel olarak gösterilmiştir. Suyun, buz kalıbının üzerinde olması durumunda ise dielektrik özelliklerine bağlı olarak elektromanyetik enerjiyi absorbe ederek buza göre çok daha fazla ısındığı da ayrıca belirlenmiştir. Buna benzer şekilde dondurulmuş morina balıklarının çözdürülmesinde de balıklarda sıcaklık artışları oluşurken balıkları çevreleyen ince buz filminin varlığını koruduğu ve ürün yüzey sıcaklık değişimlerini kontrol edebildiği gözlenmiştir. Proses sonrasında buz kalıbının tamamen erimemesiyle ürünün daha rahat proses edilebileceği ve transportunun kolay olacağından önemli bir durum olarak düşünülmektedir.

5. SONUÇ

MW sistemler üründe hacimsel ve hızlı bir ısınma sağlamaktadır. Ancak kavite içerisinde homojen olmayan elektromanyetik alandan dolayı üründe tekdüze bir sıcaklık elde edilememesi durumu farklı proses koşullarında ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında Gigatherm (Flawil, Switzerland) tarafından tasarlanan ve 4 bar'a kadar uygulanabilen basınç koşullarında çalışabilen silindirik kaviteli bir MW sistemi kullanılarak ısıtma ve çözdürme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sistem içi elektrik alan ve ürün sıcaklık değişimlerini belirleyebilmek amacıyla Comsol V. 5.1 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) kullanılarak matematiksel model çalışmaları yapılmış ve model sonuçları %77 su oranında Tylose kullanılarak gerçekleştirilen ısıtma ve çözdürme deneysel verileri ile doğrulanmıştır. Matematiksel model ve deneysel çalışma sonuçları kullanılarak ürünün MW sistem içerisindeki konumu, proses sırasında uygulanan dönme prosesinin etkisi ve kavite içerisinde 2 bar basıncın ürün sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarına göre;

- Tylose ile gerçekleştirilen ısıtma ve çözdürme deneyleri ve matematiksel model sonuçları doğrultusunda ürünün MW sistem içerisindeki konumunun ürün sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir.
- Kavite içerisinde bulunan tablanın proses sırasında dönmesinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi hem merkez hem de merkez dışı konumda incelenmiş, merkez dışında dönme ile üründe daha tekdüze bir sıcaklık profili oluştuğu göstermiştir. Bu durum matematiksel model sonuçları kullanılarak ürünün absorbe ettiği güç miktarının kavite merkezinde dönme uygulanmayan duruma göre daha fazla olduğuna bağlı olarak açıklanmış ve ürünün dönme hareketi ile daha farklı konumlarda elektromanyetik alana maruz kaldığı gösterilmiştir.
- MW sistem içerisinde 2 bar basınç altında Tylose kullanılarak yapılan ısıtma ve çözdürme proseslerinin sonuçları atmosferik basınç altındaki sonuçlarla karşılaştırılmış, kavite içerisindeki 2 bar basıncın pastörizasyon koşullarında ($T<100$ °C) bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir. Bu durumda basınç altında MW uygulama prosesinin sterilizasyon kapsamında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

- Yüksek basınç altında yapılan çözdürme proseslerinde basıncın çözünme (donma) noktasını düşürdüğü bilinmektedir. Ancak, kavite içerisinde oluşturulan 2 bar basınç Tylose'un çözünme (donma) noktası üzerinde etkili olmadığından, basınç altında uygulanan MW çözdürme prosesinden etkin bir sonuç elde edilememiştir
- MW uygulama ile Tylose ısıtma ve çözdürme deneylerinden sonra endüstriden elde edilen dondurulmuş morina balıkları ürün olarak kullanılmıştır. Proses sırasında kavite içerisinde oluşan elektromanyetik alandan faydalanmak için 2 ürün kullanılmıştır. Merkez dışı konumda dönme etkisiyle üründe tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edildiğinden dondurulmuş morina balıkları merkezden eşit uzaklıkta birbirine paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu aşamada MW sisteminde proses sırasında zamana bağlı dur – kalk güç seçeneği uygulanmış; ürünün dielektrik özelliklerinin donmuş kısımla çözünmüş kısım arasında farklılık olmasından ve çözünmeye başlayan kısımlarda sıcaklığın çok hızlı yükselmesinden dolayı proses sırasında kısa süreler için gücün kesilmesine karar verilmiştir. Bu sayede ürün içi ısı transferinin prosese etkili olması sağlanmış ve ürün sıcaklık artışları kontrol altında tutulabilmiştir.
- Dondurulmuş morina balıklarının MW prosesinden sonra ürün etrafındaki buz kalıbının buzun dielektrik özelliklerinin çok düşük olmasından dolayı erimediği ve bu durumun ürün yüzey sıcaklık artışlarının kontrol edilebilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Son 10 yıldır dielektrik çözdürme özellikle RF ve MW sistemler üzerine literatürde çalışmalar bulunmaktadır. MW dalga boyunun RF'e göre küçük olması ve kavite içerisinde homojen olmayan elektromanyetik alan dağılımı yüzünden deneysel sonuçlarda sıcak ve soğuk noktalar oluştuğu literatürde yapılan çalışmalarda sunulmuştur. Üründe tekdüze sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi için ürünün geometrisi, MW sistem içerisindeki konumu, kavitede içerisinde uygulanan dönme etkisi ve kullanılan güç miktarı üzerine deneysel veriler ve matematiksel model çalışmaları yapılmıştır. Ancak gıda endüstrisinde çözdürme prosesinde kullanılacak MW sistem çalışmaları sınırlıdır. Bu çalışmada kullanılan MW sistemin özelliği ile diğer çalışmalarda olmayan proses sırasında kavite içerisinde basınç oluşumunun ısıtma ve

çözdürmeye etkisi ilk defa incelenmiştir. Çözdürme prosesi için yeterli olmayan 2 bar basıncın özellikle sterilizasyon prosesi için önemli olabileceği gösterilmiştir.

Kullanılan MW sistem kavitesinin silindirik ve kenar birleşim yerlerinin kavisli olmasının elektromanyetik alanın kavite içerisinde daha homojen dağılımını sağladığı geliştirilen matematiksel modellerle gösterilmiştir. Sistemde kullanılan magnetronun proses sırasında sabit güç üretebilmesi ve proses öncesinde gücün zamana bağlı olarak dur – kalk şablonu ile kurgulanması çalışmalar için önemli bir avantaj sağlamıştır. MW çözdürme prosesinde dondurulmuş morina balıkları kullanılarak elde edilen sonuçların gıda endüstrisine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

MW sistemin deneysel veriler ile doğrulanan matematiksel model bu sistemde yapılacak diğer projelere ışık tutacaktır. Literatürde MW prosesinin dönme etkisi sadece merkez konum için matematiksel modellemesi yapılabilmiştir. Bu eksiklikten dolayı MW proseslerin etkinliği ve araştırılması deneme yanılma ile yürütülmektedir. Bu tez çalışmasında ürünün hem merkez hem de merkez dışı konumda proses sırasında sürekli hareket ettirilmesi ilk defa modellenmiştir. Gigatherm (Flawil, Switzerland) tarafından tasarlamış olan bu MW sistemin büyüklüğü gıda endüstrisi için yeterli olmayıp endüstriyel proses koşullarının belirlenmesi için de çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda geliştirilen matematiksel modellerin etkin olarak kullanılabileceği ve geliştirilecek olan sistemlerde, kavite içerisinde dönme etkisi ile gerçekleştirilen etkinin, ürünün bir tünel içerisinde teflon bant üzerindeki hareketi ve farklı sayıda magnetronun kullanılması ile de elde edilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Anonymous. 2001. Web sitesi: https://www.microwaves101.com/encyclopedias/ history -of-the-microwave-oven. Erişim Tarihi: 02.08.2017.

Anonymous. 2002. Web sitesi: http://ferruherdogdu.com/software/software-for-industrial- freezing/. Erişim Tarihi: 05.10.2017.

Anonymous. 2004. Web sitesi: http://aem.asm.org/content/70/7/4021/F1. expansion. html. Erişim Tarihi: 12.07.2017.

Anonymous. 2008. Web sitesi: http://mikrodalgauygulamalari.blogspot.com.tr/. Erişim Tarihi: 12.08.2017.

Anonymous. 2009. Web sitesi: http://www.disticaret.biz.tr/2016/10/su-urunleri-ihracati-ve-ithalati.html. Erişim Tarihi: 17.11.2017.

Anonymous. 2017. Web sitesi: https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/. Erişim Tarihi: 24.09.2017.

Anonymous. 2017. Web sitesi: https://www.britannica.com/technology/magnetron. Erişim Tarihi: 25.09.2017.

Anonymous. 2017. Web sitesi: http://www.fao.org/fishery/facp/NOR/en#Country Sector-Statistics. Erişim Tarihi: 15.10.2017.

Archer, M., Edmonds, M. and George, M. 2008. Seafood thawing. Seafish Res Dev SR, 598, 10-11.

Backi, C. J. 2017. Methods for (industrial) thawing of fish blocks: A review. Journal of Food Process Engineering.

Bedane, T. F., Chen, L., Marra, F. and Wang, S. 2017. Experimental study of radio frequency (RF) thawing of foods with movement on conveyor belt. Journal of Food Engineering, 201, 17-25.

Cheng, D. K. 2012. Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri. Palme Yayıncılık, 493, Ankara

Chen, F., Warning, A. D., Datta, A. K. and Chen, X. 2016. Thawing in a microwave cavity: Comprehensive understanding of inverter and cycled heating. Journal of Food Engineering, 180, 87-100.

Chevalier, D., Le Bail, A. and Ghoul, M. 2000. Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part II. Comparison between freezing at atmospheric pressure and pressure-shift freezing. Journal of Food Engineering, 46(4), 287-293.

Erdogdu, F., Altin, O., Marra, F. and Bedane, T. F. 2017. A computational study to design process conditions in industrial radio-frequency tempering/thawing process. Journal of Food Engineering.

Farag, K.W., Duggan, E., Morgan, D.J., Cronin, D.A. and Lyng, J.G. 2009. A comparison of conventional and radio frequency defrosting of lean beef meats: Effects on water binding characteristics. Meat science, 83(2), 278-284.

Flores, E.M.M. (Ed.). 2014. Microwave-assisted sample preparation for trace element determination – Chapter2, 17, Boston.

Galazka, V.B., and Ledward, D.A. 1995. Developments in high pressure food processing. Food Technology International Europe, 12, 123-125.

Geedipalli, S.S.R., Rakesh, V. and Datta, A. K. 2007. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. Journal of Food Engineering, 82(3), 359-368.

Knoerzer, K., Regier, M. and Schubert, H. 2008. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 9(3), 374-384.

LeBail, A., Chevalier, D., Mussa, D.M. and Ghoul, M. 2002. High pressure freezing and thawing of foods: a review. International Journal of Refrigeration, 25(5), 504-513.

Li, B. and Sun, D.W. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods–a review. Journal of food engineering, 54(3), 175-182.

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

Llave, Y., Liu, S., Fukuoka, M. and Sakai, N. 2015. Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods. Journal of Food Engineering, 152, 32-42.

Llave, Y., Mori, K., Kambayashi, D., Fukuoka, M. and Sakai, N. 2016. Dielectric properties and model food application of tylose water pastes during microwave thawing and heating. Journal of Food Engineering, 178, 20-30.

Makita, T. 1992. Application of high pressure and thermophysical properties of water to biotechnology. Fluid Phase Equilibria, 76, 87-95.

Marra, F., Lyng, J., Romano, V. and McKenna, B. 2007. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model. Journal of Food Engineering, 79(3), 998-1006.

Matzler, C. and Wegmuller, U. 1987. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies. Journal of Physics D: Applied Physics, 20(12), 1623.

Oliveira, M.E.C. and Franca, A.S. 2002. Microwave heating of foodstuffs. Journal of Food engineering, 53(4), 347-359.

Otero, L., Ousegui, A., Guignon, B., Le Bail, A. and Sanz, P. D. 2006. Evaluation of the thermophysical properties of tylose gel under pressure in the phase change domain. Food hydrocolloids, 20(4), 449-460.

Pitchai, K., Birla, S.L., Subbiah, J., Jones, D. and Thippareddi, H. 2012. Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens. Journal of Food Engineering, 112(1), 100-111.

Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., Gonzalez, R., Jones, D. and Subbiah, J. 2014. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: development and validation. Journal of Food Engineering, 128, 60-71.

Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., Jones, D. and Subbiah, J. 2016. Modeling microwave heating of frozen mashed potato in a domestic oven incorporating electromagnetic frequency spectrum. Journal of Food Engineering, 173, 124-131.

Ragnarsson, S.Ö. and Viðarsson, J. R. 2017. Overview of available methods for thawing Seafood. Iceland Food and Biotech R&D. Report summary, 04-17, 2001-2280

Raj, J. D., Birla, S., Pitchai, K., Subbiah, J. and Jones, D. 2011. Modeling of Microwave Heating of a Rotating Object in Domestic Oven. In Excerpt from the Proceedings of the 2011 Comsol Conference, Boston.

Rattanadecho, P. 2004. Theoretical and experimental investigation of microwave thawing of frozen layer using a microwave oven (effects of layered configurations and layer thickness). International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(5), 937-945.

Rouillé, J., Lebail, A., Ramaswamy, H. S. and Leclerc, L. 2002. High pressure thawing of fish and shellfish. Journal of Food Engineering, 53(1), 83-88.

Saxena, V. 2014. Microwave Synthesis: a Physical Concept-Microwave Heating (ed U. Chandra), 2011.

Schubring, R., Meyer, C., Schlüter, O., Boguslawski, S. and Knorr, D. 2003. Impact of high pressure assisted thawing on the quality of fillets from various fish species. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 4(3), 257-267.

