

**YÜKSEK VİSKOZİTELİ AKIŞKAN GIDALARIN
ISITILMASI İÇİN SÜREKLİ MİKRODALGA
SİSTEMİ TASARIMI ve MODELLENMESİ**

SEZİN TUTA

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GIDA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**Danışman
Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU**

**MERSİN
TEMMUZ – 2015**

Sezin TUTA tarafından Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU danışmanlığında hazırlanan “Yüksek Viskoziteli Akışkan Gıdaların Isıtılması için Sürekli Mikrodalga Sistemi Tasarımı ve Modellenmesi” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. H. İbrahim EKİZ

Prof. Dr. Şebnem TAVMAN

Prof. Dr. Ali Rıza TEKİN

Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU

Doç. Dr. Bahadır K. KÖRBAHTİ

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/07/2015 tarih ve 2015.19/...776... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



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

YÜKSEK VİSKOZİTELİ AKIŞKAN GIDALARIN ISITILMASI İÇİN SÜREKLİ MİKRODALGA SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLENMESİ

SEZİN TUTA

ÖZ

Günümüzde artan tüketici bilinci ile yüksek besin içeriği ve kalite özelliklerine sahip gıdalara olan talebin gün geçtikçe artış göstermesi, üreticileri bu ihtiyaca cevap vermeye sevk etmektedir. Akışkan gıdaların sürekli sistemlerde geleneksel yöntemlerle ısıtılması sırasında meydana gelen olumsuzluklar (homojen olmayan sıcaklık dağılımı, doğal tat ve rengin değişmesi, besin değerinin azalması) sürekli akış mikrodalga ısıtma üniteleri ile hacimsel ve homojen ısıtma sağlanarak ortadan kaldırılabilmektedir. Mevcut sürekli akış mikrodalga sistemlerde düşük viskoziteli akışkan gıdalar için homojen sıcaklık dağılımı kolaylıkla sağlanabilirken, yüksek viskoziteli akışkan gıdalarda sıcaklık dağılımının homojen olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bu tezde yüksek viskoziteli akışkan gıdaların da homojen olarak ısıtılabileceği bir sürekli akış mikrodalga sistem tasarımı (915 MHz ve maksimum gücü 5 kW) gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ürünün mikrodalga kavite içerisinde farklı elektrik alan bölgelerinden geçmesini sağlayacak helikal boru konfigürasyonu önerilmiştir. Bu sistemde deneysel ve COMSOL Multiphysics yazılımı ile sayısal olarak Newtonumsu (saf su) ve Newtonumsu olmayan (%0,5 ve %1 w/w CMC çözeltisi) model akışkanlar farklı akış hızlarında (1, 2, 3 L/min) 4 kW güç uygulanarak ısıtılmış ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Isıtma denemeleri ve modelleme çalışmaları aynı koşullarda düz boru konfigürasyonu ile tekrarlanmış ve sonuçlar helikal boru konfigürasyonu ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Helikal boru konfigürasyonu ile homojen ısınmanın en fazla saf su için sağlandığı ve akış hızı arttıkça üç akışkan için de homojenliğin arttığı gözlemlenmiştir. Model akışkanların helikal boru konfigürasyonunda düz boruya oranla daha yüksek mikrodalga enerji absorbe ettiği ve ortalama çıkış sıcaklıklarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal model ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum helikal boru konfigürasyonu için daha yüksek bulunmuştur. Her iki boru konfigürasyonu için akış hızı arttıkça model sonuçlarının deneysel sonuçlara yaklaştığı görülmüştür. Bu çalışma, sürekli akış mikrodalga ısıtma sistemlerinde helikal boru konfigürasyonu kullanılması ile viskozitesi yüksek akışkan gıdaların homojen olarak ısıtılabileceği ve bu sayede yüksek besin içeriği/kaliteye sahip gıdaların üretilabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: akışkan gıdalar, mikrodalga ısıtma, helikal boru konfigürasyonu, modelleme, sıcaklık dağılımı

Danışman: Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU, Mersin Üniversitesi Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı

DESIGNING AND NUMERICAL MODELING OF A CONTINUOUS FLOW MICROWAVE SYSTEM FOR HEATING HIGH VISCOSITY FLUID FOOD PRODUCTS

SEZİN TUTA

ABSTRACT

In recent years, increasing consumer awareness has led to demand for nutritious and high quality food products. As a result, food manufacturers are forced to address these consumer needs when developing a new product or a process. Continuous flow heating of high viscosity fluid foods in conventional heat exchangers have drawbacks such as non-homogeneous heating, undesirable taste and color, low nutritional content which could be eliminated by using volumetric heating methods. Continuous flow microwave heating is one of the emerging technologies for heating fluid food products volumetrically. Existing continuous flow microwave systems show that homogeneous temperature distribution can readily be achieved for low viscosity food products but non-homogeneous heating still remains a problem for high viscosity fluid foods. Therefore, objective of this study was to design a continuous flow microwave heating system for homogeneously heating high viscosity food products and to investigate its performance. A pilot-scale system operating at 915 MHz and 5 kW maximum power was built and heating experiments were conducted with distilled water, %0.5 and %1 CMC solutions at 4 kW for varying flow rates (1, 2, 3 L/min) in two different tube configurations (helical and straight). A numerical model was built using COMSOL Multiphysics software for both systems. In helical tube configuration, heating was the most homogeneous when distilled water was used and increasing flow rate caused more homogeneous heating for all test fluids. Test fluids absorbed more microwave energy in helical tube than straight tube as shown by the higher average temperature at the exit of helical tube. A closer agreement between experimental and numerical results was found in case of helical tube configuration. Simulation and experimental results approached each other when the flow rate was increased. This study showed that a more homogeneous heating and hence higher quality/nutrient retention can be achieved for high viscosity fluid food products by using helical tube configuration in the newly designed system.

Keywords: fluid food products, microwave heating, helical tube configuration, numerical modeling, temperature distribution

Advisor: Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU, Mersin Üniversitesi Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı

TEŞEKKÜR

Bilgi birikimiyle bana her konuda yardımcı olan ve yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. T. Koray PALAZOĞLU'na yardımları, eşsiz sabrı ve bana bu mesleği sevdirdiği için teşekkür ederim.

Bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. H. İbrahim EKİZ'e, Mersin Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Bu tezin oluşumundaki katkılarından dolayı tez izleme komitesindeki hocalarım Prof. Dr. H. İbrahim EKİZ, Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU, Doç. Dr. Bahadır K. KÖRBAHTI'ye, doktora öğrenimim süresinde yardımlarını esirgemeyen değerli bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullandığım cihazların temininde katkılarından dolayı Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Çalışma hayatımı paylaştığım bölüm arkadaşlarıma manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Frekans ölçümünde yardımcı olan N. Korkut ULUAYDIN'a teşekkür ederim.

Mersin Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Evren DEĞİRMENCİ'ye yardımları için, Yrd. Doç. Dr. Alkan ALKAYA'ya yardımseverliği, desteği ve arkadaşlığı için teşekkür ederim.

Arş. Gör. Günseli BOBUŞ ALKAYA'ya sabrı, arkadaşlığı ve hayatımda olduğu için teşekkür ederim.

Eşsiz destekçilerim anneme, babama, ablama ve bana mutluluğu hatırlattıkları için kuzularım Ilgın ve Bade'ye varlıkları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1 ASEPTİK PROSES.....	4
2.2. MİKRODALGA ISITMA.....	6
2.2.1 Mikrodalga Sistem Bileşenleri.....	7
2.2.2. Elektromanyetik Teori	9
2.2.3. Mikrodalga ısıtmanın esasları	10
2.2.4. Mikrodalga Isıtma Uygulamaları	14
2.3. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA SİSTEM.....	17
2.4. HELİKAL KONFIGÜRASYONLU BORULARIN ISI TRANSFERİNE ETKİSİ	24
2.5. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA ISITMA ÜNİTESİNİN SAYISAL BENZETİMİ	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM	33
3.1. MATERYAL	33
3.2. YÖNTEM.....	33
3.2.1. Model Akışkanların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	33
3.2.1.1. Reolojik özelliklerin belirlenmesi	33
3.2.1.2. Dielektrik özelliklerin belirlenmesi	34
3.2.1.3. Elektriksel özelliklerin belirlenmesi	35
3.2.1.4. Termofiziksel özelliklerin belirlenmesi	35
3.2.2. Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Tasarlanması.....	36

3.2.3. Sürekli Akış Mikrodalga Sistemde Isıtma Deneylelerinin Gerçekleştirilmesi	37
3.2.3.1. Sıcaklık dağılımının belirlenmesi	41
3.2.3.2. Infrared kamera ile sıcaklık ölçümü.....	42
3.2.3.3. Absorbe edilen güç miktarının belirlenmesi	42
3.2.4. Magnetron Frekansının Ölçümü	43
3.2.5. Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Sayısal Benzetimi	43
3.2.5.1. Temel Denklikler	45
<i>Elektromanyetik Alan Çözümü</i>	45
<i>Isı transferi ve Akışkanlar Mekaniği Çözümü</i>	46
<i>Düz boru için Süreklilik, Momentum, Isı transferi Eşitlikler</i>	46
<i>Helikal boru için Süreklilik, Momentum, Isı transferi Eşitlikleri</i>	47
3.2.5.2. Sayısal Benzetimi.....	49
<i>Üç Boyutlu Geometrinin Oluşturulması</i>	49
<i>Materyal Özelliklerinin Belirlenmesi</i>	50
<i>Başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi</i>	50
<i>Elektromanyetik Alan Dağılımı Denkliklerinin Çözümü</i>	50
<i>Isı Transferi ve Akışkanlar Mekaniği Denkliklerinin Çözümü</i>	51
<i>Sayısal Ağ Oluşturma</i>	51
<i>Çözüm</i>	52
3.2.6. İstatistiksel Analiz.....	53
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	54
4.1. MODEL AKIŞKANLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	54
4.1.1. Reolojik Özellikler	54
4.1.2. Dielektrik Özellikler	55
4.1.3. Elektriksel Özellikler	58
4.1.4. Termofiziksel Özellikler	59
4.2. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA SİSTEM DENEYSEL SONUÇLAR.....	60
4.2.1. Helikal Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistem	60
4.2.2. Düz Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistem	69
4.2.3. Düz ve Helikal Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Karşılaştırılması	73
4.3. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA SİSTEMİN SAYISAL BENZETİMİ	79

Sayfa

4.3.1. Helikal Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Sayısal Benzetimi	80
4.3.1.1. Sıcaklık dağılımı ve absorbe edilen güç miktarı	80
4.3.1.2. Hız profilleri.....	93
<i>Hız değerlerinin teorik doğrulaması</i>	93
<i>Sayısal benzetim sonuçları</i>	94
4.3.1.3. Elektromanyetik alan dağılımı çözümü.....	99
4.3.2. Düz Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Sayısal Benzetimi	108
4.3.2.1. Sıcaklık dağılımı ve absorbe edilen güç miktarı	108
4.3.2.2. Hız profilleri.....	116
<i>Hız değerlerinin teorik doğrulaması</i>	116
<i>Sayısal benzetim sonuçları</i>	117
4.3.2.3. Elektromanyetik alan dağılımı çözümü	120
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	125
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ.....	141

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Bazı materyallerin dielektrik özellikleri ve penetrasyon derinliği değerleri	13
Çizelge 4.1. Model akışkanların reolojik özellikleri.....	54
Çizelge 4.2. Model akışkanların Eşitlik 3.4,3.5,3.12 ile hesaplanan dielektrik özellikleri	57
Çizelge 4.3. Model akışkanların Eşitlik 3.9 ile hesaplanan penetrasyon derinliği (D_p)ve Eşitlik 3.8 ile hesaplanan dalga boyu (λ) değerleri.....	58
Çizelge 4.4. CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklarda ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri.....	59
Çizelge 4.5. Saf su, % 0,5, % 1 konsantrasyonlarındaki CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki termofiziksel özellikleri.....	59
Çizelge 4.6. Helikal konfigürasyonlu sistemde ısıtılan model akışkanların farklı akış hızlarında ortalama çıkış sıcaklıkları.....	65
Çizelge 4.7. Model akışkanların farklı akış hızlarındaki Re ve Dn sayıları.....	65
Çizelge 4.8. Düz boru konfigürasyonlu sistemde ısıtılan model akışkanların farklı akış hızlarında ortalama çıkış sıcaklıkları.....	72
Çizelge 4.9. Düz ve helikal konfigürasyonlu sistem için deneysel olarak elde edilen ve Eşitlik 3.19 ile hesaplanan q_{abs} değerleri.....	74
Çizelge 4.10. Literatürde sürekli mikrodalga sistemler ile yapılan çalışmalar.....	77
Çizelge 4.11. Akış hızı 1 L/min ve 2 L/min olan suyun ANSYS ve COMSOL yazılımları ile sayısal benzetiminin sonuçları.....	79
Çizelge 4.12. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde saf suyun sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	81
Çizelge 4.13. Helikal konfigürasyonlu sistemde % 0,5 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.....	82
Çizelge 4.14. Helikal konfigürasyonlu sistemde % 1 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.....	83
Çizelge 4.15. Helikal boruda akış için hesaplanan teorik ve sayısal model sonuçları.....	94
Çizelge 4.16. Helikal boruda sayısal benzetim ile elde edilen ΔP ve u_{max} değerleri.....	98
Çizelge 4.17. Düz boru konfigürasyonlu sistemde saf suyun sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	109
Çizelge 4.18. Düz boru konfigürasyonlu sistemde % 0,5 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	110
Çizelge 4.19. Düz boru konfigürasyonlu sistemde % 1 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	111
Çizelge 4.20. Düz boruda akış için hesaplanan teorik ve sayısal model sonuçları.....	116
Çizelge 4.21. Düz boruda sayısal benzetim ile elde edilen ΔP ve u_{max} değerleri.....	118

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Aseptik proses şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Konserve teknolojisi (sol) ve ısıtmanın mikrodalga ile sağlandığı aseptik proses (sağ) ile sterilize edilen tatlı patates püreleri.....	6
Şekil 2.3. Elektromanyetik dalga yayılımı ve dalga boyu	7
Şekil 2.4. Mikrodalğanın gıda ile etkileşimi	11
Şekil 2.5. Sürekli mikrodalga sistemde ısıtılan süt (Coronel vd., 2003) (a) ve patates püresine (Coronel vd. 2005) (b) ait sıcaklık dağılımları....	23
Şekil 2.6. Katmanlı akış koşullarında Newtonumsu ve Newtonumsu olmayan akışkanlar için düz boruda hız profili.....	25
Şekil 2.7. Düz ve helikal boruda meydana gelen hız profilleri	26
Şekil 3.1. Boru yapısının şematik gösterimi iç kısmı a) düzleştirilmiş b) tırtıklı	37
Şekil 3.2. Helikal boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistemin deney düzeneği.....	39
Şekil 3.3. Düz boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistemin deney düzeneği.....	40
Şekil 3.4. Isıl çift düzeneği ve ısıl çiftlerin yerleri	41
Şekil 3.5. Kullanılan ısıl çiftlerin yapısı.....	42
Şekil 3.6. Frekans spektrumu	43
Şekil 3.7. Sürekli akış mikrodalga sistem sayısal benzetiminin algoritması.....	44
Şekil 3.8. Helikal koordinat sistemi	47
Şekil 3.9. Helikal/Düz boru konfigürasyonlu sürekli mikrodalga sistemin üç boyutlu geometrisi.....	50
Şekil 4.1. CMC çözeltilerinin görünür viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	55
Şekil 4.2. Model akışkanların farklı akış hızlarında helikal boru konfigürasyonlu sistemin çıkışında elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları.....	61
Şekil 4.3. Helikal boru boyunca model akışkanların farklı akış hızlarındaki termal görüntüleri.....	63
Şekil 4.4. Helikal boru uzunluğu boyunca 7 noktada termal görüntülerden elde edilen sıcaklık değerleri.....	64
Şekil 4.5. Model akışkanların helikal boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık artış değerlerinin akış hızı ile değişimi.....	68
Şekil 4.6. Model akışkanların farklı akış hızlarında düz boru konfigürasyonlu sistemin çıkışında elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları.....	71
Şekil 4.7. Model akışkanların düz boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık artış değerlerinin akış hızı ile değişimi.....	72
Şekil 4.8. Kavitenin farklı noktalarında absorbe olan mikrodalga gücü değerleri..	75
Şekil 4.9. a) Isıl çift konumları b) Saf suyun helikal boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları.....	81
Şekil 4.10. a) Isıl çift konumları b) % 0,5 CMC çözeltisinin helikal boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları.....	82
Şekil 4.11. a) Isıl çift konumları b) % 1 CMC çözeltisinin helikal boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları.....	83