Siguemoto, É.S. and Gut, J.A.W. 2016. Dielectric properties of cloudy apple juices relevant to microwave pasteurization. Food and Bioprocess Technology, 9(8), 1345-1357.

Singh, R.P. and Heldman, D.R. 2001. Introduction to food engineering. Gulf Professional Publishing London.

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

Uyar, R., Erdogdu, F. and Marra, F. 2014. Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes: A computational study. Food and bioproducts processing, 92(3), 243-251.

Uyar, R., Bedane, T.F., Erdogdu, F., Palazoglu, T.K., Farag, K.W. and Marra, F. 2015. Radio-frequency thawing of food products–A computational study. Journal of Food Engineering, 146, 163-171.

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

Watanabe, S., Karakawa, M. and Hashimoto, O. 2010. Computer simulation of temperature distribution of frozen material heated in a microwave oven. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 58(5), 1196-1204.

Zhang, H. and Datta, A. K. 2003. Microwave power absorption in single-and multiple-item foods. Food and bioproducts processing, 81(3), 257-265.

Zhang, H., and Datta, A.K. 2005. Heating concentrations of microwaves in spherical and cylindrical foods: part two: in a cavity. Food and bioproducts processing, 83(1), 14-24.

Zhu, S., Ramaswamy, H.S. and Simpson, B.K. 2004. Effect of high-pressure versus conventional thawing on color, drip loss and texture of Atlantic salmon frozen by different methods. LWT-Food Science and Technology, 37(3), 291-299.

EKLER

EK 1 Tylose ısıl işlemler (ısıtma, çözdürme) proseslerinde deney ve matematiksel model noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

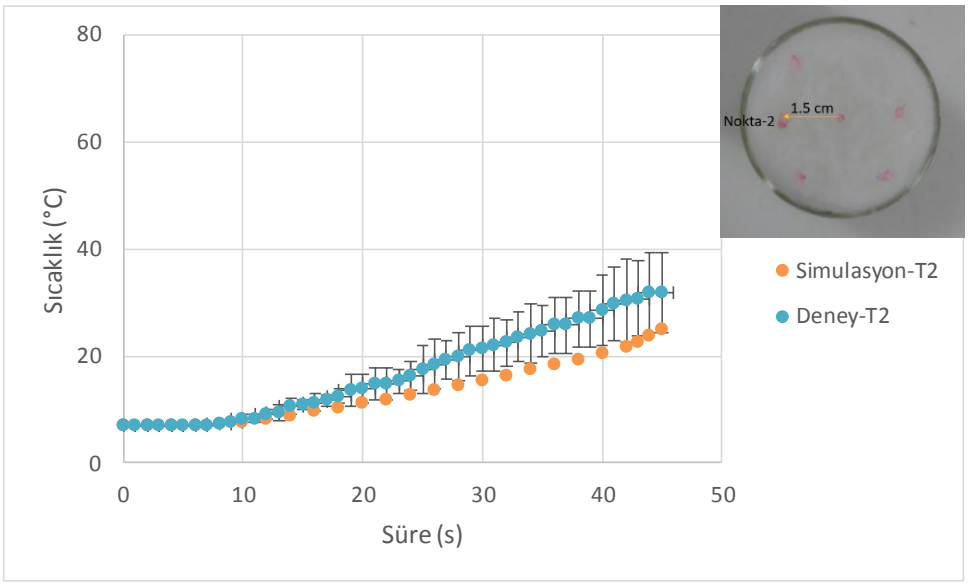
EK 2 Tylose ısıl işlemler (ısıtma, çözdürme) proseslerinin matematiksel modellerinde farklı duurmlarda ürün yüzey sıcaklık, hacim sıcaklık ortalamsı, maksimum sıcaklık ve absorbe edilen güç

EK 3 Tylose merkez – sabit durumda çözdürme prosesinde penetrasyon derinliği

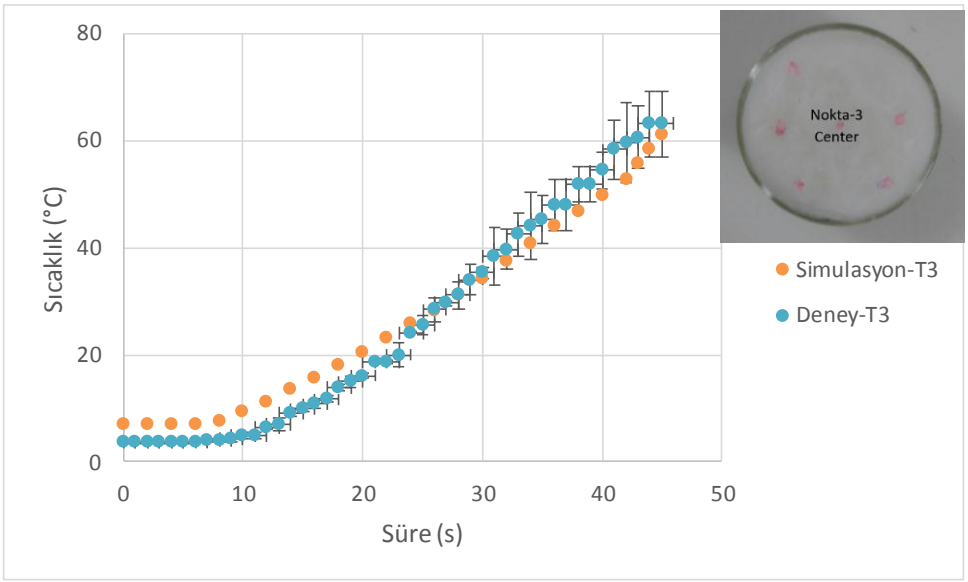
EK 4 Tylose ısıl işlem (ısıtma, çözdürme) proseslerinde merkez sabit durumda basınç altında (2 bar) ve atmosferik basınç altındaki deneylerin noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

EK 5 Dondurulmuş morina balıklarının dur – kalk güç uygulamasıyla çözdürülmesi

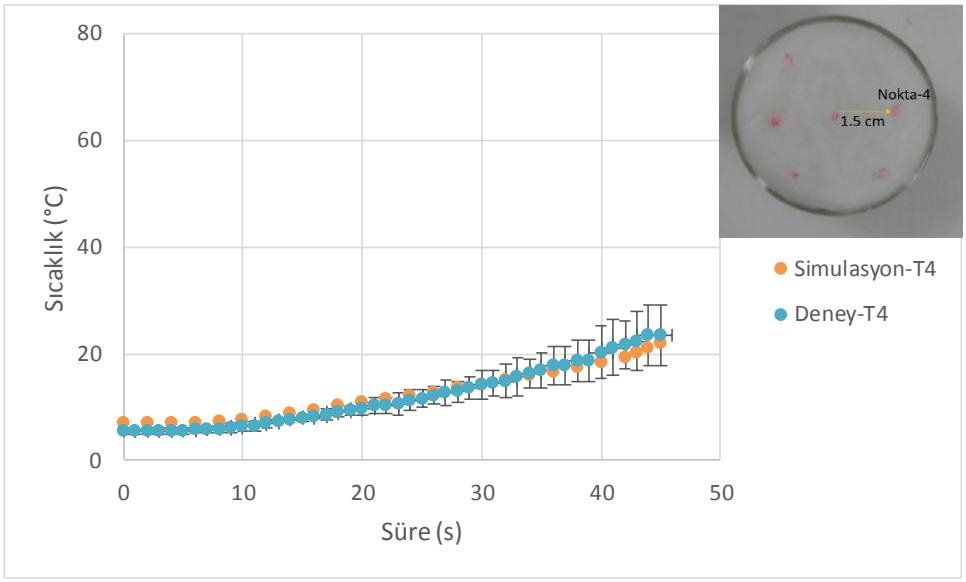
EK 1 Tylose ısıl işlemler (ısıtma, çözdürme) proseslerinde deney ve matematiksel model noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması



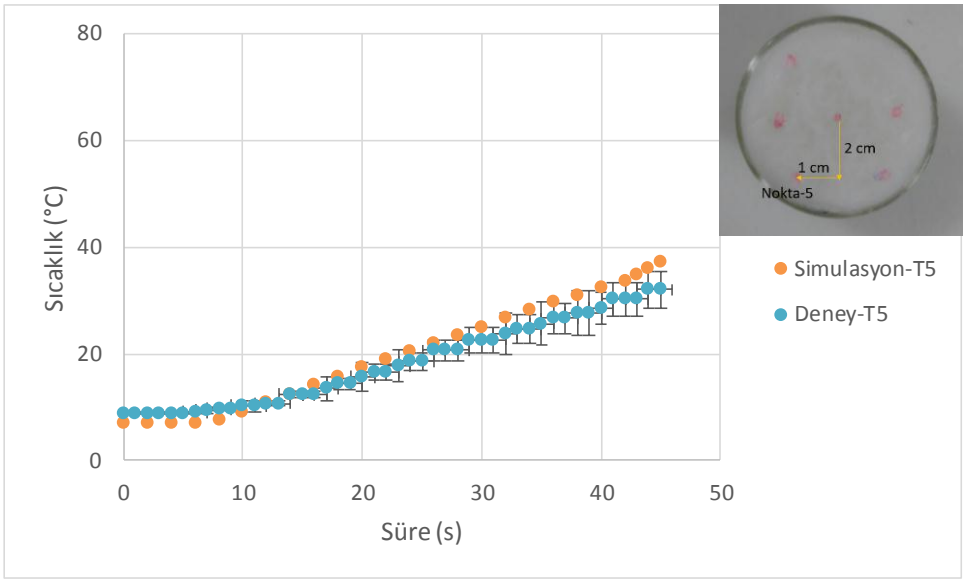
(a)



(b)

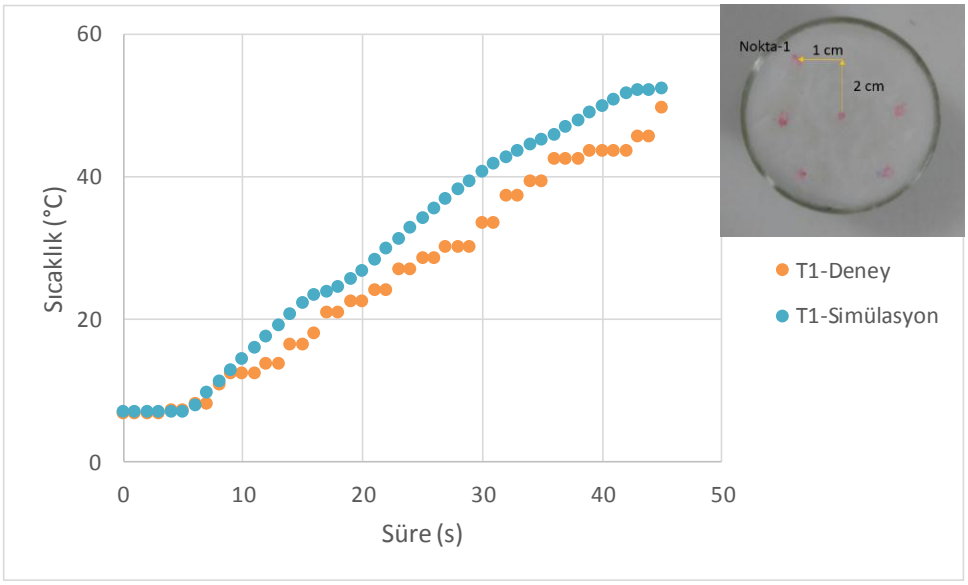


(c)

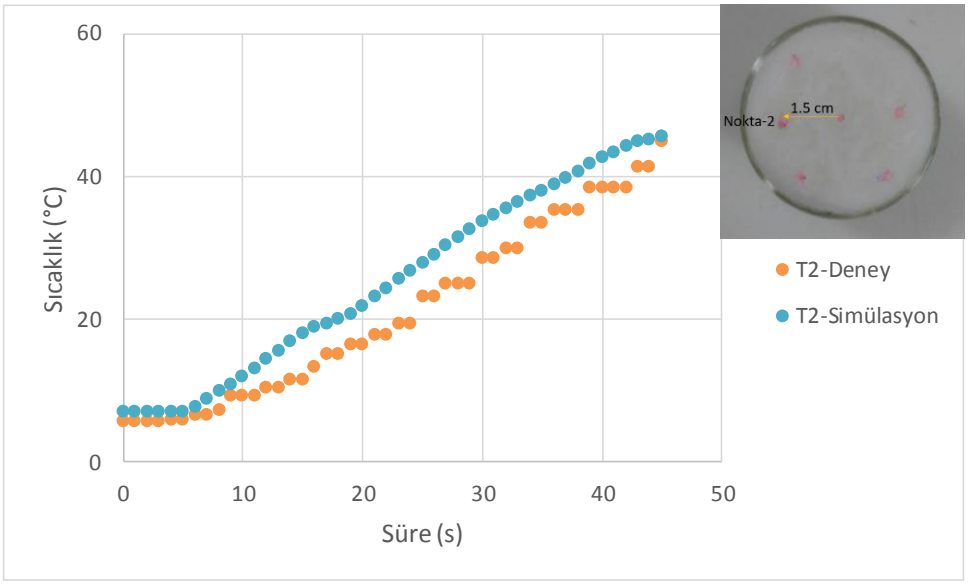


(d)

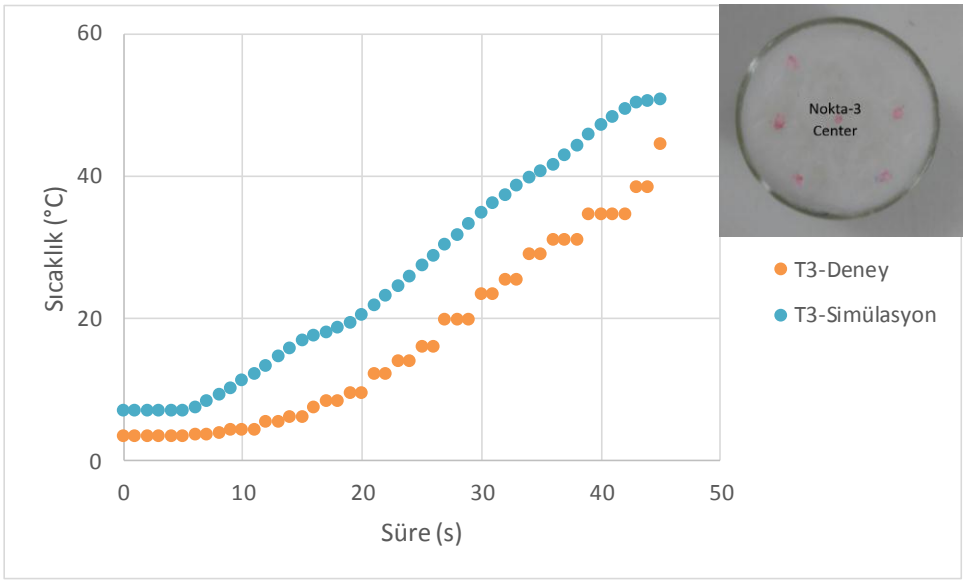
Şekil 1 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması


Sıcaklık (°C)
Süre (s)
Nokta-1
1 cm
2 cm
T1-Deney
T1-Simülasyon

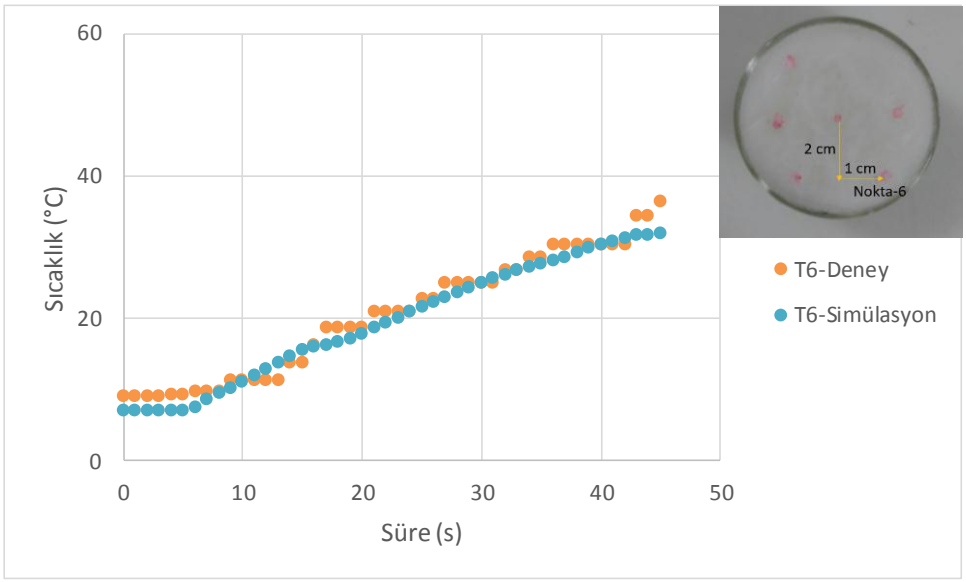
(a)


Sıcaklık (°C)
Süre (s)
Nokta-2
1.5 cm
T2-Deney
T2-Simülasyon

(b)

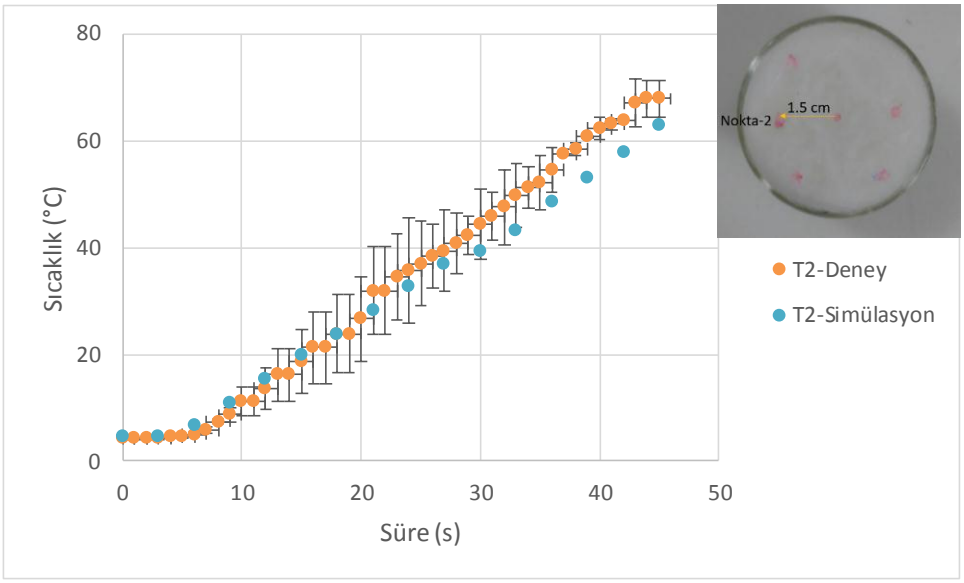


(c)

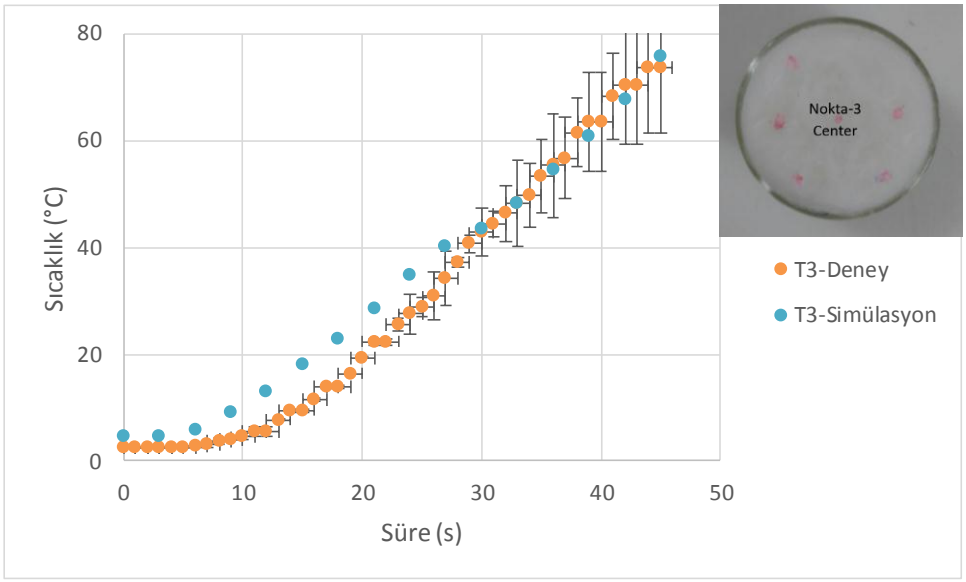


(d)

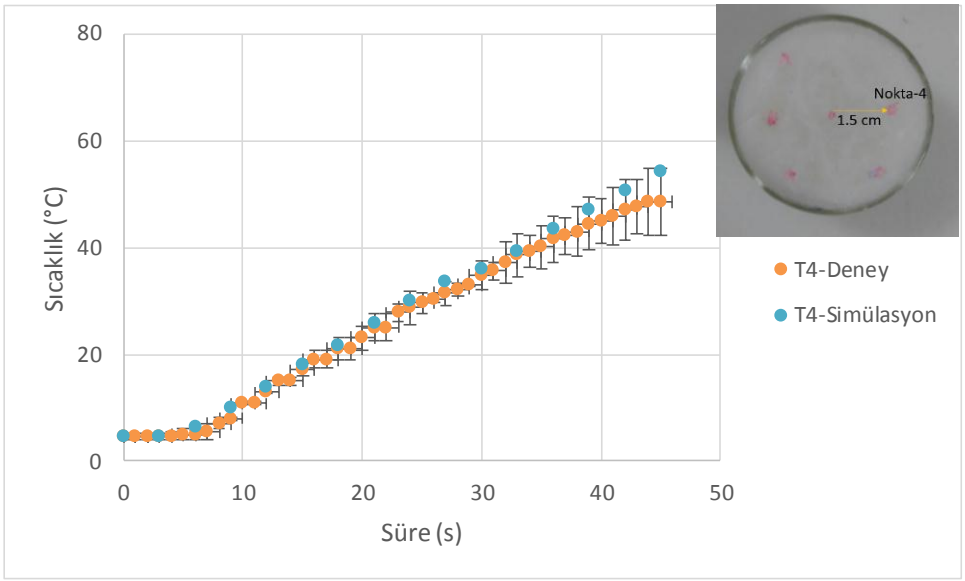
Şekil 2 Merkezde dönme işlemi uygulanan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması


Sıcaklık (°C)
Süre (s)
0
20
40
60
80
0
10
20
30
40
50
Nokta-2
1.5 cm
T2-Deney
T2-Simülasyon

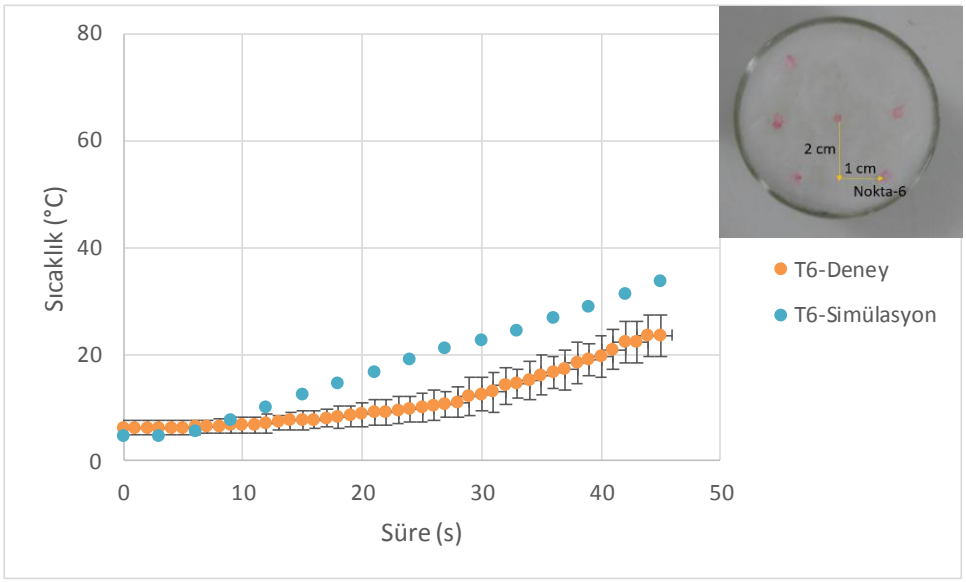
(a)


Sıcaklık (°C)
Süre (s)
0
20
40
60
80
0
10
20
30
40
50
Nokta-3
Center
T3-Deney
T3-Simülasyon

(b)

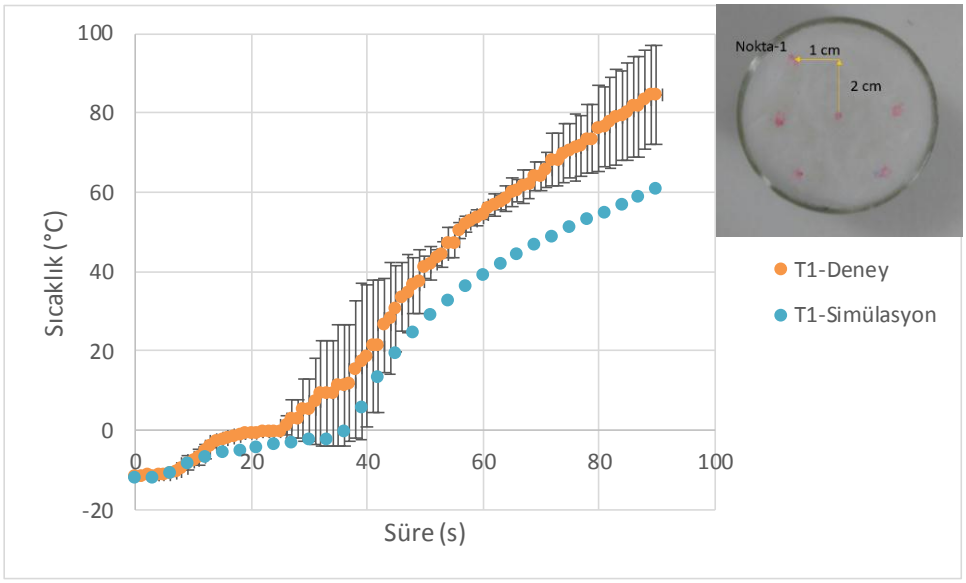


(c)