Şekil 4.12. Literatürde frekans değişiminin sıcaklık değişimine etkisini gösteren çalışmalar a) Soltysiak vd., (2010) b) Pitchai vd., (2012).....	86
Şekil 4.13. Saf suyun helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim.....	88
Şekil 4.14. % 0,5 CMC çözeltisinin helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim.....	89
Şekil 4.15. % 1 CMC çözeltisinin helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim.....	90
Şekil 4.16. Helikal boru uzunluğu boyunca 7 noktada sayısal benzetim sonucu elde edilen sıcaklık değerleri.....	92
Şekil 4.17. Helikal boruda saf suyun farklı akış hızlarındaki akış profilleri.....	95
Şekil 4.18. Helikal boruda % 0,5 CMC çözeltisinin farklı akış hızlarındaki akış profilleri.....	96
Şekil 4.19. Helikal boruda % 1 CMC çözeltisinin farklı akış hızlarındaki akış profilleri.....	97
Şekil 4.20. Tüm sistem elektromanyetik alan dağılımı, V/m (üst), helikal boru yüzeyi boyunca elektromanyetik alan dağılımı, V/m (sol alt) ve ısı üretimi, W/m ³ (sağ alt) a) Saf su, b) % 0,5 CMC çözeltisi, c) % 1 CMC çözeltisi.....	103
Şekil 4.21 Helikal boru konfigürasyonlu sistemde sayısal olarak hesaplanan hacimsel ısı üretimi, sıcaklık ve akış hızının boru boyunca değişimi a) Saf su b) % 0,5 CMC çözeltisi c) % 1 CMC çözeltisi.....	107
Şekil 4.22. a) Isıl çift konumları b) Saf suyun düz boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları.....	109
Şekil 4.23. a) Isıl çift konumları b) % 0,5 CMC çözeltisinin düz boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları.....	110
Şekil 4.24. a) Isıl çift konumları b) % 1 CMC çözeltisinin düz boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları.....	111
Şekil 4.25. Boru yüzeyi boyunca sıcaklık değişiminin akış hızı ile değişimi (sol 1 L/min, orta 2 L/min, sağ 3 L/min) a) Saf su b) % 0,5 CMC çözeltisi c) % 1 CMC çözeltisi.....	113
Şekil 4.26. Sayısal benzetim sonucu elde edilen boru kesitindeki hız profilleri a) Saf su b) %0,5 CMC çözeltisi c) %1 CMC çözeltisi.....	118
Şekil 4.27. Tüm sistem elektromanyetik alan dağılımı, V/m (üst), düz boru yüzeyi boyunca elektromanyetik alan dağılımı, V/m (sol alt) ve ısı üretimi, W/m ³ (sağ alt) a) Saf su, b) % 0,5 CMC çözeltisi, c) % 1 CMC çözeltisi.....	121
Şekil 4.28. Düz boru konfigürasyonlu sistemde ısı üretim, sıcaklık ve akış hızının boru boyunca değişimi a) Saf su b) % 0,5 CMC çözeltisi c) % 1 CMC çözeltisi.....	124

SİMGELER ve KISALTMALAR

d	Borunun iç çapı (m)
D	Helikal borunun kavis çapı (m)
a	Borunun iç yarıçapı (m)
R	Helikal borunun kavis yarıçapı
\vec{E}	Elektrik alan şiddeti (V/m)
\vec{B}	Manyetik akı şiddeti (Wb/m ²)
\vec{H}	Manyetik alan şiddeti (A/m)
\vec{D}	Elektrik akı yoğunluğu (C/m ²)
\vec{j}	Elektrik akımı yoğunluğu (A/m ²)
ρ	Elektrik yük yoğunluğu (C/m ³)
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Dielektrik kayıp faktörü
ϵ_0	Boşluğun geçirgenlik değeri (8.854x10 ⁻¹² F/m)
μ_r	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluktaki manyetik geçirgenlik
$\tan \delta$	Tanjant kayıp faktörü
f	Frekans (Hz)
c	Işık hızı (3 x 10 ⁸ m/s)
D_p	Penetrasyon kalınlığı (m)
λ	Dalga boyu (m)
σ	Elektriksel iletkenlik değeri (S/m)
Q	Hacimsel ısı üretim değeri (W/m ³)
q_{abs}	Absorbe olan mikrodalga enerji (W)
T	Sıcaklık (°C)
cp	Özgül ısı (J/kgK)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m°C)
Pr	Prandtl sayısı
h	Isı transfer katsayısı (W/m ² °C)
\bar{u}	Ortalama çizgisel akış hızı (m/s)
u_{max}	Maksimum çizgisel akış hızı (m/s)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
η	Görünür viskozite (Pa.s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
m	Kıvam katsayısı (Pa.s ⁿ)
n	Akış davranış indeksi
P	Basınç (Pa)
u_θ	Açısal hız vektörü (düz boru için)
u_r	Radyal hız vektörü (düz boru için)
u_z	Eksensel hız vektörü (düz boru için)
Θ	Helikal dönüş açısı
u	Hız vektörü (helikal boru için)
w	Hız vektörü (helikal boru için)

v	Hız vektörü (helikal boru için)
r	Yön
ψ	Açısal koordinat
s	Yön
\dot{m}	Kütleli akış hızı (kg/s)
Dn	Dean sayısı ($Dn = Re\sqrt{d/D}$)
Re	Reynolds sayısı ($Re = \frac{\rho(\bar{u})^{(2-n)}d^n}{8^{n-1}\mu} \left(\frac{4n}{3n+1}\right)$)
CMC	Karboksümetil Selüloz
N	Veri sayısı
T_{deneysel}	Deneysel sıcaklık değeri (°C)
T_{model}	Model ile hesaplanan sıcaklık değeri (°C)
KOH	Karekök ortalama hata

1. GİRİŞ

Akışkan gıdaların sürekli sistemlerde pastörizasyonu/sterilizasyonu, geleneksel olarak ürünün ısı değiştiricilerde (plakalı ya da boru tipi) ısıtıldıktan sonra tutma tüpünde belirli süre bekletilmesi sureti ile gerçekleştirilmektedir. Viskozitesi düşük akışkan gıdalar (süt, meyve suyu) geleneksel ısı değiştiricilerde hızlı bir şekilde ısıtılabilirler. Viskozitesi yüksek akışkan gıdaların (meyve püresi gibi) bu sistemlerde ısıtılması hem zor olmakta hem de homojen bir ısıtma sağlanamamaktadır. Ürünün ısı değiştirici yüzeyine yakın olan kısmı daha çok ısınırken borunun merkezine doğru ürün sıcaklığı düşmekte ve homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı ortaya çıkmaktadır. Bu durum ürünün hem tat, renk gibi kalite özelliklerini olumsuz etkilemekte hem de besin değerini düşürmektedir. Hacimsel bir ısıtma yöntemi kullanılması ile ısıtılması zor olan bu akışkan gıdaların daha hızlı ve daha homojen bir şekilde ısınması sağlanabilir.

Mikrodalga enerjinin hızlı ve hacimsel ısıtma özelliği, bu teknolojinin gıda endüstrisinde kullanımının gün geçtikçe artmasına neden olmuştur. Günümüzde tüketiciler doğala daha yakın ve daha sağlıklı ürünler tüketmek istemekte, üreticiler de bu talebe cevap verebilmek için duyuşal ve besinsel özelliklerinde en az kayıp olacak şekilde ürünlerini pastörize/sterilize etmek istemektedirler. Son zamanlarda üreticinin ve tüketicinin isteğine cevap verebilmek için alternatif teknolojilerden yararlanıldığı ve akışkan gıdaların pastörizasyon/sterilizasyonunda sürekli akış mikrodalga sistemlerin öne çıkan teknolojilerden olduğu görülmektedir.

Sürekli akış mikrodalga sistemlerde düşük viskoziteli akışkanların ısıtılması homojen gerçekleştirilebilirken, yüksek viskoziteli gıdalarda homojen olmayan sıcaklık dağılımı önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde, mikrodalga enerjinin akışkanın hızının en yüksek olduğu bölgeye (borunun merkezine) odaklandığı sürekli sistemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Böyle bir sistemde ısıtılan sütte maksimum sıcaklık farkının yaklaşık 1°C (Coronel vd. 2003), havuç ve bezelye püresinde ise yaklaşık 30°C (Kumar vd., 2008), tatlı patates püresinde yaklaşık 75°C (Coronel vd., 2005) olduğu rapor edilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda viskozitesi yüksek gıdalarda maksimum sıcaklık farkının yüksek olduğu ve homojen olmayan sıcaklık dağılımının ortaya çıktığı

görülmektedir. Gıda güvenliği açısından sorun teşkil eden homojen olmayan sıcaklık dağılımı pastörizasyon/sterilizasyon işlemlerinde önemli bir problemdir. Bu nedenle sürekli akış mikrodalga sistemi ile viskozitesi yüksek akışkan gıdaların ısıtılmasında homojen sıcaklık dağılımı elde edebilmek için mevcut tasarımların iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu çalışma ile viskozitesi yüksek akışkan gıdaların homojen ısıtılması için sürekli akış mikrodalga sistemlerde helikal boruların kullanım potansiyeli ve ısı transferine etkisi ortaya konması hedeflenmektedir.

Helikal ısı değiştiriciler homojen sıcaklık dağılımının gerçekleşmesi amacı ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Helikal borularda akış sırasında merkezkaç kuvveti etkisi ile radyal yönde basınç gradyanı oluşmaktadır. Borudaki kavis, dairesel hareket nedeni ile ikincil akış oluşturmakta ve bu hareket maksimum hız bölgesinin borunun dış kısmına doğru savrulmasına neden olmaktadır. Radyal karışım sağlaması, maksimum ve minimum hız değerlerinin birbirine yaklaşması, helikal ısı değiştiricilerin endüstriyel uygulamalarda düz boruya oranla daha avantajlı olmasına neden olmaktadır. Bu durum helikal boruların geleneksel ısı değiştiricilerde viskoz sıvı gıdaların ısıtılması/soğutulması proseslerinde kullanılmasına neden olmuştur [Kumar vd., 2006; Palazoğlu ve Sandeep, 2004]. Literatürde helikal boruların kullanıldığı laboratuvar ölçekli sürekli akış mikrodalga sistemlerde gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda akışkan gıdanın mikrodalga ile ısıtılmasının, mikrobiyel ve enzim inaktivasyonu üzerine etkisinin incelendiği görülmektedir [Tajchakavit ve Ramaswamy, 1995; Gentry ve Roberts, 2005]. Helikal boru konfigürasyonunun, pilot ölçekte mikrodalga ısıtma için kullanıldığı ve sıcaklık dağılımı üzerine etkisinin belirlendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Mikrodalga fırınlardaki döner tabla homojen sıcaklık dağılımını sağlamak için kullanılan en yaygın yöntemlerdendir. Döner tabla ile, gıdanın farklı noktaları fırın içerisindeki farklı elektrik alanlardan geçerek homojen sıcaklık dağılımını sağlanabilmektedir. Helikal konfigürasyonlu boru kullanımı mikrodalga fırınlarda döner tabla kullanımı gibi sistemden geçen ürün değişken elektrik alana maruz kalacağı için üründe homojen ısınma sağlanabilecektir. Aynı zamanda mikrodalga

enerji belli bir noktada odaklanmayacağı için aşırı ısınmanın da önüne geçilebilecektir.

Son zamanlarda önem kazanan matematiksel modelleme, proses tasarımı ve optimizasyonu aşamasında önemli ölçüde zaman, maliyet ve emekten tasarruf sağlamaktadır. Matematiksel modelleme çok sayıda deney yapmaya gerek kalmadan kritik proses koşullarının belirlenmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada tasarlanan sürekli akış mikrodalga sistemin deneysel olarak doğrulamış sayısal benzetimi ile endüstriyel boyutta gerçekleştirilebilecek mikrodalga ısıtma prosesinin tasarımında kolaylık ve bu konuda sınırlı sayıda çalışma içeren literatüre de katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Bu kapsamda bu çalışmanın amacı,

- ⇒ Viskozitesi yüksek akışkan gıdaların homojen ısıtılmasını sağlamak amacı ile bir sürekli akış mikrodalga sistem geliştirilmesi,
- ⇒ Sürekli akış mikrodalga sistemin iki farklı konfigürasyonlu boru (düz ve helikal) kullanılarak tasarımının gerçekleştirilmesi ve farklı boru konfigürasyonlarının akışkanların ısınma davranışları üzerine etkisinin incelenmesi,
- ⇒ Newtonumsu (saf su) ve Newtonumsu olmayan (% 0,5 ve % 1 (w/w) CMC çözeltisi) model akışkanların bu sistemde ısıtılmasının ve akış hızlarındaki değişimin sıcaklık dağılımı üzerine etkisinin belirlenmesi,
- ⇒ Sürekli akış mikrodalga sistemin COMSOL Multiphysics programı ile sayısal benzetiminin yapılarak deneysel ve sayısal benzetim sonuçlarının karşılaştırılmasıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

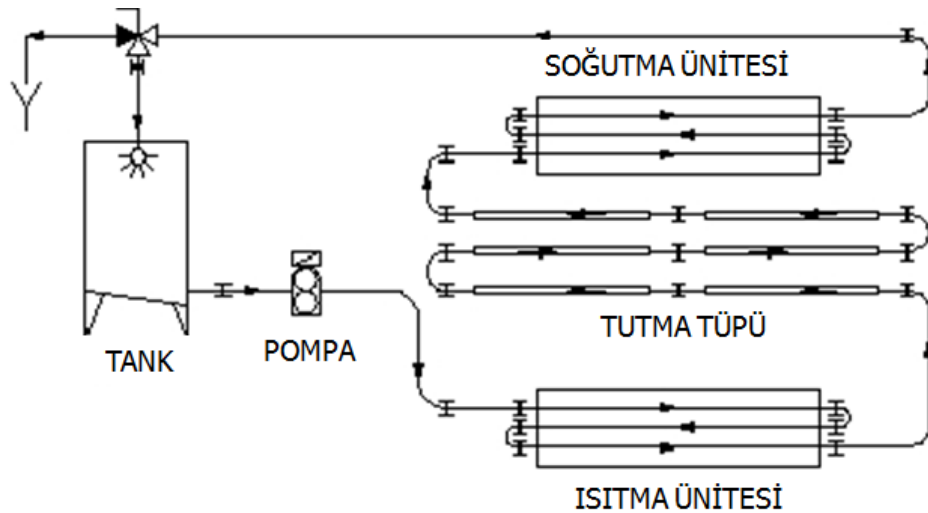
2.1. ASEPTİK PROSES

Isıl işlemlerin temel amacı patojen mikroorganizmaları öldürmek ve gıdanın bozulmasına neden olan enzimlerin inaktivasyonunu sağlamaktır. Isıl işlem ile mikroorganizmalar öldürülürken, gıdanın fiziksel kalitesinin korunabilmesi ve besin düzeyindeki kayıpların en az seviyede olması amaçlanır. Isıl işlemin süresi ve sıcaklığı; hedef mikroorganizmanın türü ve ısıl direncine, gıdanın pH'sı, ısıtma koşulları, gıdanın termofiziksel özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir [Ramaswamy ve Singh, 1997]. Isıl işlem, pH değeri 4,5'in altında olan gıdalarda 100°C'nin altında uygulanmakta ve pastörizasyon olarak adlandırılmakta; pH değeri 4,5'in üzerinde olan gıdalara ısıl işlem 100°C'nin üzerinde uygulanmakta ve sterilizasyon olarak adlandırılmaktadır [Acar, 2003].

Geleneksel yöntemlerle ısıl işlem, konserve teknolojisi ve aseptik teknoloji olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Konserve teknolojisi ile gıda metal konserve kutu veya cam kavanozlar içerisine koyulduktan sonra hermetik olarak kapatılarak, atmosferik ortamda veya basınç altında otoklav sistemlerinde ısıtılmaktadır. Konservenin en soğuk noktası (ürünün en yavaş ısınan noktası, bu bölgede sterilizasyon en az düzeyde gerçekleşmektedir) yeterli derecede ısıdıktan sonra bekletme ve soğutma aşamaları uygulanır. En soğuk nokta, gıdanın karakteristiğine bağlı olmakla birlikte ısınmanın baskın olarak kondüksiyonla gerçekleştiği sistemlerde (katı, viskozitesi yüksek gıdalar) konserve kutunun geometrik merkezidir. Konserve teknolojisi ürünün raf ömrünün uzun olması, oda sıcaklığında depolanabilmesi gibi avantajlara sahip olmasına rağmen ısı transferinin baskın olarak kondüksiyonla gerçekleştiği viskozitesi yüksek gıdaların besinsel ve kalite özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Özellikle konserve kutunun boyutu arttıkça bu olumsuzluk daha da belirginleşmektedir. Yapılan bir çalışmada, 603×700 boyutlarındaki konserve kutusundaki sebze püresine uygulanması gereken ısıl işlem süresinin 121°C'de 165 dk olduğu belirtilmiştir. Bu durumda konservenin merkez noktasından duvar kısmına doğru gidildikçe ürünün kalite özelliklerinde önemli bir farklılık olduğu, duvar kısmında ürünün yanık tada ve koyu renge sahip olduğu

görülmüştür [Coronel vd., 2005]. Konserve üründe görülen bu olumsuzluklar gıda endüstrisinde aseptik üretim teknolojisinin öne çıkmasına neden olmuştur.