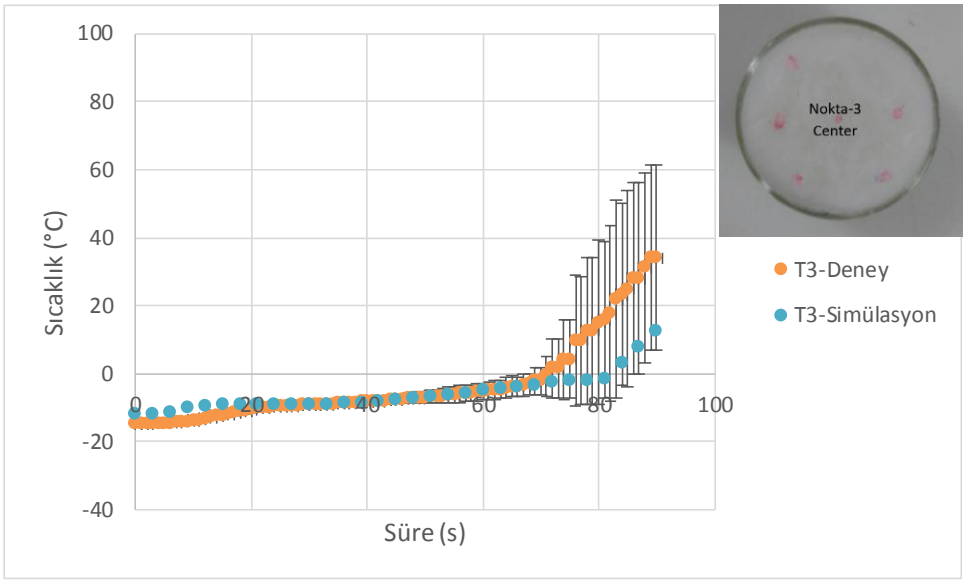


(d)

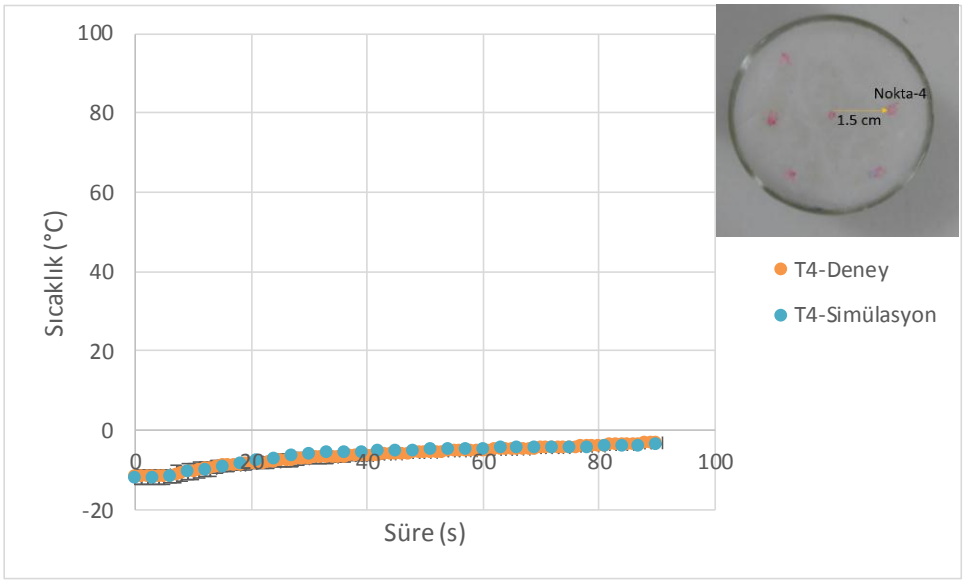
Şekil 3 Merkez dışında dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose ısıtma deney ve matematiksel model sonuçlarının noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması


Nokta-1
1 cm
2 cm
Sıcaklık (°C)
Süre (s)
T1-Deney
T1-Simülasyon

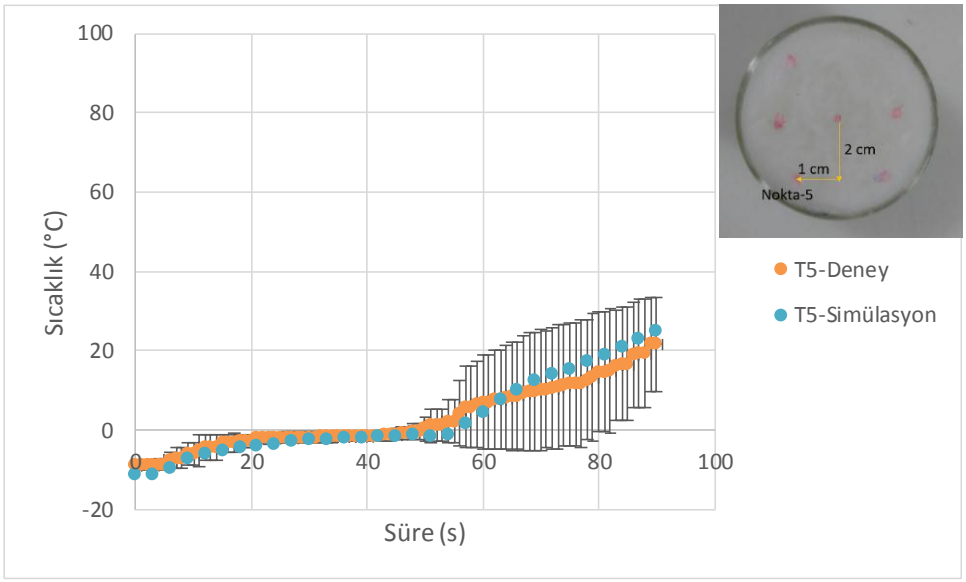
(a)


Nokta-3
Center
Sıcaklık (°C)
Süre (s)
T3-Deney
T3-Simülasyon

(b)

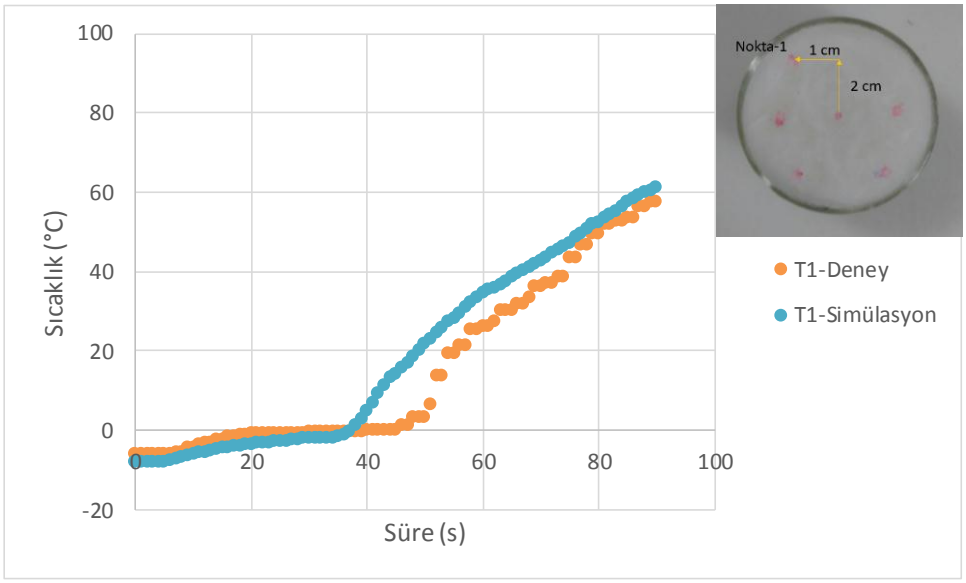


(c)

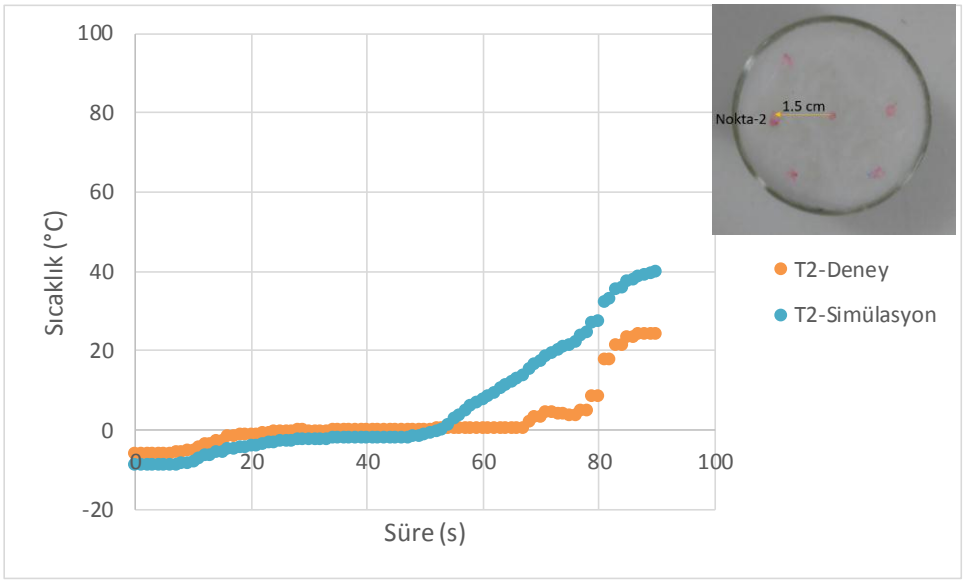


(d)

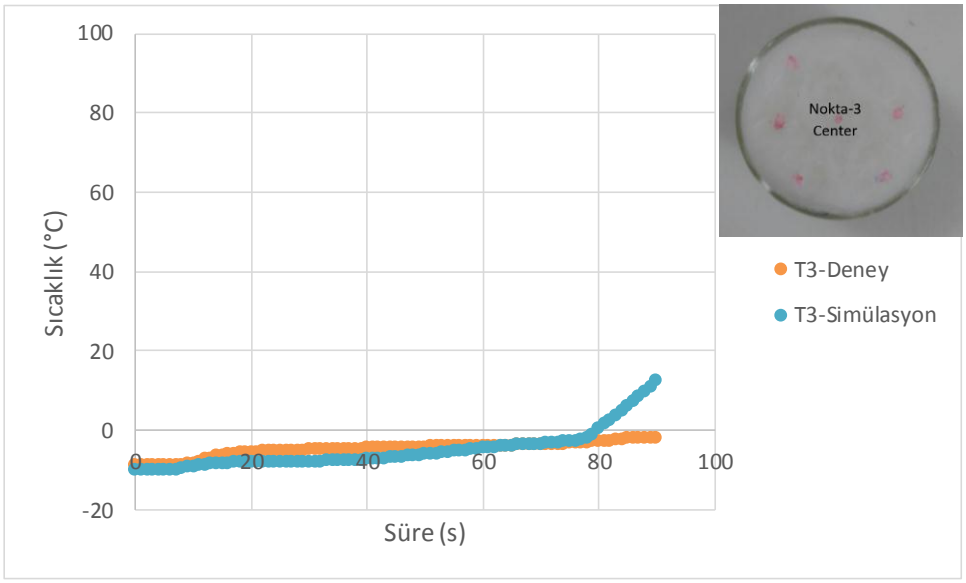
Şekil 4 Merkezde dönme işlemi uygulanmayan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması


100
80
60
40
20
0
-20
Sıcaklık (°C)
0
20
40
60
80
100
Süre (s)
Nokta-1
1 cm
2 cm
T1-Deney
T1-Simülasyon

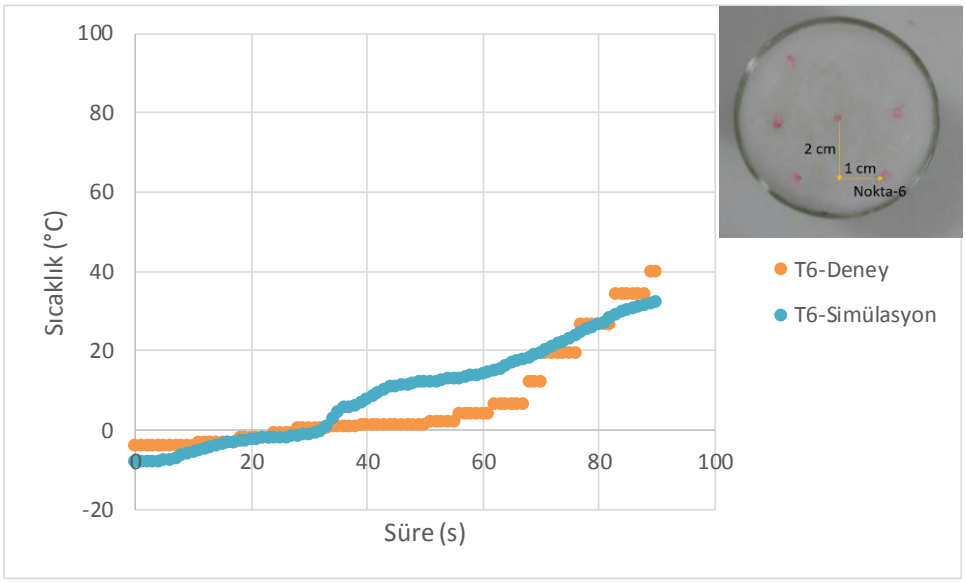
(a)


100
80
60
40
20
0
-20
Sıcaklık (°C)
0
20
40
60
80
100
Süre (s)
Nokta-2
1.5 cm
T2-Deney
T2-Simülasyon

(b)



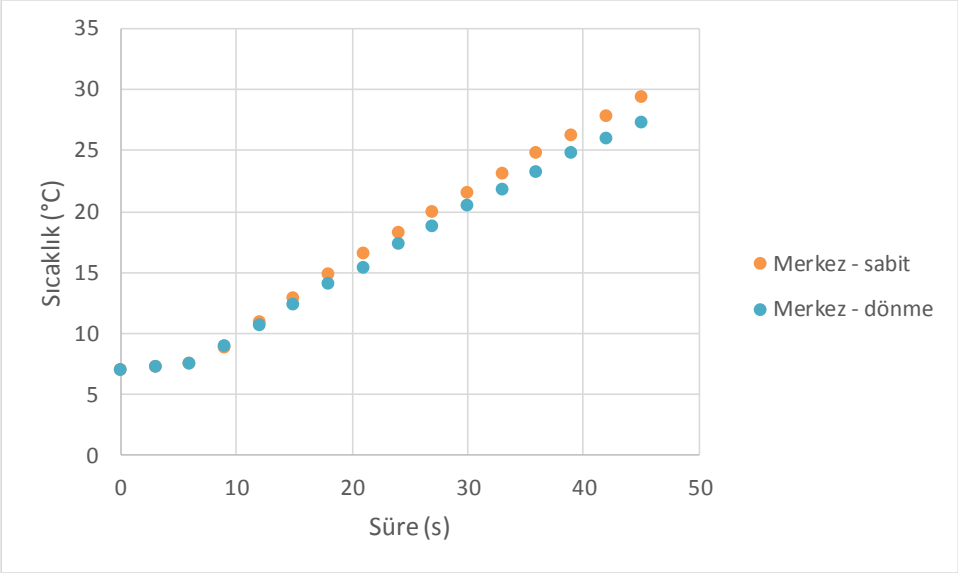
(c)



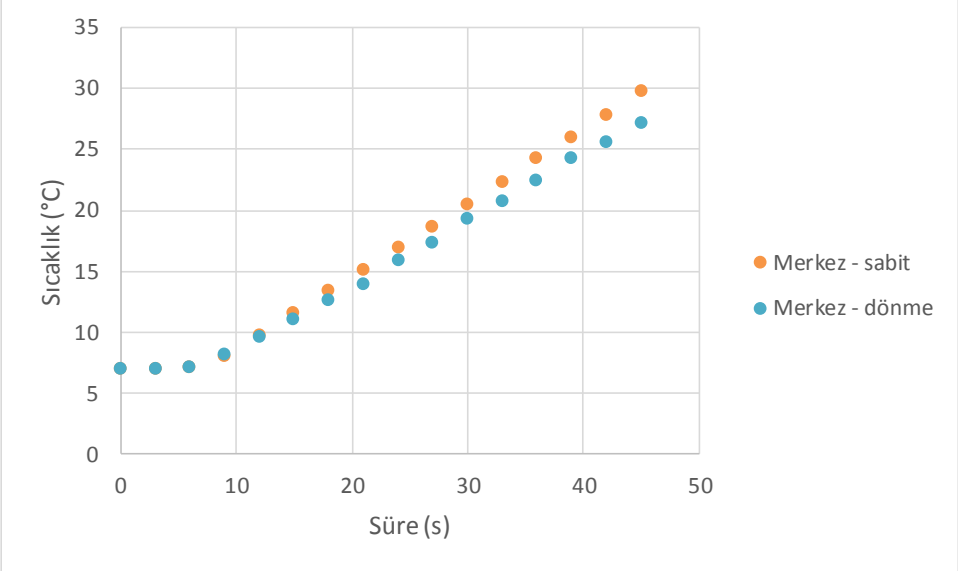
(d)

Şekil 5 Merkezde dönme işlemi uygulanan durumda Tylose çözdürme deney ve matematiksel model sonuçlarının noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

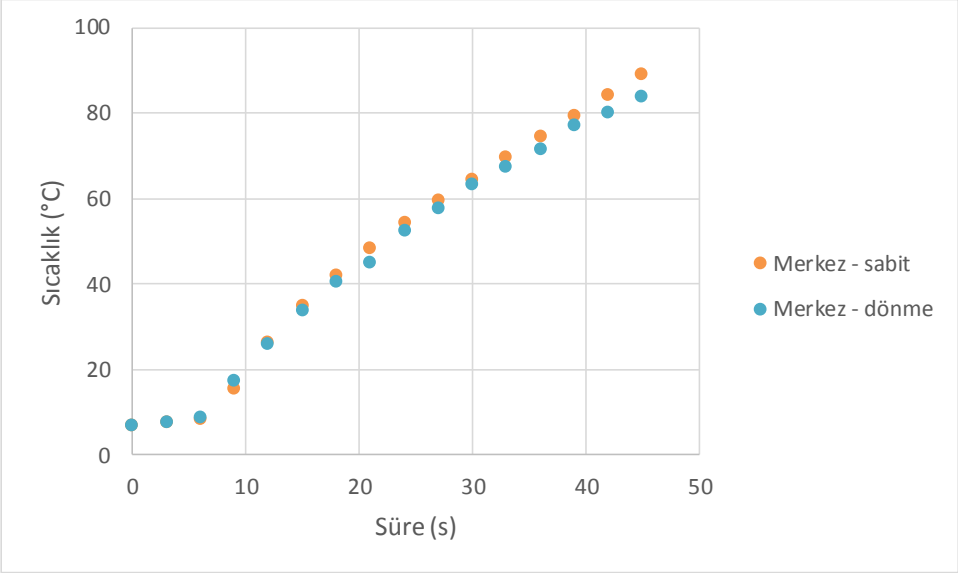
EK 2 Tylose ısıl işlemler (ısıtma, çözdürme) proseslerinin matematiksel modellerinde farklı duurmlarda ürün yüzey sıcaklık, hacim sıcaklık ortalaması, maksimum sıcaklık ve absorbe edilen güç



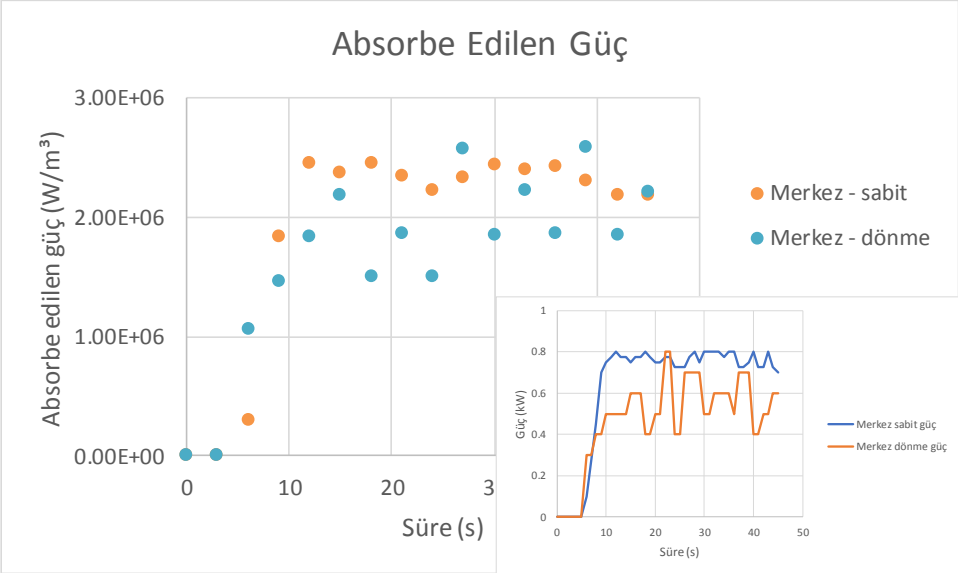
(a) yüzey sıcaklık ortalaması



(b)hacim sıckalık ortalaması

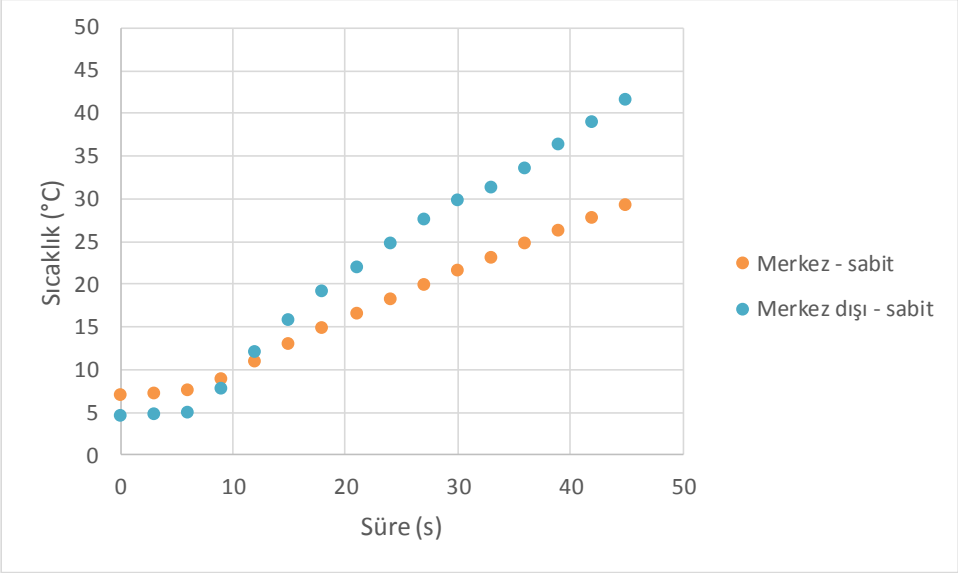


(c)maksimum sıcaklık

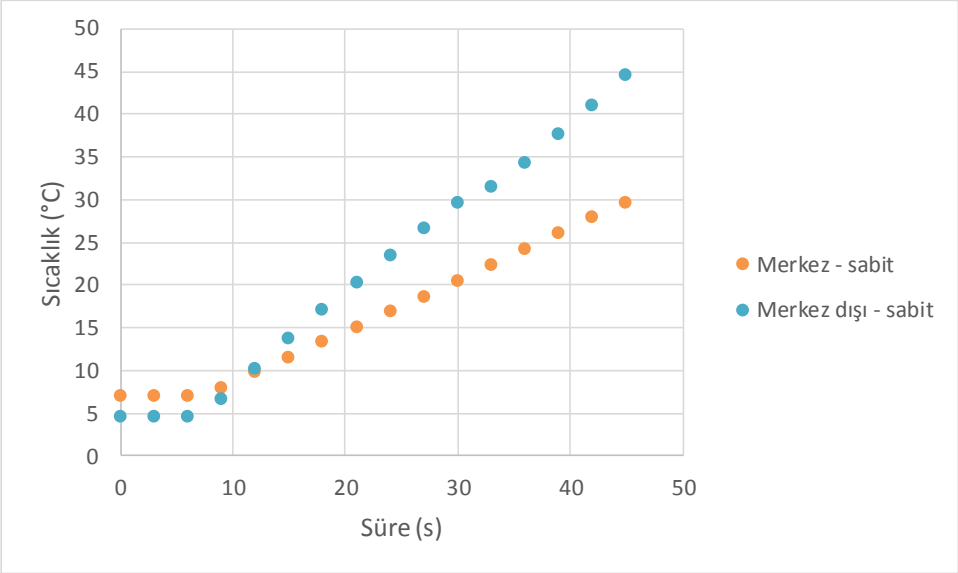


(d)absorbe edilen güç

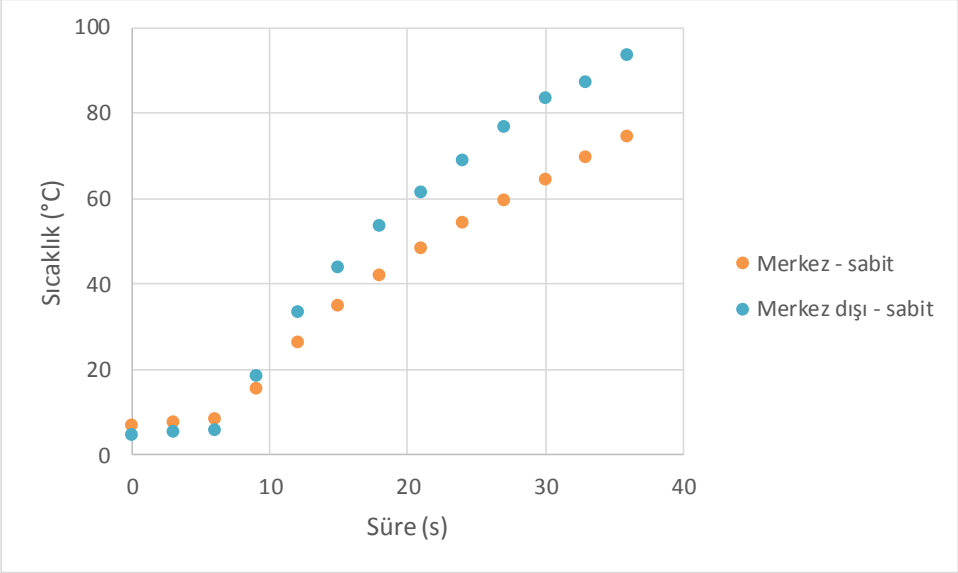
Şekil 1 Merkez – dönme ve Merkez – sabit durumlarda Tylose; (a) yüzey sıcaklık ortalaması, (b) hacim sıcaklık ortalaması, (c) maksimum sıcaklık, (d) absorbe edilen güç