Aseptik teknoloji ile yüksek sıcaklık- kısa süre (HTST) koşulları ile üretim gerçekleştirilmektedir. Akışkan gıda, ısı değiştiriciler ile pastörizasyon/sterilizasyon sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra tutma tüpüne geçer ve burada gıda uygun sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir. Bu aşamadan sonra ürün soğutulur ve aseptik ortamda dolun gerçekleştirilir (Şekil 2.1). Isıtma işlemi için yaygın olarak plakalı veya boru tipi ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Plakalı ısı değiştiricilerde düşük viskoziteli gıdalar ısıtılırken, yüksek viskoziteli gıdaların ısıtılması için boru tipi ısı değiştiriciler tercih edilmektedir. Boru tipi ısı değiştiricilerde, akışkanın hızının en yüksek olduğu borunun merkez eksenine (en soğuk nokta) yeterli derecede ısıtıldıktan sonra ürün tutma tüpünde bekletilmekte ve sonra soğutma işlemi uygulanmaktadır. Aseptik teknolojide karşılaşılan en önemli problem boru duvarından merkeze doğru ısı transferinin yavaş gerçekleşmesi nedeni ile işlem süresinin uzun olmasıdır. Aynı zamanda boru duvarına yakın bölgelerin aşırı ısınması gıdanın besinsel ve duyu özelliklerine zarar vermektedir [Sabliov vd., 2008]. Ancak konserve teknolojisi ve aseptik teknoloji karşılaştırıldığında aynı düzeyde sterilizasyon gerçekleştirildiğinde, aseptik teknoloji ile ürünün daha hızlı ısıtılması, kalite ve besinsel özelliklerinin daha iyi olmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.1. Aseptik proses şematik gösterimi

Artan bilinç düzeyi ile birlikte tüketici, gıdanın raf ömrü uzun ve güvenli olmasının yanı sıra yüksek besin içeriğine ve kaliteye sahip olmasını istemektedir. Alternatif ısıtma teknolojilerinden olan mikrodalga ile geleneksel yöntemlere göre daha homojen sıcaklık dağılımı gerçekleştirilebilmektedir. Aseptik proseste ısıtma işleminin hacimsel ve homojen gerçekleştirilmesi ile son üründe meydana gelen olumsuzlukların önüne geçilebilmektedir. Mikrodalga ile ısıtma hacimsel ve homojen ısıtmanın gerçekleştirildiği alternatif teknolojilerdendir. Şekil 2.2'de konserve teknolojisi ve ısıtmanın mikrodalga ile sağlandığı aseptik proses ile sterilize edilen tatlı patates püreleri gösterilmektedir. Mikrodalga ile ısıtılan ürünün rengi ve yapısının konserve ürününkinden çok daha iyi olduğu görülmektedir. Mikrodalga teknolojisi ile yüksek hızda ısıtma, işlem süresinde önemli düzeyde azalma, daha homojen ısıtma, işlem kolaylığı sağlanması bu teknolojinin gıda endüstrisinde kullanımının gün geçtikçe artmasına neden olmaktadır.



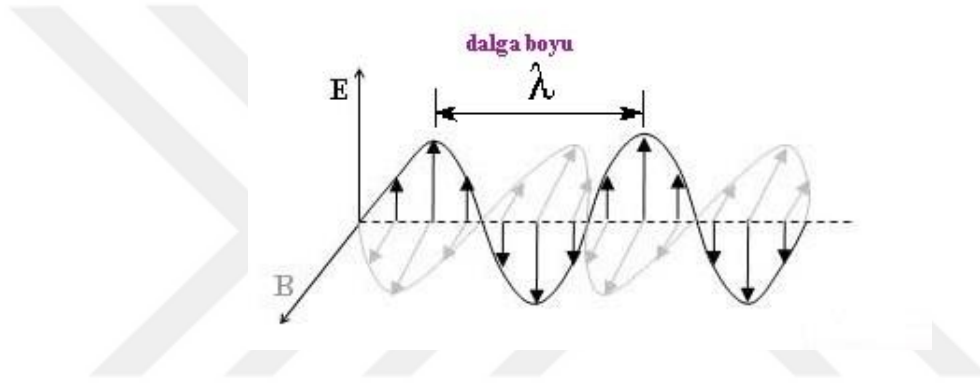
Şekil 2.2. Konserve teknolojisi (sol) ve ısıtmanın mikrodalga ile sağlandığı aseptik proses (sağ) ile sterilize edilen tatlı patates püreleri

2.2. MİKRODALGA ISITMA

Mikrodalga enerjinin, dielektrik materyallerin ısıtılması için kullanılması 1940' lı yılların ortasında mikrodalga fırının icadı ile başlamıştır. Bu sırada ABD' de bulunan Raytheon fabrikası İkinci Dünya Savaşı sırasında kullanılmak üzere yeni keşfedilen radar sistemleri için magnetron geliştirmektedir. Mühendis Percy Spencer radar sistemlerinin denenmesi sırasında tesadüfi olarak gıdaların mikrodalga ile ısıtılabilceğini keşfetmiş ve mikrodalga fırının icadı gerçekleştirilmiştir.

Mikrodalga ile ısıtma birçok farklı alanlardaki uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların içerisinde en önemlisi ev tipi mikrodalga fırınlardır ve gıda endüstrisinde de yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir [Sundberg, 1998].

Mikrodalgalar, frekansı 300 MHz ($\lambda=1$ m) ile 300 GHz ($\lambda=1$ mm) arasında değişen elektromanyetik dalgalar olarak adlandırılmaktadır. Elektrik alanın mikrodalga kaynağından en uzak gidebildiği noktanın uzunluğu dalga boyu olarak adlandırılır. Frekans (f), dalga boyu (λ) ve ışık hızı (c) ile bağlantılıdır ve $c = f \cdot \lambda$ eşitliği ile hesaplanmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Elektromanyetik dalga yayılımı ve dalga boyu

Mikrodalgaların frekans değerleri radyo dalgaları ve radar frekans değerleri ile benzer olduğu için iletişim, haberleşme cihazları ile girişim gösterebilirler. Bu nedenle endüstriyel, bilimsel, medikal (ISM) kullanım için belirlenen ve dünyanın her yerinde geçerli olan frekans değerleri Birleşik Haberleşme Komisyonu (Federal Communications Commission, FCC) tarafından düzenlenmiştir. Gıda uygulamaları için genellikle 2450 ± 50 ve 915 ± 25 MHz mikrodalga frekansları kullanılmaktadır. Ev tipi mikrodalga fırınlarda frekans değeri 2450 MHz kullanılırken, endüstriyel mikrodalga sistemlerde 2450 MHz ($\lambda=12,23$ cm) ve 915 MHz ($\lambda=32,8$ cm) kullanılmaktadır [Salazar-Gonzalez vd., 2012].

2.2.1. Mikrodalga Sistem Bileşenleri

Mikrodalga ısıtma sistemi *magnetron*, *dalga kılavuzu* ve *kavite* olmak üzere üç önemli bileşenden oluşmaktadır. Magnetron tarafından üretilen mikrodalga, dalga

kılavuzu yardımı ile gıdanın bulunduğu kaviteye yönlendirilmektedir. Elektromanyetik dalgalar, kavitenin şekli ve boyutu gibi özelliklerine bağlı olarak şekillenmekte ve gıdanın ısınması elektromanyetik dalgalar ile gerçekleşmektedir. Mikrodalğanın gıda ile etkileşimi materyalin dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörüne bağlı olarak değişmektedir. Mikrodalga fırınlarda hava mikrodalgayı çok az absorbe etmekte böylece elektromanyetik dalgalar ile sadece gıda ısınmaktadır [Buffler,1993].

Ev ve endüstriyel uygulamalarda elektrik enerjisini mikrodalga enerjisine çevirmek için yaygın olarak magnetron kullanılmaktadır. Magnetronun merkezinde anot tarafından çevrilmiş elektron yayan bir katot bulunmaktadır. Katodun (tungsten) içinden elektrik akımı geçince ısınmakta ve içerisinde elektron bulutu oluşmaktadır. Anot ile katot arasına elektrik akımı uygulandığında elektrik alan oluşur ve elektronlar anoda doğru radyal olarak hareket etmeye başlar. Anodun aşağısında ve yukarısında bulunan mıknatıslar anoda ve katoda paralel manyetik alan oluşturmakta bu şekilde manyetik alana dik yönde elektrik alan oluşmaktadır [Buffler, 1993; Coronel, 2005].

Elektromanyetik alan elektrik ve manyetik alan olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Şekil 2.2). Elektriksel ve manyetik alan çizgileri birbirine her zaman diktir ve dalga kılavuzu içinde elektromanyetik dalga olarak yol alırlar. Dalga kılavuzu, elektromanyetik dalganın kaviteye (gıdanın ısındığı bölüm) yönlendirilmesinde kullanılan dairesel veya dikdörtgensel kesit alanına sahip içi boş metal yapılarıdır. Dalga kılavuzunun iç ölçüleri ile hesaplanan en küçük frekans değeri kesim frekansı (cut-off frequency) değeri olarak adlandırılmakta, elektromanyetik dalga eşitliklerinin uygun sınır koşulları ile çözümü ile elde edilmektedir. Bu değer üzerinde elektromanyetik dalga, dalga kılavuzu boyunca ilerleyerek kaviteye ulaşmakta, bu değer altında mikrodalga yayılımı göstermemektedir. Dikdörtgensel kesitli dalga kılavuzu için (genişliği a, yüksekliği b) eşik frekans değeri Eşitlik 2.1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} + \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Dikdörtgenel dalga kılavuzları, TE (transverse electric) ve TM (transverse magnetic) modlarında çalışmakta ve TE_{nm} ve TM_{nm} olarak gösterilmektedirler. İki karşıt koordinat boyunca elektrik alan değişimini m, n alt indisleri göstermektedir. Genişlik (a) boyunca değişen dalganın sayısı m, yükseklik (b) boyunca değişen dalga sayısı n ile gösterilmektedir. Bu modların her biri kendilerine özgü kesim frekansı değeri ile ilişkilendirilmektedir. En küçük kesim frekansı değerine sahip modlar dominant mod olarak adlandırılmaktadır. Dikdörtgenel dalga kılavuzlarında TE_{10} modu dominant moddur [Chen vd. 2004].

Kavite, mikrodalga sistemlerde materyalin ısıtıldığı bölüme verilen addır. Kavite içerisinde mikrodalga enerji materyal tarafından absorbe edilir veya yansıtılır. Kavitede elektrik alan değişimleri, kaviteye giren mikrodalgaların metal duvarlardan yansması ile oluşmaktadır. Mikrodalga ile ısıtmada karşılaşılan en önemli problem, ürün içerisinde sıcak ve soğuk noktaların oluşmasıdır. Bu sorunun bir bölümü, kavite yapısı ile ilişkili olarak düşük ve yüksek elektrik alan değerlerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır [Buffler, 1993].

2.2.2. Elektromanyetik Teori

Elektromanyetik bilimi Maxwell eşitliklerinin geliştirilmesi ile başlamış ve elektromanyetik teorinin teorik temelleri atılmıştır. Maxwell, elektrik ve manyetik olgularının birbirleri ile ilişkili olduğunu farketmiş ve birbirleri ile ilişkisini elektromanyetik terimi ile açıklamıştır. Mikrodalga ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerjinin dağılımı Maxwell eşitliklerinin uygun sınır koşullarında çözümü ile belirlenmektedir.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.2 ve 2.4 elektrik alan kaynağını (ρ) manyetik alan etkisi olmaksızın tanımlamaktadır. Eşitlik 2.3 ve 2.5 ise elektrik alan ile manyetik alanın ilişkisini göstermektedir. Materyalin dielektrik özellikleri (elektriksel iletkenlik, elektrik alan ile etkileşimi, ϵ), materyalin manyetik alanla etkileşimi (μ) ve elektriksel iletkenlik değeri (σ) elektromanyetik alan ile materyalin etkileşiminin belirlenmesinde bilinmesi gerekli özelliklerdir. Bu özelliklerin elektrik ve manyetik alanla etkileşimi Eşitlik 2.6, 2.7, 2.8'de görüldüğü gibidir [Schubert ve Regier, 2005].

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \times \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \times \vec{H} \quad (2.7)$$

$$\vec{j} = \sigma \times \vec{E} \quad (2.8)$$

Materyalin elektrik alanla etkileşimi dielektrik özelliklerine (ϵ) bağlıken, manyetik alanla etkileşimi materyalin manyetik özelliklerine (μ) bağlıdır. Maxwell eşitliklerinin çözümü elektromanyetik dalga eşitliğini vermektedir (Eşitlik 2.9). Elektromanyetik dalgaların hızı, polarizasyonu, yansıması yayılım gösterdiği ortama bağlıdır.

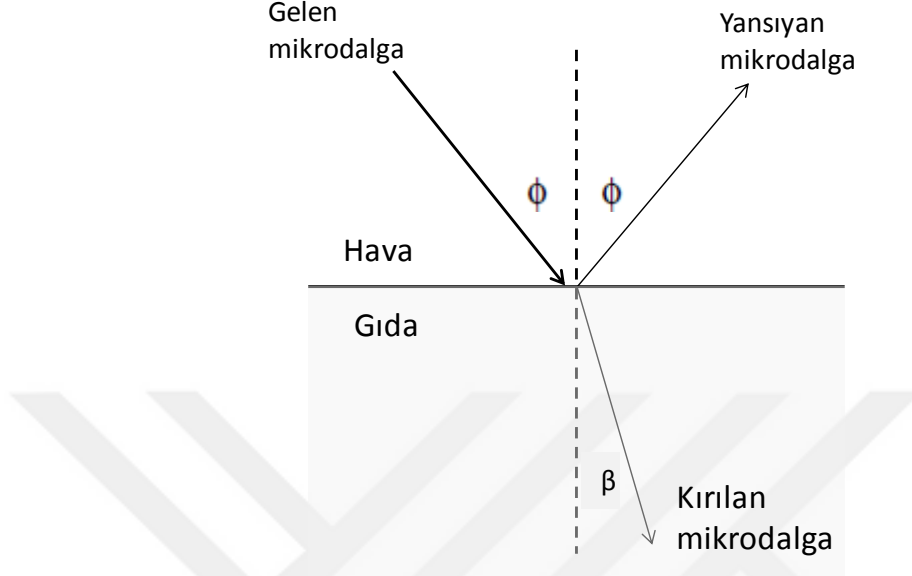
$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

Bu eşitlikte μ_r , materyalin manyetik alanla etkileşimini, k_0 dalga sayısını göstermektedir. Mikrodalga ile gıda hacimsel olarak ısınmakta ve dielektrik materyal tarafından absorbe olan mikrodalga enerji materyal içerisinde güç oluşumuna neden olmaktadır. Dielektrik gıda örneklerinde manyetik kayıp ısı enerjisinden çok düşük olduğu için (gıdalar manyetik materyal olarak sayılmazlar) sıfır olarak değerlendirilmektedirler [Deng, 2014; Schubert ve Regier, 2005].

2.2.3. Mikrodalga ısıtmanın esasları

Materyaller, mikrodalga enerji ile mikrodalgayı yansıtma, yayma, absorbe etme olmak üzere üç şekilde etkileşime girmektedir. Mikrodalganın hava

ortamından gıda ortamına geçişi; mikrodalğanın gıda içerisinde yön değiştirmesi ve bir kısım mikrodalğanın ara yüzeyden yansması şeklinde olmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Mikrodalğanın gıda ile etkileşimi

Mikrodalga ile ısınma davranışının anlaşılması, kavite içerisinde gıda ile mikrodalğanın etkileşiminin karmaşık olması dolayısıyla geleneksel yöntemlerle ısıtmanın anlaşılmasından daha zordur. Gıda tarafından absorbe edilen mikrodalga enerji ve bu enerjinin homojen dağılımı mikrodalga ile ısıtmanın iki önemli faktörüdür. Absorbe olan mikrodalga enerjinin seviyesi ve homojenliği, gıda ve kavite özelliklerinden etkilenmektedir. Gıdanın bulunduğu yerde elektromanyetik alan dağılımı ve gücü; gıdanın termofiziksel, dielektrik özelliklerine ve geometrisine bağlı olarak elektromanyetik dalgaların yansması ve absorpsiyonu, mikrodalga enerji absorpsiyon seviyesini etkilemektedir [Zhang ve Datta, 2001].

Mikrodalga ısıtmanın seviyesi, dalga boyu ve gıdanın dielektrik özelliklerine bağlıdır. Dielektrik özellikler kompleks bağıl elektriksel geçirgenlik (relative permittivity) eşitliği (Eşitlik 2.10) ile tanımlanmaktadır.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.10)$$

Bu eşitliğin gerçel kısmı, dielektrik sabiti (ϵ'), materyalin elektromanyetik enerjiyi absorbe etme kabiliyetini göstermektedir. Sanal kısım, dielektrik kayıp faktörü (ϵ''), materyalin absorbe ettiği elektromanyetik enerjiyi ısıya dönüştürme kabiliyeti ile ilgili bilgi vermektedir. Sanal kısmın gerçel kısma oranı, tanjant kayıp faktörü ($\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$) olarak adlandırılmakta ve mikrodalga enerjinin materyal içerisinde ne kadar kaybolduğunu göstermektedir [Meda vd., 2005; Coronel vd. 2008].