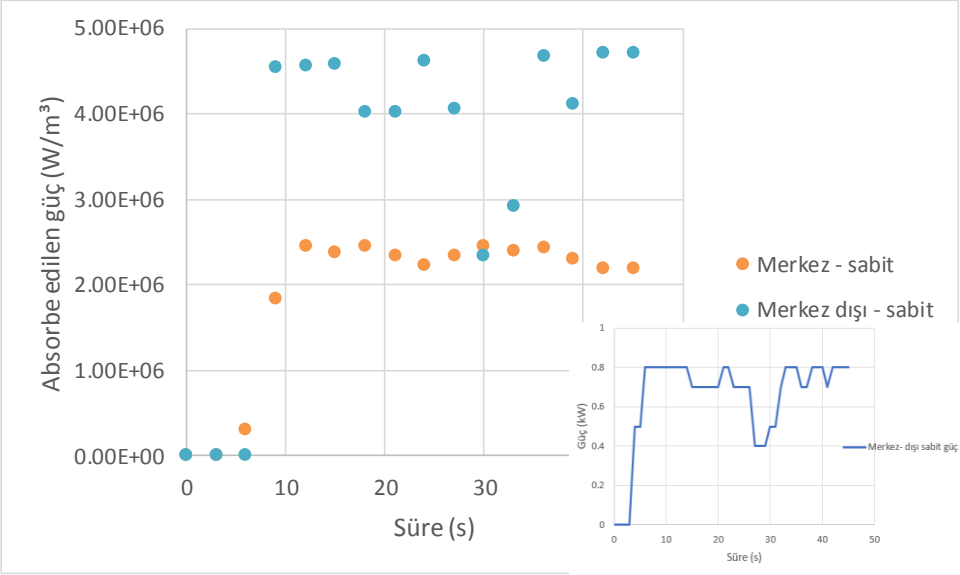
(a)yüzey sıcaklık ortalaması



(b)hacim sıcaklık ortalaması

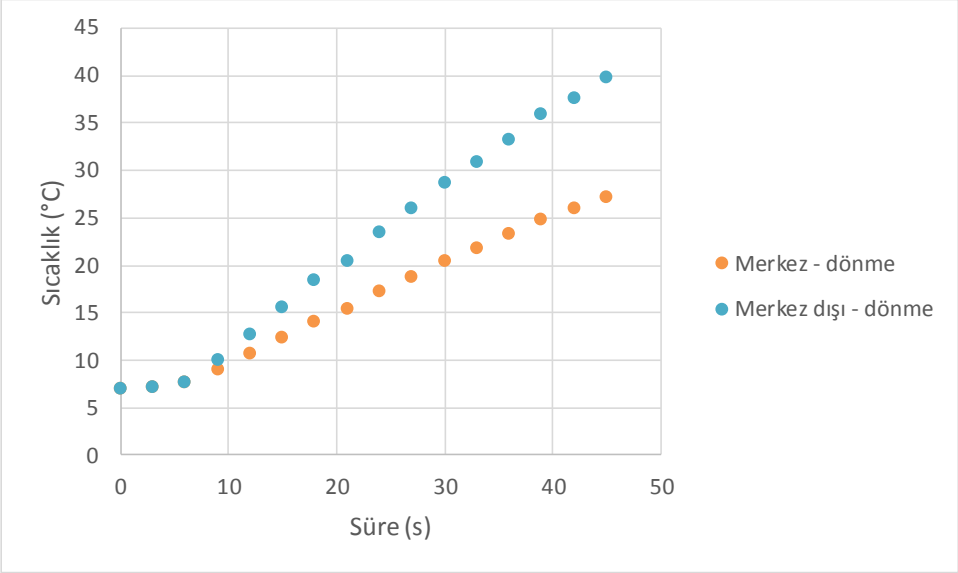


(c)maksimum sıcaklık

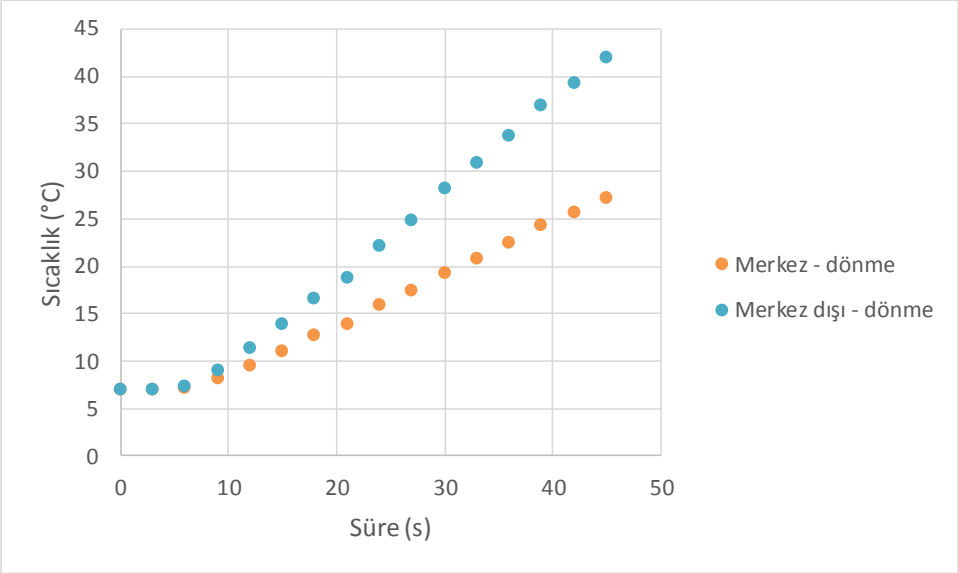


(d)absorbe edilen güç

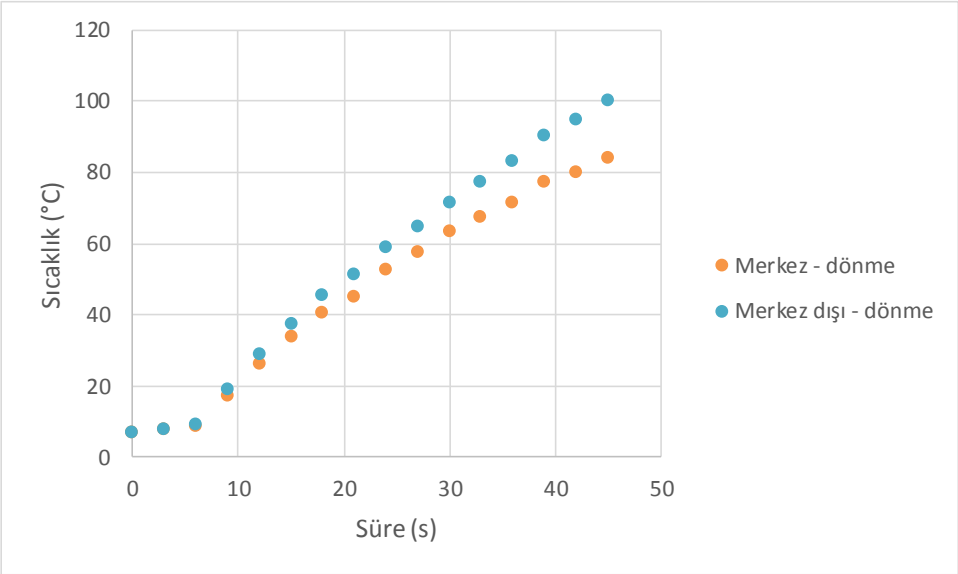
Şekil 2 Merkez – sabit ve Merkez dışı – sabit durumlarda Tylose; (a) yüzey sıcaklık ortalaması, (b) hacim sıcaklık ortalaması, (c) maksimum sıcaklık, (d) absorbe edilen güç



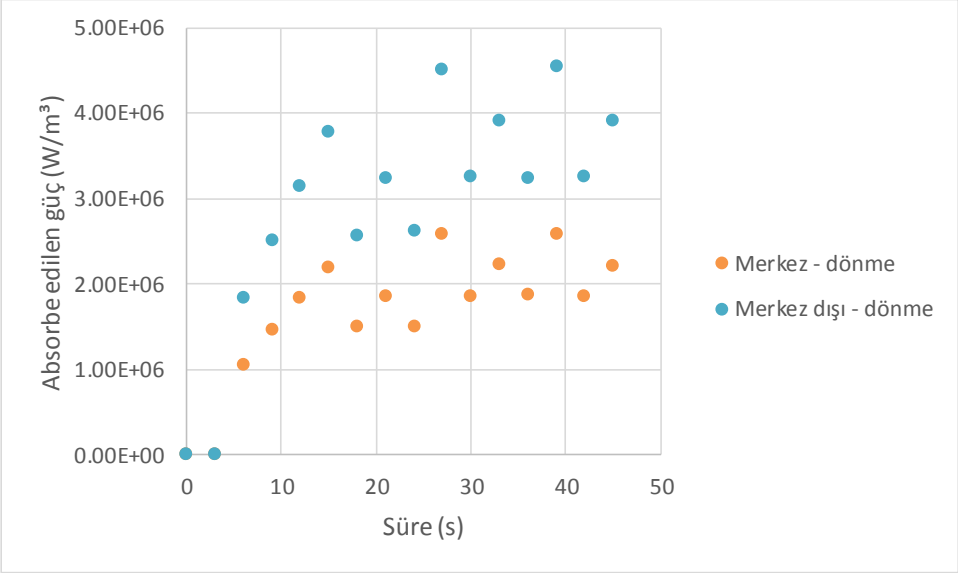
(a)yüzey sıcaklık ortalaması



(b)hacim sıcaklık ortalaması



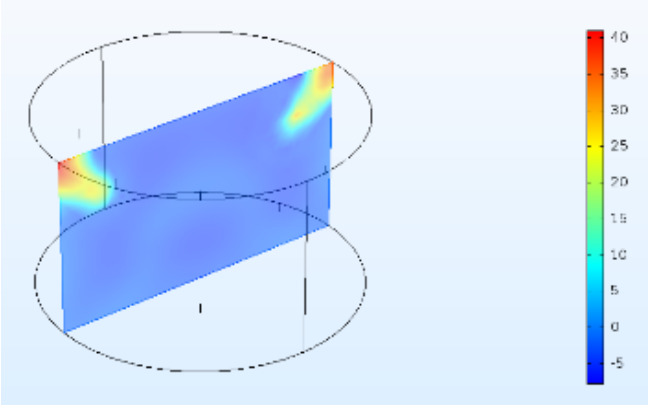
(c)maksimum sıcaklık



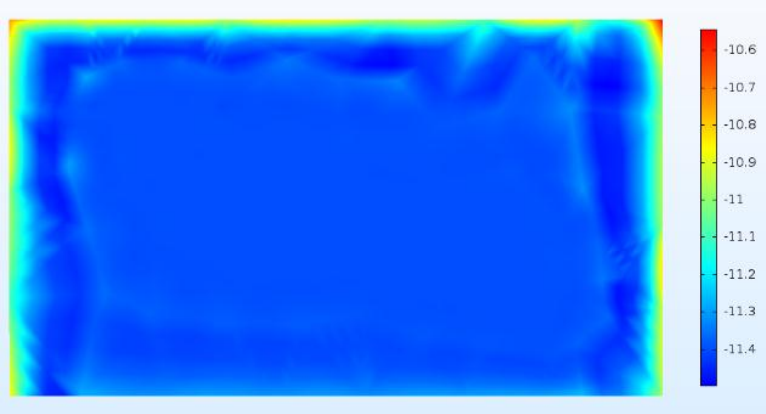
(d)absorbe edilen güç

Şekil 3 Merkez – dönme ve Merkez dışı – dönme durumlarda Tylose; (a) yüzey sıcaklık ortalaması, (b) hacim sıcaklık ortalaması, (c) maksimum sıcaklık, (d) absorbe edilen güç

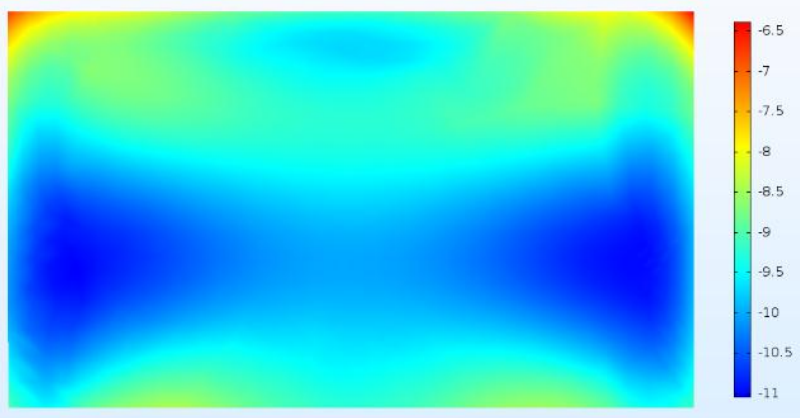
EK 3 Tylose merkez – sabit durumda çözdürme prosesinde penetrasyon derinliği



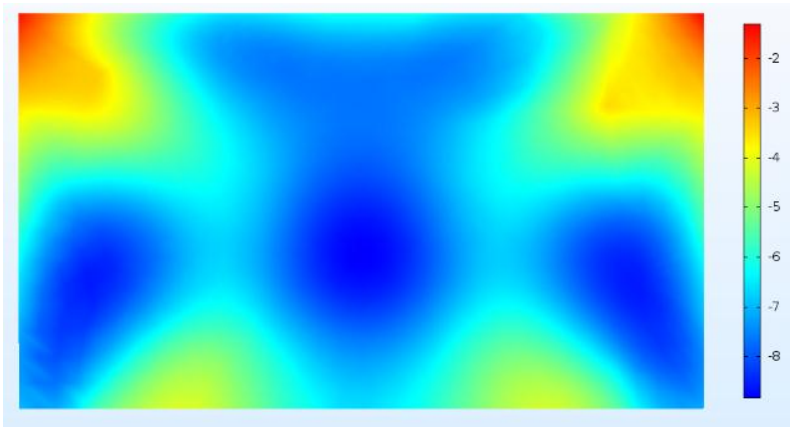
(a)penetrasyon derinliği incelendiği kesit