Dielektrik sabiti (ϵ') ve dielektrik kayıp faktörü (ϵ''), materyalin mikrodalga elektrik alanı ile etkileşimini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır [Buffler, 1993]. Elektromanyetik dalgaların frekansı, gıda materyalinin sıcaklığı, su ve tuz içeriği dielektrik özellikleri etkileyen faktörlerdir [Guan vd., 2004]. Gıdalar yüksek nem içeriğine ve yüksek dielektrik kayıp faktörüne sahiptir, bu nedenle mikrodalga enerji hızlıca absorbe edilmekte ve ısıya dönüştürülmektedir [Fellows, 1990]. Dielektrik özellikler sıcaklığın değişimi ile değişkenlik göstermektedir. Gıdaların sıcaklığındaki değişim, iyonların hareketliliğinin artması, jel yapının oluşması ya da bozulması, protein denaturasyonu gibi etkileri ortaya çıkarmakta, bu durumda dielektrik özelliklerin değişimine neden olmaktadır [Coronel vd., 2008]. Isıtma işlemi sırasında, sıcaklık değiştikçe dielektrik özelliklerin değişimi ile düşük kayıplı materyal yüksek kayıplı materyale dönüşebilmekte veya tam tersi olabilmektedir [Peyre vd., 1997].

Mikrodalga ile hızlı ve hacimsel ısıtma, mikrodalga enerjinin gıda içerisine penetre olması ile gerçekleşmektedir. Materyalin dielektrik özellikleri mikrodalga enerjinin gıda içerisine penetre olma miktarının belirlenmesi için kullanılabilir. Mikrodalga enerji gıdanın yüzeyine başlangıç güç seviyesinde ulaşır ve penetre oldukça enerji gıda tarafından absorbe edildiği için başlangıç güç seviyesinde azalma görülür [Salazar-Gonzalez vd., 2012]. Penetrasyon derinliği (D_p), materyalin yüzeyinden itibaren gücün e^{-1} ($1/2,7138 = \% 37$) kadar azaldığı uzaklıktır ve Eşitlik 2.11 ile hesaplanmaktadır [Dibben, 2001].

$$D_p = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (2.11)$$

Penetrasyon derinliği, frekansla ters orantılıdır; düşük frekanstaki mikrodalga daha derine penetre olmaktadır. Bu değer bilinişmesi gıdanın ısıtılmasının etkinliği ile ilgili bilgi vermekte, bu nedenle mikrodalga sistem geliştirilmesi sırasında bilinmesi gerekmektedir. Sürekli akış mikrodalga sistem tasarımlarında kullanılacak borunun çapının belirlenmesi için de bu değerin hesaplanması gerekmektedir [Salazar-Gonzalez vd., 2012]. Çok yüksek penetrasyon derinliği (kuartz cam için 16.000 cm) değeri, mikrodalga enerjisinin az absorbe edildiğini; düşük penetrasyon derinliği (metaller) daha çok yüzeyin ısındığını göstermektedir. İyon varlığı penetrasyon derinliğinin azalmasına neden olmakta ve yüzeyde ısınma daha baskın olmaktadır. Penetrasyon derinliği, materyalin boyutlarına göre büyükse enerji materyal içerisinden nerdeyse hiç azalmadan geçip gitmekte, eğer küçükse yüzeyde ısınma baskın olurken iç kısımlar ısınmamaktadır. Orta değerdeki penetrasyon derinliği değeriyle materyalin yüzeyi ısınırken, merkezi de önemli miktarda ısınmaktadır [Buffer, 1993]. Çizelge 2.1'de bazı gıdalara ait dielektrik özellikler ve penetrasyon derinlikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Bazı materyallerin dielektrik özellikleri ve penetrasyon derinliği değerleri*

Materyal	Sıcaklık (°C)	915 (MHz)			2450 (MHz)		
		ϵ'	ϵ''	D_p (mm)	ϵ'	ϵ''	D_p (mm)
Hava	-	1,0	0	-	1,0	0	-
Saf su	20	79,5	3,8	122,4	78,2	10,3	16,8
Tuzlu su (% 0,5)	23	77,2	20,8	22,2	75,8	15,6	10,9
Buz	-12	-	-	-	3,2	0,003	11.615
Mısır yağı	25	2,6	0,18	467	2,5	0,14	220
Elma	22	60	9,5	42,6	57	12	12,3
Kurutulmuş Elma	22	2,2	0,2	38,7	2,2	0,1	28,9

* Buffer, 1993

Materyallerin elektromanyetik alana verdikleri tepki sahip oldukları serbest ve bağı elektronların elektrik alan içerisinde yer değıştirmesi ve atomik momentlerinin manyetik alan içerisinde yönlenmesi şeklindedir [Chen vd., 2004]. Mikrodalğanın gıda materyali ile etkileşimi dipol ve iyonik etkileşim ile gerçekleşmektedir. Gıda materyallerinin çoğu değışen miktarlarda çözünmüş tuzlarla birlikte su içermektedir. Bu tuzlar çözüldüğünde molekül iyonize olur ve iki yüklü partiküle veya iyona parçalanır. Bunun gibi yüklenmiş iyonlar içeren gıda

materyalleri elektrik alanla etkileşime girebilir. Enerji, iyonlara ve sonra komşu atom veya moleküllere transfer olur. Bu mekanizma iyonik polarizasyon olarak adlandırılır.

Gıdanın içerisindeki su gibi polar moleküller tarafından mikrodalga enerji absorbe edildiğinde, bu moleküller değişen elektromanyetik alana uygun olarak dönme hareketi gerçekleştirmektedir. Bu sırada su molekülleri birbiriyle rastgele çarpışırlar ve sürtünme sonucunda sıcaklıkta artış meydana gelir. Bu mekanizma dipol rotasyon olarak adlandırılmaktadır [Buffler, 1992]. Isıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı, yoğunluk ve viskozite gibi materyalin termofiziksel özellikleri, gıda içerisine mikrodalga penetre olduktan sonra gıdanın nasıl ısınacağı ile ilgili bilgi vermektedir.

2.2.4. Mikrodalga Isıtma Uygulamaları

Gıda proseslerinde mikrodalga kullanılması sürekli taşıyıcı bantlı fırınların geliştirildiği 1960'lı yıllarda başlamıştır. Mikrodalga ısıtma son zamanlarda kurutma, pastörizasyon, sterilizasyon, çözdürme, pişirme, ısıtma gibi gıda üretim proseslerinde geniş uygulama alanı bulan alternatif teknolojilerdendir. Isıtma hızının yüksek olması, işlem süresini önemli düzeyde azaltması, daha homojen ısıtma sağlaması, sıcak yüzey bulunmaması, işlem kolaylığı ve geleneksel yöntemlere göre gıdanın kalite ve besinsel içeriğinde daha az değişime neden olması mikrodalga sistemlerinin gıda endüstrisinde kullanım oranının artmasına neden olmaktadır [Chandrasekaran vd., 2013].

Pastörizasyon/sterilizasyon işlemlerinin mikrodalga teknolojisi ile gerçekleştirilmesi ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Paketli gıdalar ve yumurta turşu gibi birçok katı gıdanın mikrodalga ile pastörizasyonu öne çıkan bazı çalışmalardandır. Paket içerisindeki et parçalarının mikrodalga ile sterilizasyonu ile geleneksel yöntemlere göre (otoklavda sterilizasyon) işlem süresi 1/4 ve 1/10 düzeyinde düşmektedir. İşlem süresinin azalması besin içeriğinin daha iyi korunmasına neden olmaktadır [Barbosa-Canovas vd., 2014]. Dev vd. (2008) kabuklu yumurtanın mikrodalga ile pastörize edilmesini incelemiştir. Yumurta kabuğu ve kabuk membranının iyi bir mikrodalga geçirgen materyal olduğunu ve yumurta kabuğunun,

pastörizasyon işlemi için uygun bir taşıyıcı olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmada yumurta sarısının ve beyazının mikrodalga ile ısınma davranışını incelemişler, daha düşük dielektrik özelliğe sahip yumurta sarısının yumurta beyazından çok farklı olmasa da daha iyi ısındığını belirtmişler ve homojen olmayan sıcaklık dağılımının incelenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yaptıkları diğer bir çalışmada [Dev vd., 2010] yumurtanın mikrodalga ve su banyosunda ısıtılması sırasında özelliklerinin (denaturasyon derecesi, viskozite, köpük oluşumu ve stabilitesi, bulanıklık) değişimini incelemişlerdir. Kabuklu yumurta, frekansı 2450 MHz olan mikrodalga fırın içerisinde 1 W/g güçte, yumurta beyazının sıcaklığı 58°C' ye gelene kadar (7 dk) ısıtılmıştır. Su banyosunda ısıtma ticari uygulama ile benzer olarak 60°C' de 20 dk süre ile uygulanmıştır. Denaturasyon derecesinin mikrodalga ile pastörize olan yumurtalarda daha yüksek olduğu, diğer özelliklerinin mikrodalga ile ısıtılan yumurtalarda su banyosunda işlem görenlere göre işlem görmemiş yumurtaya daha yakın olduğu rapor edilmiştir.

Sıcaklık uygulamasına hassas olduğu bilinen kuşkonmaz turşusuna uygulanan uzun süreli pastörizasyon işlemi yapısında bozulmaya neden olmaktadır. Lau ve Tang [2002], kavanoz içerisindeki kuşkonmaz turşusuna kısa süreli mikrodalga pastörizasyonu uygulamışlar ve geleneksel yöntemle üretilen ürünün tekstür özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Ürünü pilot ölçekli mikrodalga sistemde 915 MHz frekansta 88°C sıcaklığa kadar ısıtılarak, ısıtmanın homojenliğini belirlemişlerdir. Mikrodalga ile daha homojen ısınmanın gerçekleştiği ve işlem süresinin yarıya düştüğünü rapor etmişlerdir. Koskiniemi vd. (2011) sıvı içerisinde bulunan asitlendirilmiş sebze parçalarının mikrodalga ile pastörizasyonunu ve tuz miktarının ısınma davranışına etkisini araştırmışlardır. Gücü 5 kW, frekansı 915 MHz olan sürekli mikrodalga sistem kullanılarak materyal taşıyıcı bant üzerinde paket içerisinde pastörize edilmiştir. Alıkonma süresi 4 dk ve güç 4 kW olarak uygulanmış; tuzun dağılımının ve miktarının etkisinin önemli düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Tuz olmadığı durumda sıcaklığın sebze parçalarında odaklandığını, tuz miktarı arttıkça sebzelerin içerisine mikrodalga'nın penetrasyonunun azaldığını ve sıcaklıkta artışın daha düşük olduğunu rapor etmişlerdir.

Mikrodalga katı gıdaların yanı sıra akışkan gıdaların da ısıtılmasında etkin şekilde kullanılmaktadır. Literatürde bu işlemin kesikli ve sürekli uygulandığı çalışmalara rastlanmaktadır. Prosetya ve Datta (1991) su ve mısır yağının silindirik kap içerisinde mikrodalga fırında (2450 MHz) ısıtılması sırasında sıcaklık profillerini incelemişlerdir. Akışkan örneklerinin sıcak ve soğuk noktalarını farklı noktalarda eksensel ve radyal olarak yaptıkları ölçüm sonucu belirlemişlerdir. Silindirik kabın alt kısmında ısınmanın en az gerçekleştiğini, dielektrik ve ısı özellikleri nedeni ile mısır yağının suya göre daha çok ısındığını rapor etmişlerdir. Cinquanta vd. (2010), portakal suyunun mikrodalga ile pastörizasyonu pilot ölçekli mikrodalga sistemde (2450 MHz, 3 kW) kesikli olarak gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık 60, 70, 75, 85°C'ye çıkarılmış ve portakal suyunda pektin metil esteraz enziminin inaktivasyonu, karotenoid ve vitamin C içeriği incelenmiştir. Duyusal ve besinsel özellikleri ile ilgili bilgi veren karotenoid içeriğinde % 13; vitamin C içeriğinde ohmic ve infrared uygulamalarına göre daha az azalma olduğu rapor edilmiştir. Sıcaklık kontrolünün iyi yapılması durumunda mikrodalga ile ısıtmanın iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir. Benlloch-Tinoco vd. (2015) kivi püresinin mikrodalga ile ısıtılmasının geleneksel yöntemle göre üstünlüklerini incelemişlerdir. Kivi püresini mikrodalga fırın içerisinde 1000 W güçte ve 340 s süre ile ısıtmışlardır. Geleneksel ısıtmayı 97°C'de 30 s süre ile su banyosunda gerçekleştirmişlerdir. Mikrodalga ile kivi püresinin mikrobiyel ve enzim inaktivasyonunun eşit ve/veya daha iyi, aynı zamanda renk, antioksidan aktivite, biyoaktif bileşikler açısından da daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Depolama sonunda yapılan analizlerde, 123 gün boyunca 4°C'de depolanan mikrodalga ile ısıtılan kivi püresinin, 81 gün boyunca 4°C'de depolanan geleneksel yöntemle üretilen kivi püresine göre daha yüksek renk, vitamin C ve toplam fenol içeriğine sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Mikrodalga enerjisinin uygulandığı bu çalışmalarda akışkan gıdanın besinsel ve duysal özelliklerinin iyi olduğu görülmektedir. Ancak kesikli sistemlerde homojen olmayan sıcaklık dağılımı önemli bir problemdir. Geleneksel ısıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilse de, homojen olmayan sıcaklık dağılımı mikrodalga ile ısıtma uygulamalarında en sık karşılaşılan problemdir. Gıdanın fiziksel özelliklerine ve şekline bağlı olarak sıcaklık dağılımı farklılaşmaktadır. Bazı proseslerde ana problem aşırı ısınmanın

meydana gelmesi ile ürün kalitesinin olumsuz etkilenmesi ve yanık bölgelerin oluşmasıdır [Sundberg, 1998]. Kavite içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımının tekdüze olmaması bu olumsuzluğa neden olmaktadır. Kavite şekli ve materyal özellikleri elektromanyetik alan dağılımını etkilemektedir. Kavitenin şekli, dalga kılavuzunun kaviteye açıldığı bölge, döner tabla/ dağıtıcı gibi ekipmanlar elektromanyetik alan dağılımının farklılaşmasına neden olmaktadır. Ürünün şekli, boyutu, kalınlığı, dielektrik özellikleri, penetrasyon kalınlığı ürünün mikrodalga ile etkileşimini değiştirmektedir [Vadivambal ve Jayas, 2008]. Pastörizasyon/sterilizasyon proseslerinde ise istenenden az ısınma gerçekleşmesi ile soğuk bölgelerin oluşması meydana gelen problemlerdendir [Sundberg, 1998]. Homojen olmayan sıcaklık dağılımı nedeni ile son zamanlarda araştırmaların sürekli sistemlerde yapılmaya başlandığı dikkat çekmektedir. Bu sistemlerde akışkan mikrodalga geçirgen materyalden üretilmiş (cam veya teflon) boru içerisinden akarken mikrodalga enerji ile ısıtılmaktadır. Sürekli akış mikrodalga sistemler aseptik proseslerde plakalı ve boru tipi ısı değiştiricilerin yerine geçebilecek potansiyele sahiptir [Coronel vd., 2003; Kumar vd., 2007]. Sürekli akış mikrodalga sistemlerin tasarımı, ısıtma sırasında meydana gelen olumsuzlukların önüne geçebilecek şekilde gerçekleştirilmektedir.

2.3. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA SİSTEM

Son yıllarda sürekli sistemlerde mikrodalga pastörizasyon/sterilizasyon işlemlerine olan ilgi giderek artmış ve elma suyu [Tajchakavit ve ark., 1998; Gentry ve Roberts, 2005], portakal suyu [Nikdel vd., 1993; Tajchakavit ve Ramaswamy, 1995], süt [Villamiel vd., 1996; Sierra vd. 1999; Valero vd. 2000; Coronel vd., 2003], yer fıstığı içeceği [Sabliov vd. 2008] gibi düşük viskoziteli akışkan gıdaların bu teknoloji kullanılarak pastörize/sterilize edildiği çalışmalar yapılmıştır.

Meyve suyuna uygulanan ısıtma işlemi için geleneksel olarak boru tipi ısı değiştiriciler kullanılmaktadır ve tipik işlem süresi portakal ve elma suyu için sırasıyla 91°C'de 10-60 s ve 77-88°C'de 25-30 s'dir. Boru tipi ısı değiştiricilerin kullanımı ile boru yüzeyinde aşırı ısınma meydana gelmekte, bu da üründe kalite kaybına ve ısı değiştirici yüzeyinde kirlenmeye neden olmaktadır. Akış hızı

kargaşalı olarak ayarlanarak ürünün sıcak yüzeye teması azaltılarak, yüzeyde aşırı ısınma engellenmeye çalışılmaktadır [Nikdel vd., 1993; Tajchakavit vd., 1998]. Bu olumsuzluğun önüne geçmek için Nikdel ve Mackellar (1992) ve Nikdel vd. (1993) yaptıkları çalışmada portakal suyuna sürekli mikrodalga ısıtma sistemi ile pastörizasyon işlemi uygulamışlardır. Yapılan çalışmada portakal suyu sarmal şeklinde teflon boru içerisinde (ev tipi mikrodalga fırın, 2450 mHz) mikrodalga enerjisine maruz bırakılmıştır. Mikrodalga gücü % 100 kullanılmış ve akış hızı değiştirilerek istenilen çıkış sıcaklığı ayarlanmıştır. Bu işlem sonucunda mikrodalga enerji % 90 oranında absorbe edilmiş ve pektin metil esteraz (PME) aktivitesi % 99,9 azaltılmıştır. Mikrodalga pastörizasyon uygulanan portakal suyu ile işlem uygulanmamış taze portakal suyunun tat ve aroma özelliklerinde farklılık gözlemlenmediği rapor edilmiştir [Nikdel ve Mackellar, 1992]. Aynı sistemde portakal suyunun mikrodalga ile pastörizasyonunun yapıldığı diğer bir çalışmada, ısıtma işlemi 75-97°C aralığında 10-15 s uygulanmıştır. Mikrodalga pastörizasyonu uygulanmış örneklerde PME inaktivasyonunun geleneksel yöntemle benzer olduğu (% 98,5-% 99,5) ve daha fazla mikrobiyal inaktivasyonun sağlandığı görülmüştür. Mikrodalga ve geleneksel yöntemle üretilen ürünlere işlemin hemen ardından uygulanan duyu analizi sonucunda iki yöntem ile elde edilen ürün arasında herhangi bir fark görülmemiştir. Ancak portakal suyu 7-14 gün buzdolabı sıcaklığında depolandıktan sonra, geleneksel yöntemle üretilmiş ürünlerde bozuk tat hissinin daha fazla hissedildiği görülmüştür [Nikdel vd. 1993]. Tajchakavit ve Ramaswamy [1995] yaptıkları çalışmada mikrodalga enerjisinin enzimler üzerine ısıtma olmayan etkisini incelemiştir. Bu çalışmada akışın gerçekleştiği helikal boru (mikrodalgayı absorbe etmeyen materyalden üretilmiş) ev tipi mikrodalga fırın içerisine yerleştirilmiştir (2450 MHz, 700W). PME'nin inaktivasyon kinetiğini geleneksel ve mikrodalga ısıtma işlemi için incelemiştir. Bunun sonucunda PME'nin D_{60} değeri mikrodalga ısıtma için 22 s, geleneksel yöntemde ise 150 s olarak hesaplanmıştır. Mikrodalga ile ısıtılan üründe D değerinin yaklaşık 7,5 kat az olması mikrodalga enerjisinin ısıtma etkisinin yanı sıra ısıtma olmayan etkisinin olduğunu göstermiştir. Gentry ve Roberts (2005), yaptıkları çalışmada sürekli mikrodalga sistem ile elma suyu pastörizasyonunun etkinliğini araştırmışlardır. Bu amaçla mikrodalga fırının içerisine teflon helikal boruları 9 farklı noktada yerleştirmişlerdir. Akış hızı ürünün

çıkış sıcaklığı 73°C olacak şekilde ayarlanmış ve istenilen düzeyde mikrobiyel inaktivasyon sağlandığı görülmüştür.

Sütün işlenmesinde yaygın olarak plakalı ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Isı değiştiricilerde gerçekleştirilen ısıtma işlemi sırasında sütün sıcak ısı değiştirici yüzeyleri ile teması; tat, aroma ve renk gibi duyuşal özelliklerde istenmeyen değişimlere neden olmaktadır. Özellikle UHT süt üretiminde ürünün yüksek sıcaklıklara çıkması üründe pişmiş tat oluşumuna neden olmakta ve tüketici tarafından tercih edilmemesine neden olmaktadır. Süte uygulanan UHT işlemi 130 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda çok kısa süre (2-7 sn) uygulanan sürekli bir ısıtma işlemidir. Sürekli mikrodalga sistemde üretilen UHT sütün, serbest sütte acı tat oluşumuna neden olan sülfidril grup miktarının geleneksel üretilen süte göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu örneklerde sülfidril gruplarının disülfid formuna oksidasyonunu katalizleyen sülfidril oksidaz enziminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Duyusal analizlerde konvansiyel olarak üretilen UHT sütün renginin daha koyu; karamel, bayat ve yağlı tadın daha fazla olduğu belirlenmiştir. Her iki yöntemde de plazmin ve alkalın fosfataz enzim aktivitesinin olmadığı belirlenmiştir [Clare vd., 2005]. Valero vd. (2000)' nin yaptıkları çalışmada süte pastörizasyon işlemi geleneksel yöntem ve sürekli mikrodalga sistemle gerçekleştirilmiştir. Pastörizasyon işlemi 80 ve 92°C'de 15 s süre ile uygulanmış ve 15 gün süre ile 4,5 °C de depolanmıştır. Depolama sonunda her iki yöntemle üretilen pastörize sütlerde uçucu bileşen, monosakkarit konsantrasyonu ve duyuşal kalitesi incelenmiş ve aralarında farklılık olmadığı rapor edilmiştir. Sierra vd. (1999) yaptıkları çalışmada süte uyguladıkları pastörizasyon işlemini geleneksel yöntem (plakalı ısı değiştirici, 80°C - 0 ve 40 s) ve sürekli mikrodalga sistem (mikrodalga fırın içerisinde helikal boru, 2450 MHz, 85°C - 0 ve 40 s) ile uygulayarak sütün besinsel değerindeki değişimi B1 vitamini üzerinden değerlendirmişlerdir. Tutma tütünde bekletmeden önce mikrodalga ile ısıtma uygulanan sütün B1 vitamini içeriğinin geleneksel yöntemle göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tutma aşamasından sonra ise B1 vitaminindeki azalmanın her iki yöntemde aynı oranda olduğu rapor edilmiştir.

Coronel vd. (2003), yaptıkları çalışmada sütün (yağsız, çikolatalı, % 1,5 ve % 4 yağ oranına sahip) sürekli akış mikrodalga sistemde ısıtılması sırasında sıcaklık

dağılımını araştırmışlardır. Mikrodalga sistem (frekansı 915 MHz, gücü 5 kW), mikrodalga enerjinin borunun merkezine odaklanacağı şekilde tasarlanmıştır. Akış, 0,039 m iç çapında ve 0,124 m uzunluğa sahip boruda 2 L/min ve 3 L/min akış hızlarında uygulanmıştır. Sistem çıkışında sıcaklık profilini elde etmek için 8 adet T tipi ısı çifti içeren sıcaklık ölçüm düzeneği tasarlanmıştır. Isıl çiftleri istenilen yerlere bakır tüpler yardımıyla yerleştirmişler ve bu düzeneği 90° döndürerek sıcaklık ölçümünü 4 kez tekrarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda farklı süt çeşitleri için ısınma davranışının farklılık göstermediği ve homojen sıcaklık dağılımının elde edildiği rapor edilmiştir.

Literatürde sürekli mikrodalga sistem ile ısıtma işlemi düşük viskoziteli gıdalara uygulanmasının yanı sıra meyve ve sebze püreleri [Coronel vd., 2005; Kumar vd., 2007; Steed vd., 2008], krema [Nordqvist, 2011], çorba [Raaholt vd., 2011] gibi yüksek viskoziteye sahip ürünlere de uygulandığı görülmektedir. Yüksek viskoziteye sahip ürünlerin termal difüzyon değeri düşük olduğu için ürünün en soğuk noktası ısınana kadar ürünün kalite özelliklerinde ve besin içeriğinde önemli değişimler görülmektedir. Sürekli mikrodalga sistem ile ısıtma işlemi, üründe hacimsel ısınma sağlamakta ancak viskozitesi yüksek gıdalarda ısı iletimi etkin olarak konduksiyon ile gerçekleştiği için sıcaklık dağılımı homojen olmamaktadır. Bu nedenle sürekli mikrodalga sistem tasarımlarında sisteme karıştırıcı eklemek gibi modifikasyonlar yapılarak homojen sıcaklık dağılımı sağlanmaya çalışılmaktadır.

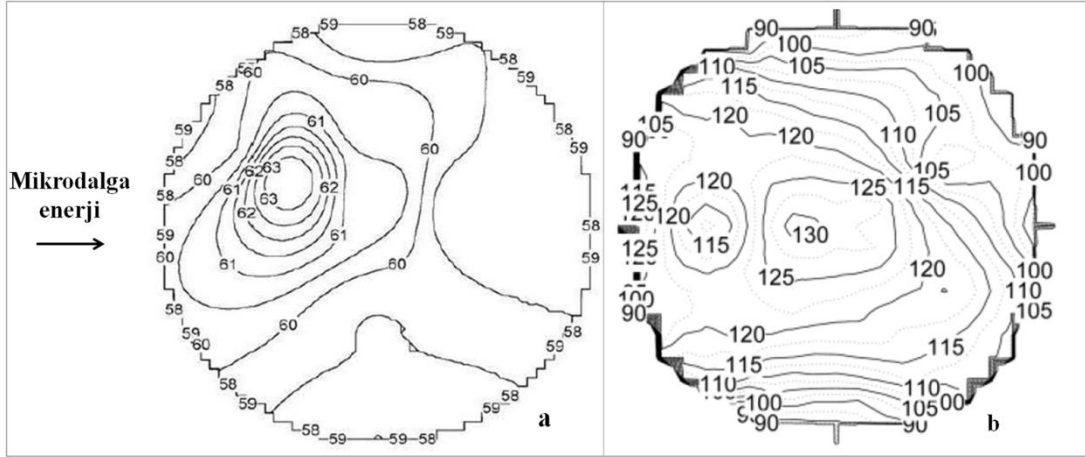
Sürekli mikrodalga sistem ile pasta kremasına (yumurta sarısı, şeker, krema, süt tozu, tuz karışımı) ısıtma işlemi daha yüksek proses etkinliği ve daha düşük enerji tüketimi amacıyla uygulanmıştır. Pasta kremasına ısıtma işlemi (74°C'den yüksek sıcaklıklarda 6 dk) pastörizasyon amacının yanı sıra son üründe istenilen tekstürün (yayılması kolay, tamamen yumuşak ve hoş giden tatta) elde edilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Bu amaçla, tünel fırın ve sürekli akış mikrodalga sistem olmak üzere iki farklı pilot sistemde ısıtma işlemi uygulanmıştır. Sürekli akış mikrodalga sistemde boru içerisinde akış hızının en yüksek olduğu orta noktada yüksek elektrik alan değeri ve akış hızının daha düşük olduğu boru çeperlerinde düşük elektrik alan dağılımı olacak şekilde tasarlanan bir sistem kullanılmıştır. Bu sistemde yapılan ısıtma işlemi sonucunda son üründe yanık bölgeler oluşmuş ve bu sistemin pasta

kremasını ısıtmak için uygun olmadığı görülmüştür. Homojen ısıtmanın gerçekleşmesi için sisteme karıştırıcı eklenmesi veya tasarımın helikal boru ile tasarlanması önerilmiştir. Tünel fırın içerisinde ısıtma işleminde pasta kreması tepsilere içerisinde ısıtılmıştır. Her biri 1 kW güce sahip 20 magnetronun fırın boyunca art arda dizildiği bu sistemde uygulanan ısıtma işleminin daha homojen olduğu görülmüştür. Buna rağmen son üründe ağırlık kaybı olması ,tepsinin alt kısmında su birikmesi ve açık sistem olması nedeniyle mikrobiyal açıdan uygun olmaması, yapılacak modifikasyonlarla sürekli akış mikrodalga sistemin daha uygun olacağını göstermiştir [Nordqvist, S., 2011).

Sebze ve meyve püreleri çorba, içecek, bebek maması üretiminde başlıca hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu ürünlerin saklanması amacıyla dondurma ve konserve teknolojileri kullanılmaktadır. Dondurma işlemi pürelerin saklanması için kabul görmüş bir işlemdir ancak taşıma, depolama ve işlem öncesi çözündürme gereksinimi nedeniyle maliyet yüksek olmaktadır. Konserve teknolojisinde ise, pürenin ısı özelliklerinin düşük olması nedeniyle ürün merkezi ısınana kadar yüzey kısımlarda yanma meydana gelmektedir. Elde edilen ürünün rengi koyu olmakta ve yanık tat nedeniyle kabul edilebilirliği azalmaktadır [Coronel vd., 2005] . Bu olumsuzlukların önüne geçmek amacıyla son zamanlarda sürekli mikrodalga teknolojisi öne çıkan yöntemlerdendir. Coronel vd. (2005) 5 kW ve 60 kW gücündeki 915 MHz dalga boyundaki silindirik mikrodalga aplikatör kullanarak sürekli sistemde tatlı patates püresine ısıtma uygulamış, tüpün duvarı ile merkezi arasında yüksek sıcaklık farkının olduğu görülmüş ve sisteme karıştırıcı dahil edilerek homojen sıcaklık dağılımı sağlamışlardır. 5 kW gücündeki sistemde ısıtma uyguladıkları ürünün renk ve viskozitesinde işlem görmemiş göre değişiklik olmadığını görmüşlerdir. 60 kW güce sahip mikrodalga sistemde patates püresine 135 °C de 30 s ısıtma işlemi uygulamışlar ve aseptik olarak paketledikleri üründe 90 gün sonunda mikrobiyal gelişim olmadığını rapor etmişlerdir. Aynı sistemde Steed vd. (2008)' nin yaptıkları çalışmada mor tatlı patatesin sterilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sterilizasyon işlemi 135-145°C'de 30 s olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlem sonucunda son ürünün renginin işlem görmemiş üründen farklı olmadığı görülmüştür. Son ürünün toplam fenolik madde içeriğinde artış görülürken, antosiyanin miktarında azalma olduğu görülmüştür.

Aseptik olarak paketlenmiş tatlı patates püresinin ticari satışını gerçekleştiren YAMCO (North Carolina, ABD, 2014) firması; sürekli mikrodalga sistemle üretilen ürünün doğal renk, tat, taze görünüm, arzu edilen tekstürünün konserve ve geleneksel yöntemle ısıtılmış ürünlere göre daha iyi olduğu ve tüketici kabul edilebilirliğinin bu ürünlerde % 68, konserve ve geleneksel yöntemle üretilmiş üründe % 5 ve % 1 olduğunu belirtmişlerdir. Isaksson (2002), yaptığı çalışmada ciğer ezmesinin sürekli akış mikrodalga sistemde ısıtılmasının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Geleneksel yöntemle ciğer ezmesi buharlı fırınlar kullanılarak ısıtılmaktadır. Bu çalışmada ürünün mikrodalga enerji ile ısıtılarak çalışma saatleri, ekipman temizliği maliyeti ve harcanan enerjinin azaltılacağı düşünülmektedir. Sürekli akış mikrodalga sistem TM 120 ve TM 020 modunda mikrodalga enerjisi borunun yüzeyine ve merkezine odaklayan iki farklı kaviteden oluşmaktadır. Tasarlanan bu sistem ile akışkan ürünün en yavaş hıza sahip olan yüzeyi ve sonra merkezi ısıtılmaktadır. Geleneksel yöntemle ve sürekli akış mikrodalga sistem kullanılarak üretilmiş ürünün tat ve görünüşünün benzer olduğu bildirilmiştir.

Sürekli sistemlerde mikrodalga ile ısıtma işlemi uygulanan düşük viskoziteli gıdalarda sıcaklık dağılımı homojen gerçekleşmekte (Şekil 2.5-a) ancak viskozitesi yüksek akışkan gıdalarda homojen sıcaklık dağılımının gerçekleşmediği (Şekil 2.5-b) görülmektedir. Şekil 2.5-a'da gücü 5 kW olan mikrodalga sistemde, 3 L/min akış hızında yağsız sütün ısıtılmasının homojen sıcaklık dağılımı meydana getirdiği görülmektedir. Şekil 2.5-b'de ise 5 kW güçteki mikrodalga sistemde, 0,5 L/min hızda akan patates püresinin sistem çıkışındaki sıcaklık dağılımı gösterilmekte ve merkez ile duvar arasındaki sıcaklık farkının yaklaşık 40°C olduğu görülmektedir. Aynı çalışmada 60 kW güce sahip mikrodalga sistemde ise sıcaklık farkının 75°C olduğu rapor edilmiştir [Coronel vd., 2005]. Viskozitesi düşük gıdalarda ürün ısınırken doğal konveksiyon akımları nedeni ile sıcak ile soğuk bölge yer değiştirmekte ve buna bağlı olarak homojen sıcaklık dağılımı gerçekleşmektedir. Viskozitesi yüksek gıdalarda ise ısı iletimi etkin olarak konduksiyon ile gerçekleştiği için homojen olmayan sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.5. Sürekli mikrodalga sistemde ısıtılan (a) süt [Coronel vd., 2003] ve (b) patates püresine [Coronel vd. 2005] ait sıcaklık dağılımları

Yapılan bir diğer çalışmada ise [Salvi vd., 2009] musluk suyu, ağırlıkça % 3'lük tuzlu su ve ağırlıkça % 0,5'lik karboksimetil selüloz (CMC) çözeltisi sürekli akış mikrodalga sistemde ısıtılmış, dielektrik ve termofiziksel özelliklerin sıcaklık dağılımına etkisini incelenmiştir. Hacimsel akış hızının 1 L/min olduğunda maksimum sıcaklık farkı tuzlu su ile 10°C, saf su ile 16°C ve CMC çözeltisi ile 60°C olarak ölçüldüğü rapor edilmiştir. Bütün akış hızlarında (1; 1,6; 2 L/min) saf su ve tuzlu suyun sıcaklık dağılımının CMC çözeltilerinden daha homojen olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalarda sürekli mikrodalga ısıtma sistemleri, boru içerisinde akmakta olan ürünün parabolik hız profiline (tam gelişmiş laminar akış profili) uygun olarak tasarlanmakta ve en yüksek hıza sahip olan, bu nedenle de sistemde en kısa süre kalan elemanın bulunduğu bölgeye (borunun orta noktası) enerjiyi odaklamaktadır. Bu durum viskoz ürünlerde enerjinin odaklandığı yerde aşırı ısınma gerçekleşmesine neden olmakta ve ürün yanarak kalite olumsuz etkilenmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda mikrodalga ile viskozitesi yüksek akışkan gıdaların homojen ısıtılması için mevcut tasarımların iyileştirilmesine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Coronel vd. (2005) homojen sıcaklık dağılımı sağlamak amacı ile mikrodalga aplikatörün çıkışına karıştırıcı ekleyerek patates püresinin sıcaklık dağılımını homojen hale getirmişlerdir. Tez kapsamında akışkan içerisinde homojen sıcaklık dağılımını sağlamak için endüstride sıklıkla kullanılan helikal borulardan yararlanılmıştır.