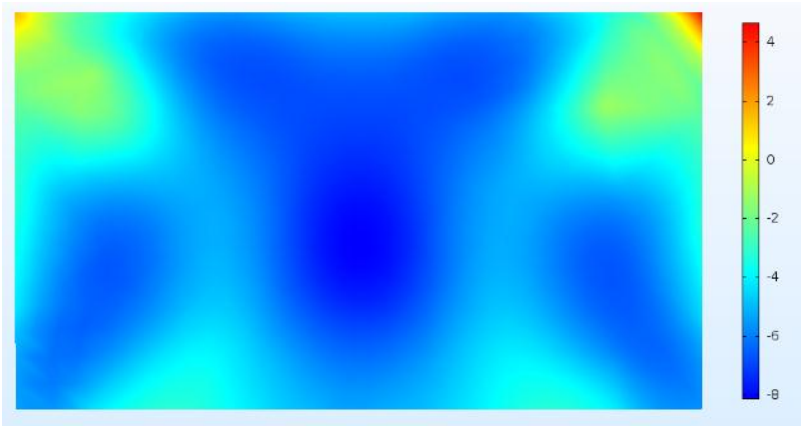
(b)3.s



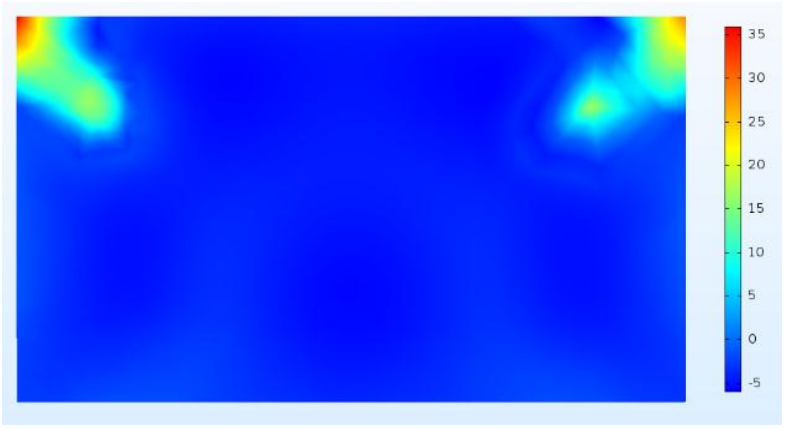
(c)12.s



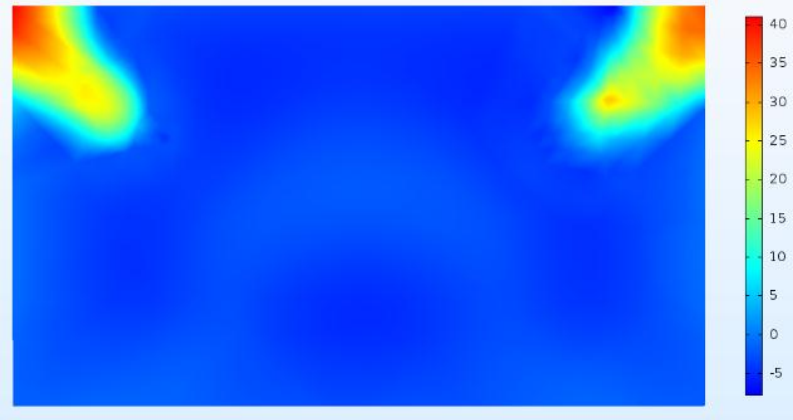
(d)30.s



(e)45.s



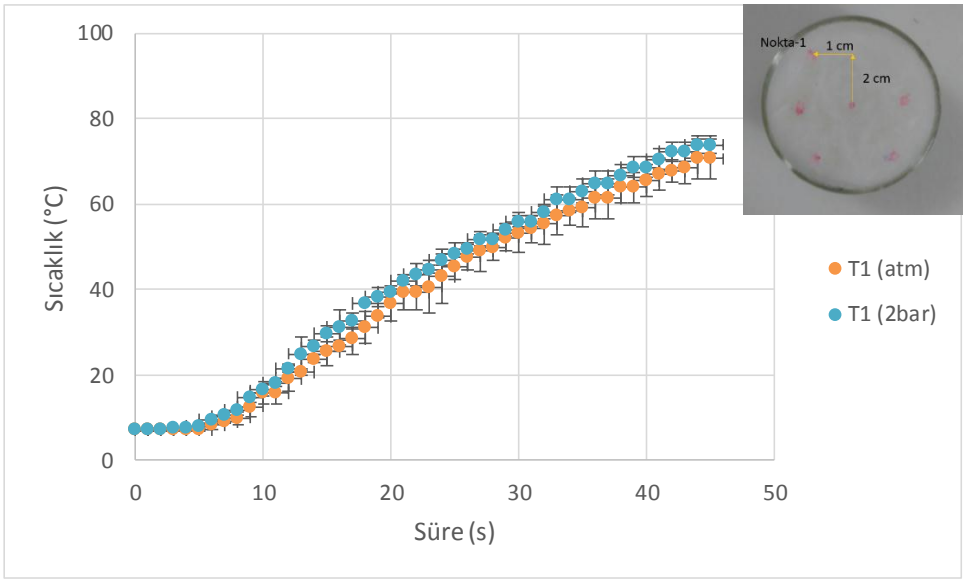
(f)72.s



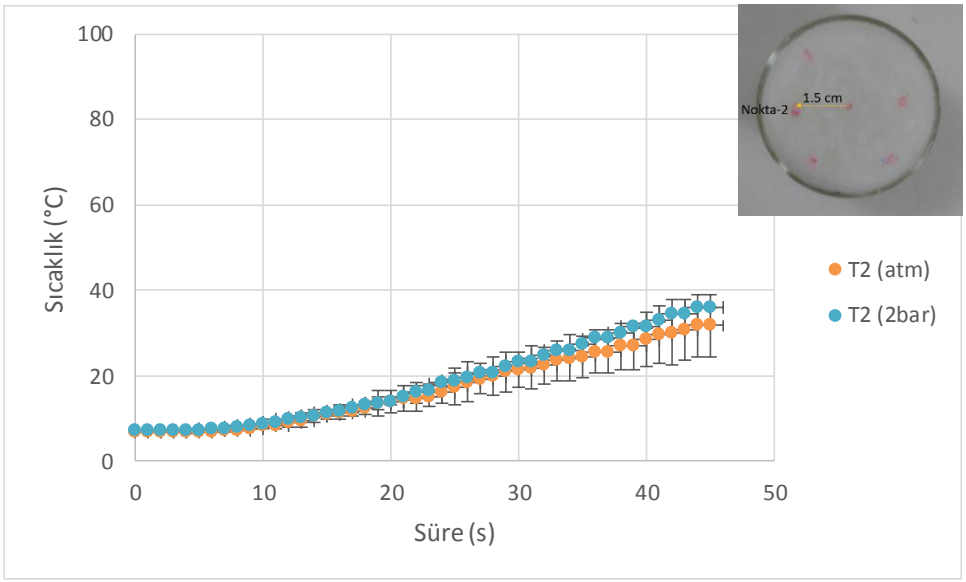
(g)90.s

Şekil 1 Tylose iç sıcaklığının zamana göre karşılaştırılacağı x-z kesiti (a) ve sırasıyla 3, 12, 30, 45, 72 ve 90. s aynı kesitteki sıcaklık değişimi

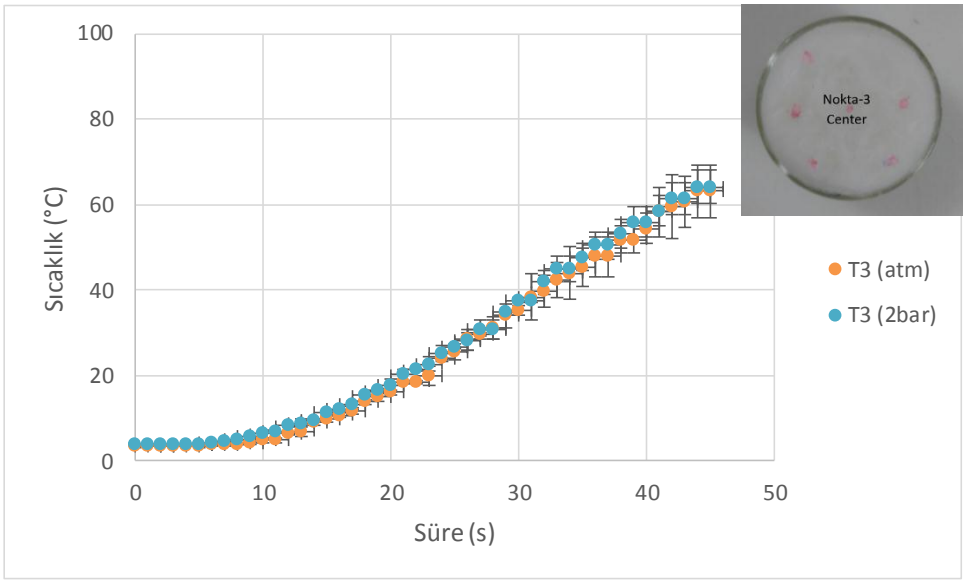
EK 4 Tylose ısıl işlem (ısıtma, çözdürme) proseslerinde merkez sabit durumda basınç altında (2 bar) ve atmosferik basınç altındaki deneylerin noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması



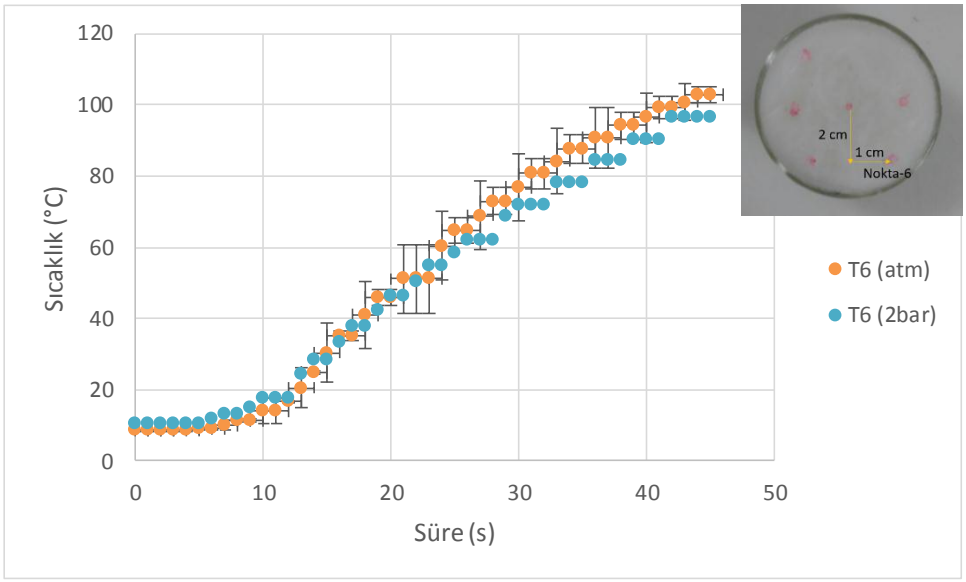
(a)



(b)

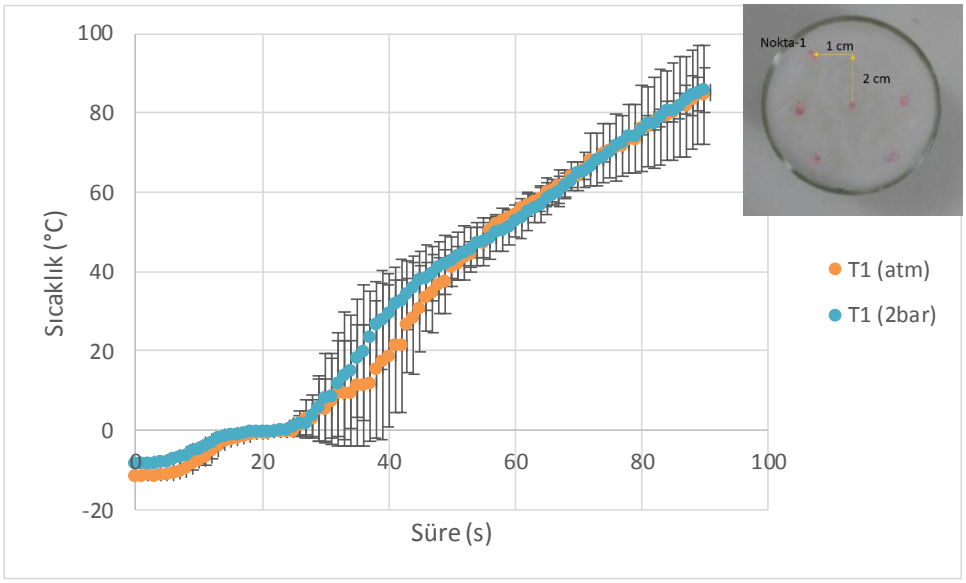


(c)

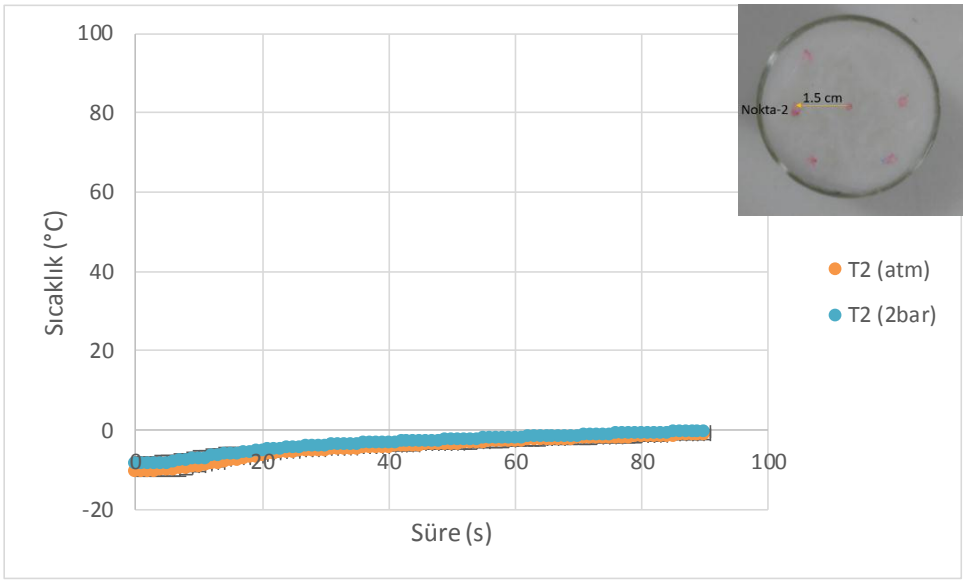


(d)