2.4. HELİKAL KONFİGÜRASYONLU SİSTEMLERDE ISI TRANSFERİ

Düz dairesel kesitli borular, akışkanlar mekaniği, ısı - kütle transferi ve kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği proseslerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Akışkanın düz boruda akışı sırasında, hızının merkezde en yüksek, boru duvarına doğru azalan ve duvarda sıfır olan (kaymazlık koşulu) değişimi ile parabolik hız profili oluşmaktadır (Şekil 2.6). Akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olan viskozite akışkanların en önemli özelliklerinden biridir. Akışkanlar Newtonumsu ve Newtonumsu olmayan akışkanlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Newtonumsu akışkanlarda viskozite kayma hızından etkilenmezken, Newtonumsu olmayan akışkanlarda kayma hızının değişimiyle akmaya karşı olan dirençte değişmektedir. Pseudoplastik, dilatant ve Bingham plastik tipi akışkanlar Newtonumsu olmayan akışkanlardır. Viskozite, pseudoplastik akışkanlarda kayma hızı artışı ile azalırken, dilatant tipi akışkanlarda kayma hızı arttıkça artış göstermektedir. Akış davranış indeksi pseudoplastik akışkanlar için 1'den küçük, dilatant akışkanlar için 1'den büyük değerdedir. Meyve püresi, margarin, domates salçası birçok gıda prosesinde akışkanlar pseudoplastik davranış göstermektedir ve bu akış davranışı en iyi Power-Law eşitliği ile açıklanmaktadır (Eşitlik 2.12).

$$\sigma = m\dot{\gamma}^n \quad (2.12)$$

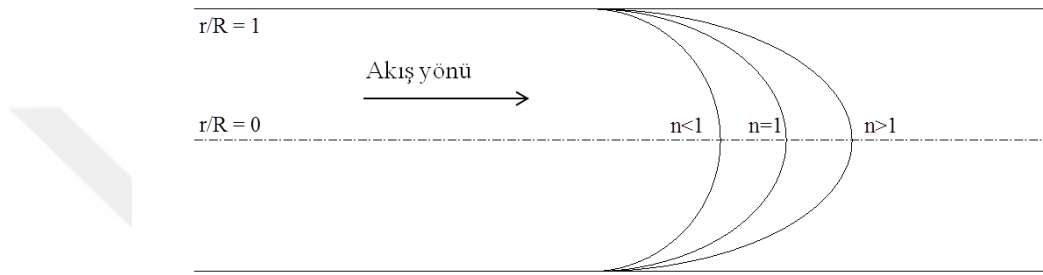
Newtonumsu olmayan akışkanlarda kayma hızına bağımlı olan viskozite, görünür viskozite olarak adlandırılmaktadır. Tam gelişmiş akış koşullarında Newtonumsu ve Newtonumsu olmayan akışkan için katmanlı akış koşullarındaki hız profilleri Şekil 2.6'da gösterildiği gibidir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi akış davranış indeksi azaldıkça hız profili düzleşmektedir. Herhangi bir radyal noktada ortalama çizgisel akış hızı Eşitlik 2.13 ile hesaplanmaktadır.

$$u = \bar{u} \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] \quad (2.13)$$

En yüksek çizgisel hız değeri borunun merkezinde ($r = 0$) görülmekte ve Eşitlik 2.14 ile hesaplanmaktadır.

$$u_{max} = \bar{u} \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \quad (2.14)$$

Newtonumsu akışkanlar için bu eşitlik $u_{max}/\bar{u} = 2$ iken, pseudoplastik akışkanlar için 2'den küçük olmaktadır. Bu orandaki azalma hız profilinin düzleştiğini göstermekte, akış davranış indeksi küçüldükçe akış profili tapa akışına yaklaşmaktadır. Bu durum ısı işlemin homojenliğini arttırması açısından önemlidir [Palazoğlu, 2001].

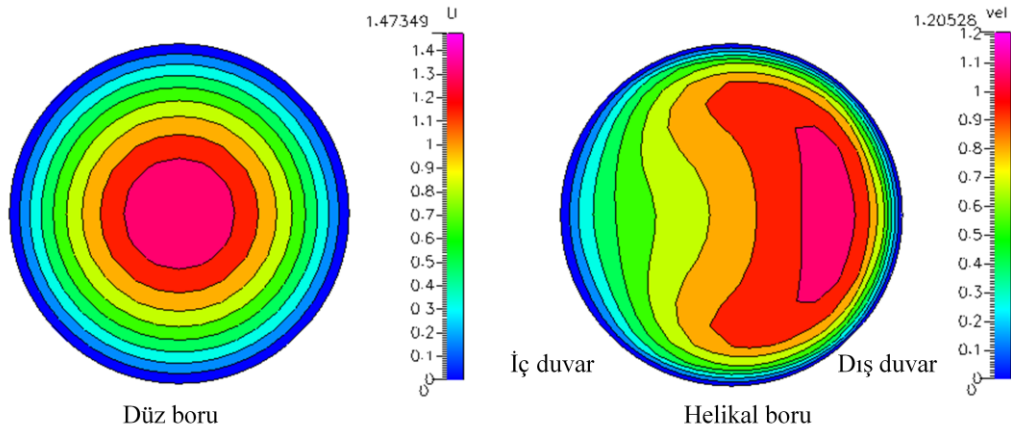


Şekil 2.6. Katmanlı akış koşullarında Newtonumsu ve Newtonumsu olmayan akışkanlar için düz boruda hız profili (Palazoğlu, 2001)

Düz borularda katmanlı akış koşullarında borunun duvarından merkeze doğru homojen olmayan sıcaklık dağılımının gerçekleşmesi proseslerde karşılaşılan en önemli problemlerdendir. Sürekli sistemlerde maksimum ve minimum hız değerlerini birbirine yaklaştırmak, sıcaklık değişimlerini azaltmak için karıştırma sağlamak veya kimyasal reaktörlerde tepkime hızını artırmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu amaçla kargaşalı akış sağlamak en sık kullanılan yöntemlerdendir. Ancak uzun molekül zincirli akışkanların kullanıldığı sistemlerde yüksek kayma geriliminin akışkan yapısına zarar verebilmesi ve kargaşalı akış oluşumunun enerji tüketimini artırması nedeniyle her zaman uygulanabilir bir yöntem değildir. Aynı zamanda viskoz ve/veya Newtonumsu olmayan akışkanların kullanıldığı bazı proseslerde yüksek görünür viskozite nedeniyle kargaşalı akışı sağlamak oldukça güç olmaktadır [Castelain ve Legentilhomme, 2006]. Bu nedenle ısı transferini ve karışma etkisini artırmak amacıyla aktif ve pasif yöntemler kullanılmaktadır. Uygulanan aktif yöntemlere sistem içerisine statik karıştırıcılar yerleştirilmesi örnek olarak verilebilirken, düz boru yerine helikal boruların kullanılması uygulanan pasif yöntemlerdendir. Her iki yöntemde amaç maksimum

ve minimum hız değerlerinin birbirine yaklaştırılması ile daha homojen akış profili elde edilmesidir. Ancak statik karıştırıcıların geometrilerinin karmaşıklığı temizliğini zorlaştırmakta, hijyenin önemli olduğu gıda proseslerinde kontaminasyon riskinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum helikal boruların kullanımını daha avantajlı hale getirmektedir.

Helikal borular yüksek ısı transfer katsayısı nedeni ile endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Helikal borularda akış sırasında merkezkaç kuvveti etkisi ile radyal yönde basınç gradyanı oluşmakta ve akış şekli değişmektedir. Borudaki kavis, dairesel hareket nedeni ile ikincil akış oluşturmakta ve bu hareket sıvı parçacıkların borunun dış kısmına doğru savrulmasına neden olmaktadır. Radyal karışım sağlanması, maksimum ve minimum hız değerlerinin birbirine yaklaşması, helikal ısı değiştiricilerin endüstriyel uygulamalarda düz boruya oranla daha avantajlı olmasına neden olmaktadır. Bu durum helikal boruların geleneksel ısı değiştiricilerde viskoz sıvı gıdaların ısıtılması/soğutulması proseslerinde kullanılmasına neden olmuştur [Kumar vd., 2006; Palazoğlu ve Sandeep, 2004]. Şekil 2.7'de düz ve helikal geometrili borularda radyal akış profili gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Düz ve helikal boruda meydana gelen hız profilleri (Palazoğlu, 2001)

Helikal borularda akış hareketi ilk olarak Eustice tarafından 1911'de gözlemlenmiş ve akışın matematiksel olarak tanımlanması Dean tarafından 1927, 1928 yıllarında gerçekleştirilmiştir [Rennie, 2004]. Eustice (1911), düz ve eğimli

borulardaki akışa olan direnç ile ilgili çalışmış ve eğimli borularda akışa olan direncin düz boruya göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Dean (1927, 1928) teorik olarak yaptığı çalışmalarla helikal borularda eğim nedeniyle akış hızının azalmakta olduğunu bildirmiştir [Kubair ve Varrier, 1962]. Yapılan çalışmada helikal dairesel kesitli borularda merkezkaç kuvveti nedeniyle simetrik girdaplar oluştuğu belirtilmiş ve ikincil akış kuvvetinin belirlendiği Dean sayısı ($Dn = Re\sqrt{d/D}$; d, borunun iç çapı, D, helikalin kavis çapı) belirlenmiştir [Palazoğlu ve Sandeep, 2004].

Sürekli akış sistemlerinde helikal boru kullanımı ile eksensel hız dağılımı azalmakta ve akış tıpa akışına (plug flow) yaklaşmaktadır. İkincil akış etkisi kesit alanı içerisinde moleküllerin sürekli yer değiştirmesi sonucu en yüksek hız ve en düşük hız değeri oranını azaltmaktadır. Bu durumda daha homojen hız dağılımı gözlemlenmekte ve basınç düşüşünün ikincil akış oluşumu ile kargaşalı akışa göre daha düşük olması nedeni ile daha az enerji sarfiyatı sağlanmaktadır. İkincil akış oluşumuna neden olan merkezkaç kuvveti borunun merkezindeki akışkanı etkilemektedir. Bu etki ile merkezdeki akışkan sürekli olarak dışa doğru savrulmakta ve birbirine simetrik iki hız profili görülmektedir. Katmanlı ve kargaşalı akışta en güçlü ikincil akış etkisi helikal yapıda gözlemlenmiştir. Helikal borularda stabil katmanlı akış profili Reynolds sayısının 8000 ve üzerinde olduğu durumda gerçekleşmekte ve düz borudakinden yaklaşık dört kat daha fazla basınç düşüşü meydana gelmektedir ve bu güçlü ikincil akış oluşumunu göstermektedir [Koutsky ve Adler, 1964].

Helikal ısı değiştiriciler gıda ve kimya endüstrisinde kullanılan ısı değiştirici çeşitlerinden bir tanesidir. Bu ısı değiştiricilerin kompakt olması, akışkanın karışması ile ısı transfer hızını artırması ve ısınmanın homojen gerçekleşmesi gibi avantajlara sahiptir [Coronel, 2001]. Literatürde ısı transfer katsayısının helikal ısı değiştiricilerde düze göre daha yüksek olduğu rapor edilmiştir [Kumar vd. 2006; Prabhanjan vd. 2002; Wu vd. 2013]. Yapılan çalışmalarda boru duvarından akışkana ısı transferi sabit sıcaklık sınırlarında gerçekleşmektedir. Helikal boruların mikrodalga sistem içerisinde kullanılması ile ilgili araştırma çok az sayıdadır. Nikdel ve Mackellar (1992), Nikdel vd. (1993), Tajchakavit ve Ramaswamy (1995),

Gentry ve Roberts (2005) yaptıkları çalışmalarda sürekli akış mikrodalga sistem ile ısıtmada helikal borulardan yararlanmışlardır. Laboratuvar ölçekli sistemlerde düşük viskoziteli gıdaların ısıtıldığı bu çalışmalarda gıda örneklerinin mikrobiyel ve enzim özellikleri incelenmiştir. Helikal borunun mikrodalga sistem içerisinde kullanımının sıcaklık dağılımı üzerine etkisi ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada helikal boruların sürekli akış mikrodalga sistem içerisinde kullanımı ile mikrodalga fırınlar içerisindeki döner tabla etkisinin sağlanması ve sıcaklık dağılımının homojenleştirilmesi amaçlanmaktadır.

2.5. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA ISITMA ÜNİTESİNİN SAYISAL BENZETİMİ

Son zamanlarda önem kazanan matematiksel modelleme yöntemi proses tasarımı ve optimizasyonu aşamasında önemli ölçüde zaman, maliyet ve emekten tasarruf sağlamaktadır. Matematiksel modelleme çok sayıda deney yapmaya gerek kalmadan kritik proses koşullarının belirlenmesini sağlamaktadır. Gıdaların mikrodalga ile ısıtılmaları sırasında ürün içerisindeki sıcaklık artışının ve dağılımının belirlenmesi deneysel olarak ve sayısal benzetim yöntemleri ile gerçekleştirilebilir. Homojen olmayan sıcaklık dağılımı ve aşırı sıcak noktaların oluşması mikrodalga teknolojisinin kullanılmasını kısıtlamaktadır. Bu olumsuzluğun önüne geçilebilmesi, kavitenin içerisinde elektromanyetik alanın tekdüzeleştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Mikrodalga kavite içerisinde meydana gelen elektromanyetik alanın sayısal benzetimi bu problemin çözümüne kolaylık sağlamaktadır.

Gıdaların mikrodalga fırın içerisinde ısıtılmasının sayısal benzetimi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Sıcaklık dağılımlarının gıda içerisinde tahmini, elektromanyetik alan ile ısı transferi eşitliklerinin eş zamanlı çözüldüğü bilgisayar tabanlı programlar kullanılarak veya analitik olarak gerçekleştirilmektedir. Mikrodalga ile ısıtmanın sayısal benzetimi ile ilgili yapılan çalışmalar; döner tabla kullanımının sıcaklık dağılımına etkisinin belirlenmesi [Geedipalli vd., 2007; Pitchai vd. 2014], materyal özellikleri ve boyutlarının sıcaklık dağılımına etkisi [Zhang ve Datta, 2005a-b; Knoerzer vd., 2008; Rakesh vd., 2010; Hossan vd., 2010] akışkanlarda doğal konveksiyon etkisinin sıcaklık dağılımına etkisi [Zhang vd., 2000; Cherbański ve Rudniak, 2013] gibi başlıkları içermektedir. Yapılan

çalışmaların çoğunlukla kesikli mikrodalga sistemlerde ısıtmanın modellenmesi üzerine olduğu, son zamanlarda ise sürekli mikrodalga sistemlerin sayısal benzetimi ile ilgili çalışmaların öne çıktığı görülmektedir.

Sürekli akış mikrodalga sistemlerin sayısal benzetimi ile ilgili çalışmalar sistem tasarımı ve geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir [Sabliov vd., 2007; Zhu vd., 2007b; Salvi vd., 2010; Salvi vd., 2011; Muley ve Boldor, 2012; Cuccurollo vd.,2013; Cuccurollo vd.,2014]. Akışkan gıdaların sürekli mikrodalga sistemlerde ısıtılması elektromanyetik dalgaların neden olduğu ısı üretimi, kondüksiyon ve konveksiyonla gerçekleşen ısı transferi ve sürekli akışı kapsayan karmaşık bir süreçtir. Sayısal model, elektromanyetik alan dağılımının belirlenmesi için Maxwell eşitliklerinin, akışkanda meydana gelen ısı transferinin hesaplanması için Fourier enerji denklemlerinin ve akış profilinin belirlenmesi için Navier-Stokes eşitliklerinin çözümü ile gerçekleştirilir [Sabliov vd., 2007]. Elektromanyetik modellemenin gerçekleştirilmesi için bilgisayar tabanlı birçok program kullanılmaktadır. COMSOL Multiphysics, ANSYS Multiphysics, Microwave Studio, Quickwave-3D, MEFiSTo-3D bu programlardan bazılarıdır (Yakovlev, 2001).

Cuccurollo vd. (2013) yaptıkları çalışmada sürekli akış mikrodalga sistemi analitik ve sayısal (COMSOL Multiphysics) olarak modellemiştir. Mikrodalga sistem (frekansı 2450 MHz ve gücü 2 kW) içerisinde geçen PTFE boruda (iç çap 0,006m ve uzunluk 0,9 m) suyun ısıtılması sayısal olarak modellenmiştir. Analitik ve sayısal çözüm ile 0,02 m/s, 0,04 m/s, 0,08 m/s, 0,16 m/s akış hızlarında hesaplanan yığın sıcaklık değerlerinin boru çıkışında uyumlu değerlerde olduğu, boru boyunca farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Her iki yöntemde konvektif enerji ile mikrodalga ısı üretiminin oranına bağlı olarak düşük veya yüksek merkez sıcaklık değeri elde edildiği rapor edilmiştir. Yaptıkları diğer çalışmada aynı sistemde farklı boru iç çapında (8 mm) suyun ısıtılmasının sayısal modelinin deneysel doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir [Cuccurollo vd., 2014]. Boru boyunca sıcaklık ölçümü için infrared kamera ile termal görüntüler elde edilmiştir. Başlangıç sıcaklığı 40 °C - 50 °C ve akış hızı 4 g/s - 5,7 g/s olan suyun sayısal ve deneysel sıcaklık sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir. Akış hızı arttıkça karekök ortalama hata

değerinin azaldığını ve sayısal benzetimin daha güvenilir hale geldiğini bildirmişlerdir.

Isaksson, S. (2002), yaptığı çalışmada ciğer ezmesinin ısıtılması için tasarlanan sürekli akış mikrodalga sistemin boyutlarını belirlemek için öncelikle sistemi sayısal olarak modellemiştir. Sayısal benzetimi Quickwave 3D programı ile üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiş ve akış tapa akış olarak varsayılmıştır. Sürekli akış mikrodalga sistem TM 120 ve TM 020 modunda mikrodalga enerjisi borunun yüzeyine ve merkezine odaklayan iki farklı kaviteden oluşmaktadır. Kavite radyal olarak karşılıklı iki dalga kılavuzuna (TE 10) sahiptir. Ürünün 75°C'de sistemden çıkması için kavite boyutları TM 020 moda sahip kavitenin çapı 136 mm, yüksekliği 408 mm ve TM 120 moda sahip kavitenin çapı 157 mm, yüksekliği 434 mm olarak hesaplanmıştır. TM 020 moda sahip kavitede 0,3 kW, TM 120 moda sahip kavitede 1 kW mikrodalga güç uygulanmıştır. Ürünün aktığı boru iç çapı 20 mm ve akış hızı 0,5 L/min dir. Sayısal benzetimde borunun merkezinin beklendiğinin aksine daha çok ısındığı görülmüştür. Akışın gerçekte tam tapa akışı gerçekleşmeyeceği ve boru duvarında akışkanın hızının daha yavaş olması nedeni ile boru duvarında sıcaklık artışının daha fazla olacağını öngörmüşlerdir. Boru çıkışında sıcaklık dağılımı infrared kamera ve ısı çiftleriyle ölçülmüştür. Çiğ ürün teflon boru içerisine koyulduktan sonra 5-10 s ısıtılmış ve boru eksensel olarak kesilerek infrared kamera ile termal görüntü elde etmişlerdir. Kesit alanındaki sıcaklık dağılımı boru çıkışında 4 farklı noktada ısı çiftleriyle ölçülmüştür. Merkez sıcaklığının çıkışta elde edilen sıcaklık dağılımında en yüksek değerde olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeninin, ekipman üretimi nedeni ile kaviteelerde istenilen modların elde edilmemesi, ürünün homojen dağılmaması, kondüksiyon etkisi ve sıcaklık ölçümünde olabilecek hatalar olabileceği rapor edilmiştir.

Zhu vd. (2007b), Sabliov vd. (2007), Salvi vd. (2010), Salvi vd. (2011), Muley ve Boldor (2012) yaptıkları çalışmalarda, boru içerisinde akmakta olan ürünün parabolik hız profiline uygun olarak tasarlanan ve en yüksek hıza sahip olan bölgeye (borunun orta noktası) mikrodalga enerjinin odaklandığı sürekli akış mikrodalga ısıtma sistemleri ile ilgili çalışmışlardır. Bu çalışmaların amacının hem

sürekli akış mikrodalga sistemin modellenmesinin incelenmesi hem de tasarlanan sistemin geliştirilmesi olduğu görülmektedir.

Zhu vd. (2007b) sürekli akış mikrodalga sistem ile ısıtmanın analitik çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada elma sosu, yağsız süt ve domates sosunun ısınma davranışları üzerine dielektrik özelliklerin, boru çapı ve yerinin, kavite geometrisinin etkisi incelenmiştir. Akışkanın dielektrik özelliklerindeki değişimin, elektromanyetik güç yoğunluğu ve elektromanyetik alan dağılımını değiştirdiğini belirtmişlerdir. Boru çapı değişiminin mikrodalga güç absorpsiyonunu etkilediğini; yüzey alanı arttıkça absorbe olan gücün arttığını ancak kritik çap değerini aştıktan sonra tam tersi etkinin görüldüğünü, bunun da kavite geometrisine bağlı olduğunu rapor etmişlerdir. Sabliov vd. (2007)'nin yaptıkları çalışmada suyun sürekli akış mikrodalga sistemde ısıtılmasının modellemişlerdir. Çözüm sonlu fark zaman uzanımlı yöntem ile ANSYS Multiphysics programı kullanılarak, elektromanyetik, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği bir arada yatışkın durumda gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetim sonucunda beklendiği gibi borunun merkezinde ısınmanın daha çok gerçekleştiği, akış hızının değişmesiyle sıcaklık dağılımının değiştiği görülmüştür.

Salvi vd. (2010) yaptıkları çalışmada ANSYS Multiphysics ile COMSOL Multiphysics programlarını karşılaştırmışlardır. Eliptik kaviteye sahip sürekli akış mikrodalga sistemde (915 MHz, güç 4,5 kW) akış hızı 1 L/min ve 1,6 L/min olan su ve tuzlu suyun (% 1,5) ısıtılmasını modellemişlerdir. Absorbe olan mikrodalga enerji saf su için ANSYS Multiphysics ve COMSOL Multiphysics programı ile sırasıyla 729 W ve 829 W; tuzlu su ile 2511 W ve 2883 W olarak hesaplanmıştır. Saf su ile en düşük ve en yüksek sıcaklık farkı ANSYS Multiphysics ve COMSOL Multiphysics programı ile sırasıyla 1 L/min akış hızında 16°C ve 22°C; 1,6 L/min akış hızında 12°C ve 15°C; tuzlu su için 1 L/min akış hızında 86°C ve 58°C; 1,6 L/min akış hızında 64°C ve 40°C' dir. ANSYS Multiphysics ve COMSOL Multiphysics programlarının birbirleri ile benzer sonuçlar verdiği, boru çıkışında ulaşılan en yüksek sıcaklık değerinin farklı olmasının sayısal ağ oluşturulmasının farklılığından ileri geldiği bildirilmiştir. COMSOL Multiphysics programının daha

kolay kullanıldığı, işlem süresinin daha kısa olduğu (COMSOL Multiphysics 15 dk, ANSYS Multiphysics 2,5 sa) belirtilmiştir.

Salvi vd. (2011), Newtonumsu (su) ve Newtonumsu olmayan (% 0,5 CMC çözeltisi) akışkanların sürekli akış mikrodalga sistemde (borunun merkezine mikrodalga enerjinin odaklandığı tasarım) ısıtılmasının sayısal olarak benzetimini gerçekleştirip, sayısal modelin deneysel doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık dağılımının belirlenmesi için özel olarak tasarlanmış fiber optik sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu amaçla 10 adet ısı çifti içeren düzenek tasarlanmıştır. Bu düzenek borunun uzunluğu boyunca belirli aralıklarla (2,54 cm) 11 farklı noktaya yerleştirilmiştir. Böylece borunun uzunluğu boyunca ve radyal yönde toplam 110 sıcaklık verisi kaydedilmiştir. Sayısal benzetimi COMSOL Multiphysics programı ile elektromanyetik, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği modülleri kullanılarak belirlenmiştir. CMC çözeltisi için yapılan çözüm deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında hatanın % 20, saf su için % 18 olduğu ve mesh sayısı yarıya indirildiğinde hatanın sırasıyla % 6 ve % 2' ye düştüğü belirtilmiştir. Sayısal modelde, borunun merkezinde deneysel sonuçlara göre daha yüksek ısı üretiminin gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Muley ve Boldor (2012), bitkisel yağdan biyodizel üretimi için sürekli akış mikrodalga sistemin kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada sistemin sayısal benzetimi ve deneysel doğrulamasını yapmışlardır. En yüksek hız bölgesinde mikrodalga gücün odaklandığı sistem kullanılmıştır. Yağ ve etanol karışımının mikrodalga sistemden 60°C ve 75°C' de çıkması için mikrodalga gücü sırasıyla 4 ve 4,7 kW ve akış hızı 840 mL/min olarak ayarlanmıştır. Ortalama çıkış sıcaklığı ve absorbe edilen mikrodalga güç 61°C ;% 19 (4 kW) ve 73°C; % 13 (4,7 kW) olarak hesaplanmıştır. Su ve tuzlu suyun ısıtılması için tasarlanan bu sürekli akış mikrodalga sistemin, boru çapı ve kavite karakteristikleri bu akışkanlara uygundur. Bu nedenle daha polar olan etanol-yağ karışımının absorbe ettiği mikrodalga enerjinin düşük olduğu belirtilmiştir. Deneysel doğrulamanın gerçekleştirilmesi için 120° açıyla 3 farklı pozisyonda boru çıkışına yerleştirilen sıcaklık ölçüm düzeneği ile dokuz farklı noktada sıcaklık ölçümü yapmışlardır. Deneysel ve model sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Bu çalışma kapsamında Newtonumsu ve Newtonumsu olmayan akışkan olarak sırasıyla su ve karboksimetil selüloz (CMC) (Prosis Tekstil Matbaa Gıda San.Tic. Ltd. Şti., İstanbul) çözeltisi kullanılmıştır. Aseptik proses benzetimlerinde model gıda olarak yaygın şekilde kullanılan CMC çözeltisi bu çalışmada % 0,5, 1 (w/w) konsantrasyonlarında kullanılmıştır. CMC çözeltisi deneyden 48 saat önce saf su içerisine yavaş yavaş aktarılarak hazırlanmıştır. Çözeltinin tamamen çözünmesi ve oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için bu süre boyunca çözelti ara sıra karıştırılmıştır. Bu sürede buzdolabında bekletilen çözelti, deneyden bir gün önce sıcaklığın dengeye gelmesi için oda sıcaklığına alınmıştır.

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Model Akışkanların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.1.1. Reolojik özelliklerin belirlenmesi

CMC çözeltilerinin (% 0,5 ve % 1 w/w) akış davranış özelliklerini belirlemek için rotasyonel viskozimetre (Brookfield DV-II+ProEXTRA, USA) kullanılmıştır. 20, 35, 50, 65, 80, 90 ± 5°C sıcaklıklarındaki akış davranış özellikleri belirlenmiş ve sıcaklık su banyosunda bekletilerek ayarlanmıştır. CMC çözeltileri 600 mL'lik (yarıçapı yaklaşık 9 cm olan) beherlere aktarılmıştır. Spindle seçimi % torque değerleri 10 ile 90 olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler her bir sıcaklık için 3 tekrar gerçekleştirilmiştir.

Akış özelliklerinin belirleneceği kayma hızı değerleri boru içerisindeki kayma hızı değerleri hesaplanarak belirlenmiş, bu amaçla Rabinowitsch-Mooney eşitliği (Eşitlik 3.1) [Steffe, 1992] kullanılmıştır. Boru içerisinde akış sırasında, boru duvarındaki en yüksek kayma hızı değerleri deneyin gerçekleştirileceği akış hızlarında (1, 2, 3 L/ min) belirlenmiştir.

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad (3.1)$$

Vais vd. (2001)'nin yaptıkları çalışmada % 0,5 ve % 1 (w/w) CMC çözeltileri için belirlenen n değerleri ile çözeltilerin en yüksek kayma hızları belirlenmiştir. Ölçümler bu aralığı kapsayacak şekilde 5-80 rpm hızlarında gerçekleştirilmiş ve bu hızlardaki % torque değerleri kaydedilmiştir.

CMC çözeltilerinin akış davranış özellikleri Power-Law akış modeline göre (Eşitlik 3.2) belirlenmiştir. CMC çözeltilerinin görünür viskozite değerleri Eşitlik 3.3 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = m\dot{\gamma}^n \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{m\dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.3)$$

Newtonumsu akışkan örneği olarak kullanılan suyun dinamik viskozite değerleri literatürden elde edilmiştir [Geankoplis, 1993].

3.2.1.2. Dielektrik özelliklerin belirlenmesi

CMC çözeltilerinin dielektrik sabiti (ϵ') ve dielektrik kayıp faktörü (ϵ''), bu özelliklerin konsantrasyon (C ; g/L) ve sıcaklıkla (T ; °C) ilişkisini veren ikinci dereceden polinomal denklem kullanılarak belirlenmiştir [Coronel vd., 2008]. Bu amaçla 20, 35, 50, 65, 80, 90°C'deki dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü Eşitlik 3.4 ve 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$\epsilon' = 82,90 - 0,10C - 5,58 \times 10^{-3}C^2 + 1,68 \times 10^{-3}CT - 0,22T - 5,83 \times 10^{-4}T^2 \quad (3.4)$$

$$\epsilon'' = 9,76 - 0,10C - 1,22 \times 10^{-2}C^2 + 2,53 \times 10^{-3}CT - 5,22 \times 10^{-2}T - 1,60 \times 10^{-3}T^2 \quad (3.5)$$

Suyun dielektrik özellikleri sıcaklığa bağımlı olarak Komarov ve Tang (2004) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 3.6 ve 3.7 ile 20, 35, 50, 65, 80, 90°C'deki dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü hesaplanmıştır.

$$\epsilon' = -16,308 * \ln(T) + 133,75 \quad (3.6)$$

$$\varepsilon'' = -3,68 * 10^{-6}T^3 + 1,03 * 10^{-3}T^2 - 0,0947T + 5,6 \quad (3.7)$$

Model akışkanların tanjant kayıp faktörü Eşitlik 3.8 ile hesaplanmıştır.

$$\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (3.8)$$

Model akışkanların dalga boyu ve penetrasyon derinliği sırasıyla Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10 ile belirlenmiştir. Eşitlik 3.11 ve 3.12 dalga boyu ve penetrasyon derinliğini hesaplamada kullanılan α ve β değerleridir (Zhang ve Datta, 2005a).

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (3.9)$$

$$D_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (3.10)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{c} \pi f \sqrt{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon'} \quad (3.11)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2}}{c} \pi f \sqrt{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon'} \quad (3.12)$$

3.2.1.3. Elektriksel özelliklerin belirlenmesi

CMC çözeltilerinin (% 0,5 ve % 1 w/w) elektriksel iletkenlik özelliklerini belirlemek için kondüktometre cihazı (Orion5Star, Thermo Fisher Scientific Inc., USA) kullanılmıştır. 20, 35, 50, 65, 80, 90 \pm 2°C sıcaklıklarındaki elektriksel iletkenlik değerleri belirlenmiş ve ölçümler 3 paralel olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.4. Termofiziksel özelliklerin belirlenmesi

CMC çözeltilerinin ısı iletkenlik katsayısı (k, W/m°C), özgül ısı (J/kg.K) ve yoğunluk (kg/m³) değerleri Choi ve Okos (1987) tarafından geliştirilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır [Toledo, 1999]. Isıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk hesaplamaları 20, 35, 50, 65, 80, 90°C sıcaklıklarda sırasıyla Eşitlik 3.13, 3.14, 3.15 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$k = 0,2014 + 0,0013874T - 4,3312 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.13)$$

$$c_p = 1548,8 + 1,9625T - 5939,9 \times 10^{-6}T^2 \quad (3.14)$$

$$\rho = 1599,1 - 0,31046T \quad (3.15)$$

Saf suyun ısı iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk değerleri Choi ve Okos (1987) tarafından geliştirilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır [Toledo, 1999]. Isıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluk 20, 35, 50, 65, 80, 90°C'de sırasıyla Eşitlik 3.16, 3.17, 3.18 kullanılarak yapılmıştır.

$$k_{su} = 0,5719 + 0,0017625T - 6,7306 * 10^{-6}T^2 \quad (3.16)$$

$$c_{psu} = 4176,2 - 9,0862 * 10^{-5}T + 5473,1 * 10^{-6}T^2 \quad (3.17)$$

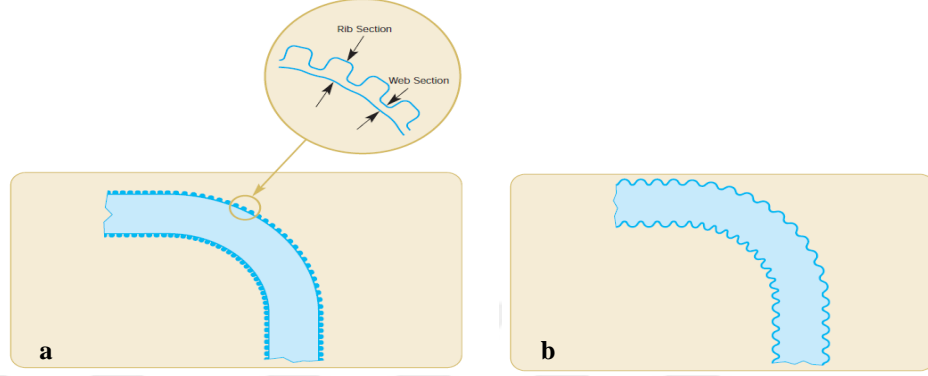
$$\rho_{su} = 997,18 + 0,0031439T - 0,0037574T^2 \quad (3.18)$$

3.2.2. Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Tasarlanması

Bu tez kapsamında 915 MHz dalga boyunda 5 kW (en yüksek) gücünde pilot ölçekte gücü ayarlanabilir sürekli akış mikrodalga sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle tasarımı gerçekleştirilecek sistem COMSOL Multiphysics (V. 4.4, Comsol AB, Stockholm, Sweden) yazılımı ile sayısal olarak modellenmiştir. Modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla literatürde bulunan ve deneysel olarak doğrulanmış sürekli mikrodalga sistemin matematiksel modeli yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların benzer olduğu görülmüş ve tez kapsamında yapılacak sistem farklı konfigürasyonlarda (kavite geometrisi/çapı, dalga kılavuzu konfigürasyonu gibi) denenmiş ve en uygun olan boyutlarda sistemin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetimden ayrıntılı olarak Bölüm 3.2.5'de bahsedilmiştir.