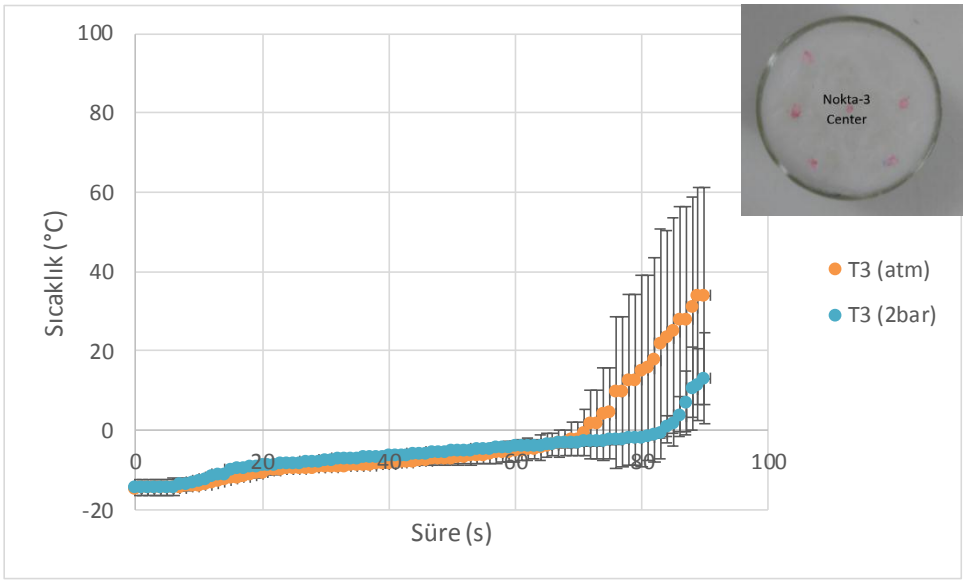
Şekil 1 Merkez – sabit durumda Tylose ısıtma deneyinin atmosferik basınç ve 2 bar basınç altındaki noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması


Nokta-1
1 cm
2 cm
Sıcaklık (°C)
Süre (s)
T1 (atm)
T1 (2bar)

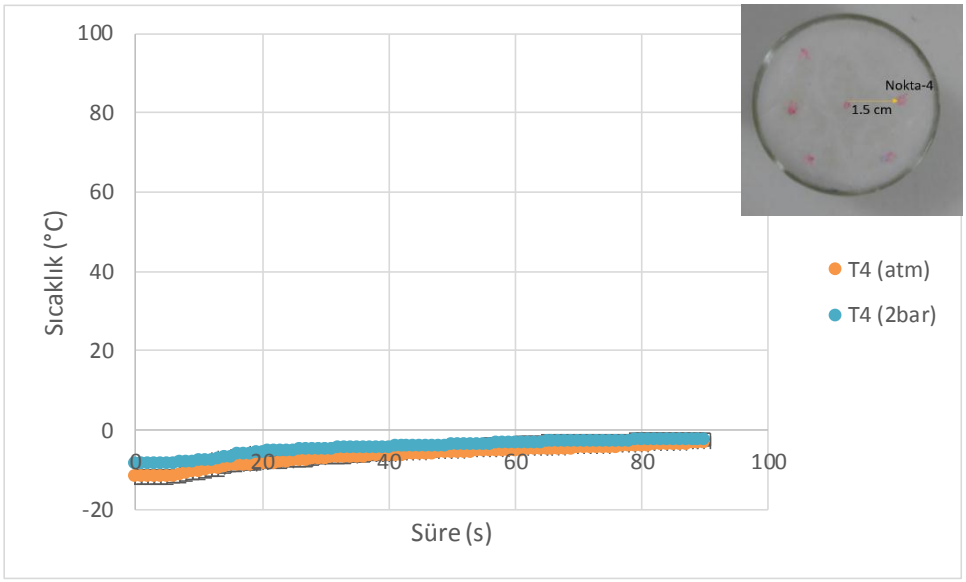
(a)


Nokta-2
1.5 cm
Sıcaklık (°C)
Süre (s)
T2 (atm)
T2 (2bar)

(b)



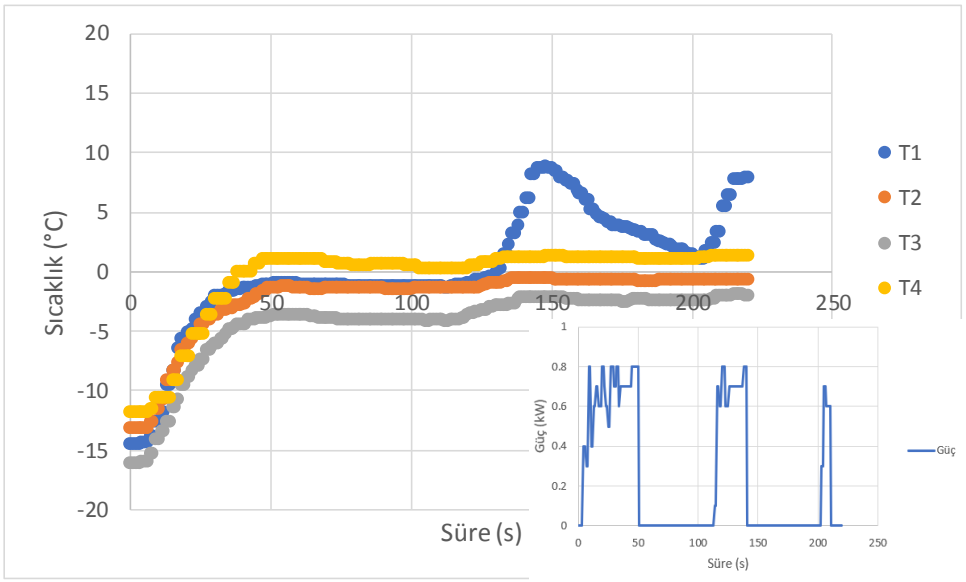
(c)



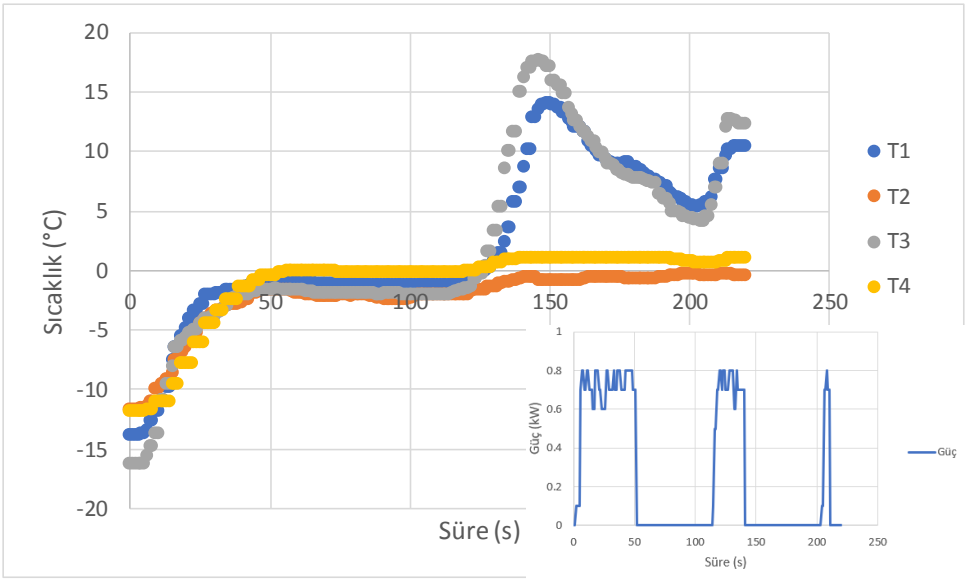
(d)

Şekil 2 Merkez – sabit durumda Tylose çözdürme deneyinin atmosferik basınç ve 2 bar basınç altındaki noktasal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

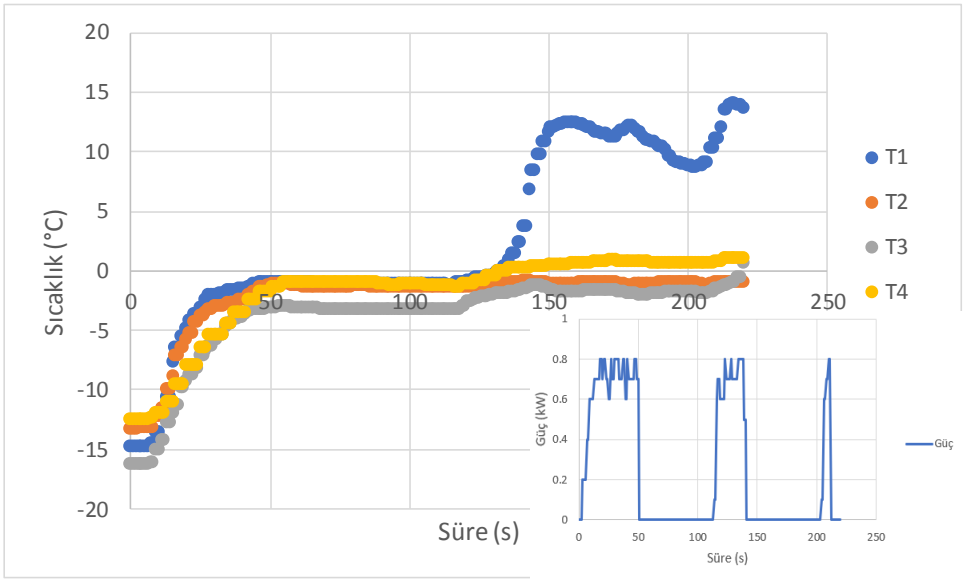
EK 5 Dondurulmuş morina balıklarının dur – kalk güç uygulamasıyla çözdürülmesi



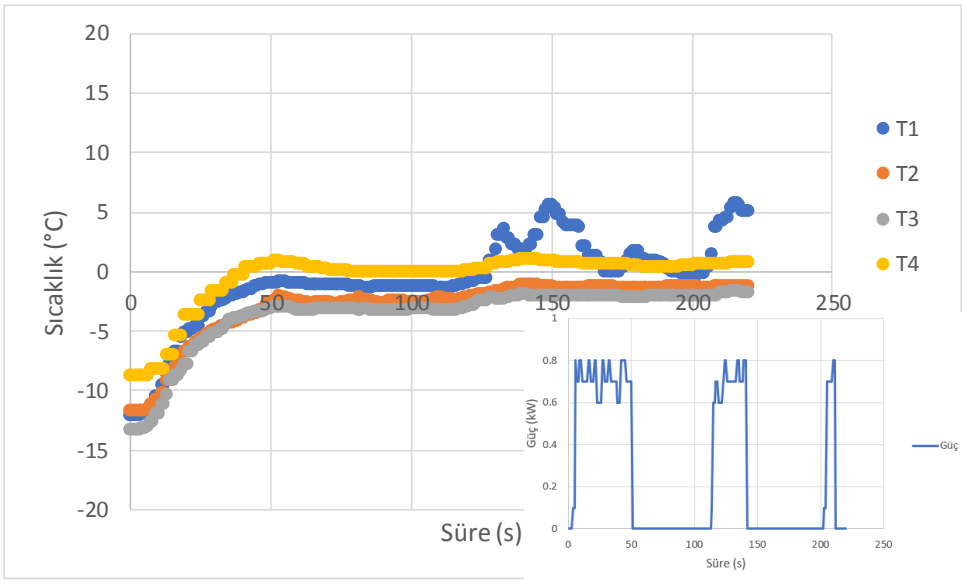
(a)deney-1



(b)deney-2



(c)deney-3



(d)deney-4

Şekil 1 Dondurulmuş morina balıklarının dur – kalk metodu ile çözdürülen 4 farklı proses sonuçları; (a) deney-1, (b) deney-2, (c) deney-3, (d) deney-4

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ozan ALTIN

Doğum Yeri : Keçiören / ANKARA

Doğum Tarihi : 25/01/1992

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Erzincan Anadolu Lisesi (2010)

Lisans : Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü (2015)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2015 – Aralık 2017)

Yayın (SCI) ve Sunumlar

Uluslararası:

Erdogdu, F., **Altin, O.,** Marra, F. ve Bedane, T.F. 2017. A computational study to design process conditions in industrial radio-frequency tempering/thawing process. Journal of Food Engineering. 213: 99-112.

Altin, O., Erdogdu, F. ve Skipness, D. 2017. "Pressure effects on microwave heating/tempering," 31th EFFoST International Conference, Sitges, Spain. Poster presentation.

Altin, O., Erdogdu, F., Bedane, T. ve Marra, F. 2016. "A virtual design of radio-frequency continuous system for optimal thawing," 4th International ISEKI_Food Conference, Vienna, Austria. Oral presentation

Ulusal:

Altin, O. ve Erdogdu, F. 2016. Pastörize sıvı yumurta üretimi için endüstriyel ölçekte mikrodalga system tasarımı. Özet no: 16BU0088. IV. Uluslararası Gıda Ar-Ge Proje Yarışması, İzmir. Katılımcı.