Silindirik kavite içerisinden geçen borular mikrodalgayı absorbe etmeyen özellikteki malzemedan düz ve helikal konfigürasyonda kullanılmıştır. Düz ve helikal konfigürasyonlu sistemde mikrodalga geçirgen özellikte PTFE (polytetrafluoroethylene) boru seçilmiştir (Bioflex PTFE Liner, Aflex Hose Ltd., West Yorkshire, İngiltere). Helikal konfigürasyonlu boru seçiminde kullanılan

boruların iç ve dış kısımları helikal şekline elde edilmesi için genellikle tırtıklı olmaktadır (Şekil 3.1-b). Boru içerisinde laminar akış sağlanabilmesi ve boru içerisinde bulunan kıvrımların akış şekline etki etmemesi için dış kısmı tırtıklı, iç kısmı düz boru tercih edilmiştir (Şekil 3.1-a).



Şekil 3.1 Boru yapısının şematik gösterimi iç kısmı a) düzleştirilmiş b) tırtıklı

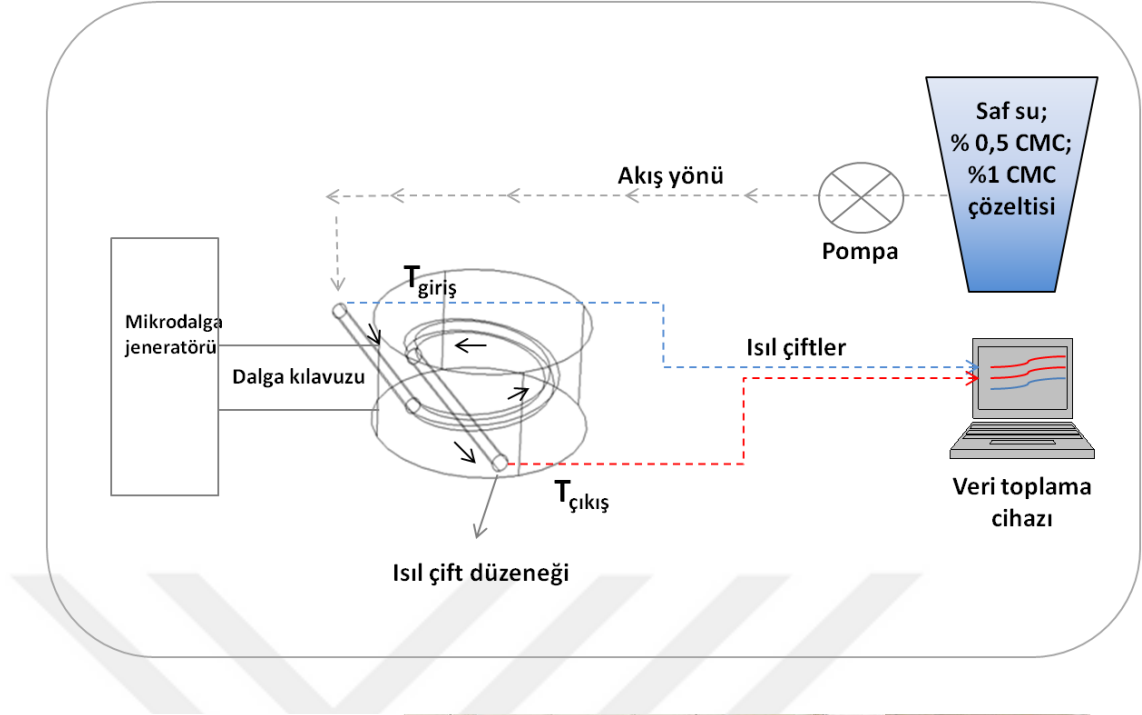
Tasarımı gerçekleştirilen mikrodalga sistem silindirik kavite, aplikatör (düz/helikol boru) ve dalga kılavuzundan oluşmaktadır. TE10 temel modunu üreten dikdörtgen dalga kılavuzunun yüksekliği, 124 mm, eni 248 mm, boyu 673 mm, silindirik aplikatörün çapı 547 mm, yüksekliği 254 mm'dir. Düz ve helikal borunun iç çapı 38 mm, uzunlukları sırasıyla 1.000 ve 2.300 mm, mikrodalgaya maruz kalan bölgeler ise 254 mm ve 1.540 mm uzunluğundadır. Helikal borunun kavis çapı 360 mm (kavis oranı, $d/D = 0,105$), eksensel açıklığı (pitch) 124 mm'dir. Model akışkanlar sisteme kademeli hazneli pompa (progressive cavity pump, İnoxpa, İspanya) kullanılarak pompalanmıştır.

3.2.3. Sürekli Akış Mikrodalga Sistemde Isıtma Deneylelerinin Gerçekleştirilmesi

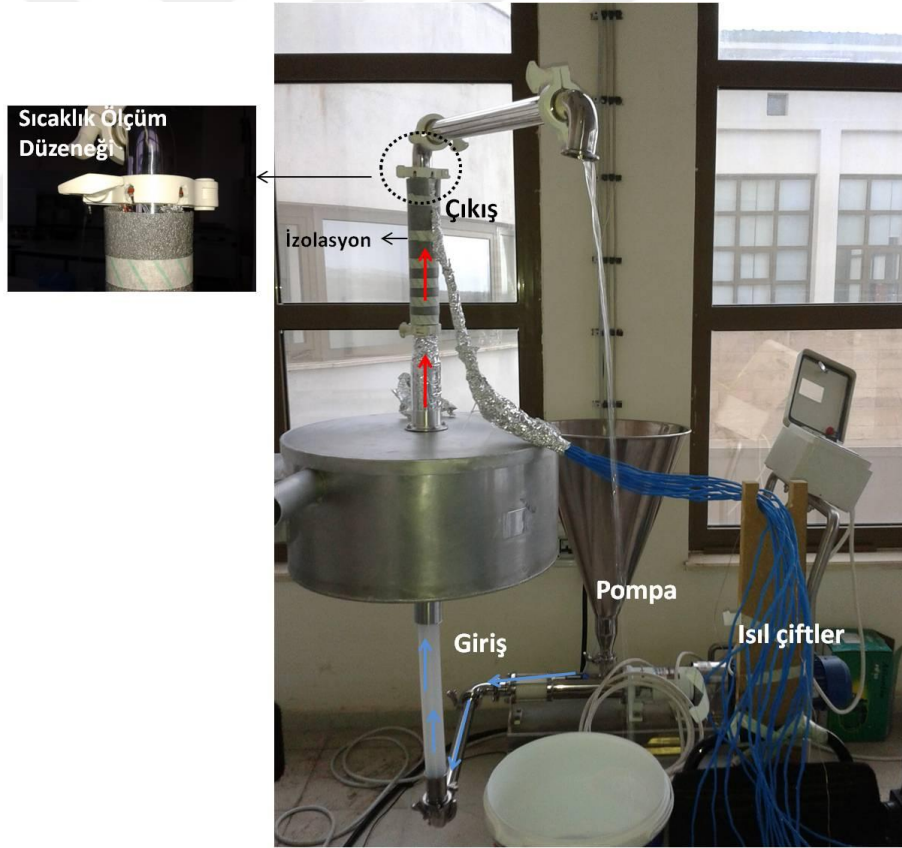
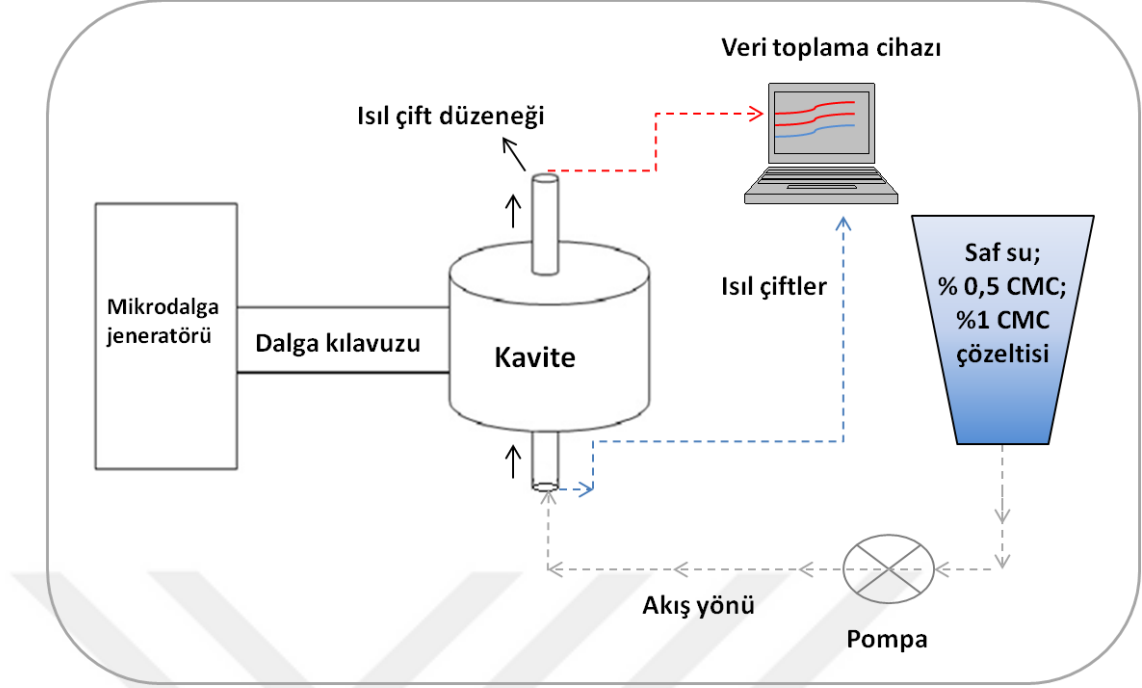
Saf su, % 0,5 ve % 1 konsantrasyona sahip CMC çözeltileri sürekli akış mikrodalga sistemde belirli hızlarda ısıtılarak düz/helikol konfigürasyonlu boru çıkışındaki sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Model akışkanlara 4 kW mikrodalga gücünde 1 L/min, 2 L/min ve 3 L/min akış hızlarında ısıtma işlemi uygulanmıştır. Öncelikle akışkan örneği sistem içerisine pompalanmış ve boru tamamen örnekle doldurulmuştur. Akış hızının doğruluğu her uygulamadan önce deneysel olarak belirlenmiştir. Bunun için 500 mL hacimdeki mezürü akışkanın doldurması gereken

süreden yararlanılmıştır. Her iki konfigürasyonlu sistemde boru çıkışına özel olarak tasarlanmış ısıl çift düzeneği yerleştirilerek, farklı noktalarda meydana gelen sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.

Helikal ve düz boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistemin şematik gösterimi ve deney düzeneği Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Kavite tasarımı helikal ve düz boru içinde kullanılacak şekilde yapılmıştır. Helikal borunun çıkışı kavitenin yan kısımlarından olmakta, düz boru ise kavitenin üst kısmından girip altından çıkmaktadır. Düz boru kullanılacağı zaman helikal borunun; helikal boru kullanılacağı düz borunun giriş ve çıkış yaptığı bölgeler alüminyum materyalle kapatılmıştır. Düz boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık ölçüm düzeneği akışkanın kaviteden çıkışından daha uzağa yerleştirilmiştir. Bu nedenle boru sıcaklık ölçüm düzeneğinin bulunduğu yere kadar izole edilmiştir.



Şekil 3.2. Helikal boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistemin deney düzeneği

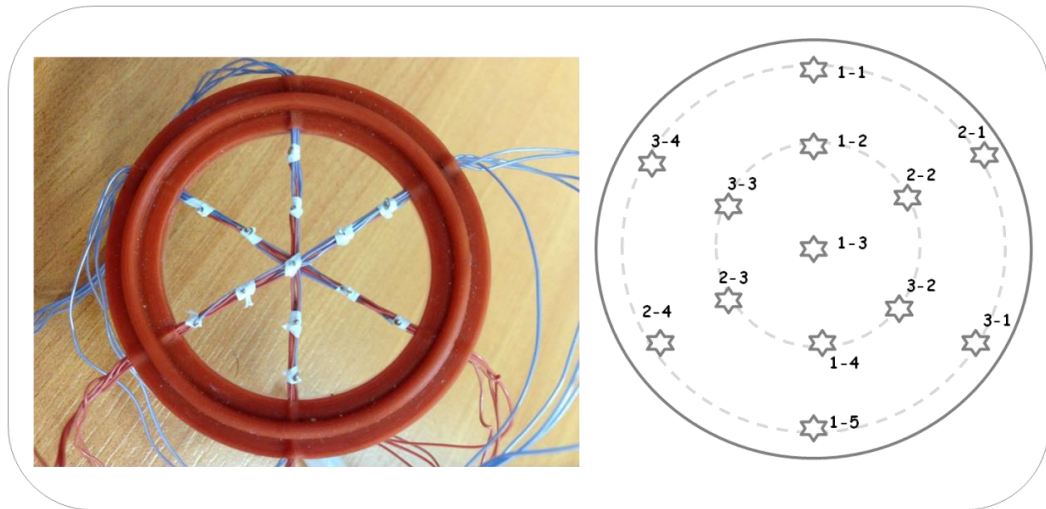


Şekil 3.3. Düz boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistemin deney düzeneği

3.2.3.1. Sıcaklık dağılımının belirlenmesi

Sürekli akış mikrodalga sistemlerde akışkan gıdaların ısıtılması sırasındaki sıcaklık profilinin belirlenmesi istenilen sıcaklık dağılımının elde edilmesinin kontrolü ve sayısal benzetimin deneysel olarak doğrulanması açısından önemlidir. Sıcaklık dağılımını belirlenmesi için sıcaklık verilerinin birçok noktada alınması gerekmektedir. Bu amaçla boru çıkışına yerleştirilen ısı çift düzenekleri kullanılmakta ve birden fazla noktada aynı anda sıcaklık verisi alınabilmektedir [Coronel vd., 2003; Salvi vd., 2011].

Tez kapsamında boru çıkışında sıcaklık dağılımının belirlenmesi için ısı çift düzeneği tasarlanmıştır. Bu düzenek yardımı ile 1 adet merkezde, 6 adet boru duvarında ve 6 adet merkez ile duvar arasında olmak üzere toplam 13 ısı çift kullanılarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu amaçla Şekil 3.4'de görüldüğü gibi conta içerisine 13 adet ısı çift yerleştirilmiştir. Isıl çiftler 60° açıyla ve 7,5 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Boru girişindeki sıcaklığı belirleyebilmek için aynı şekilde conta içerisine 1 adet merkezde olacak şekilde ısı çift yerleştirilmiştir. Toplam 14 adet sıcaklık verisi kaydedilmiştir. Sıcaklık ölçümü 1 saniye aralıklarla bir veri toplama sistemi ile (Data Translation, USA) bilgisayara aktararak gerçekleştirilmiştir. Yatışkın durumdaki sıcaklık değerlerini belirlemek için 13 noktadaki sıcaklık değerlerinin değişmemeye başladığı noktadaki sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. Isıl çift düzeneği ve ısı çiftlerin yerleri

Yapılan ön denemeler sırasında sıcaklık ölçümü yapılırken, sistem etrafında oluşan manyetik alanın ısıtıcı çiftler tarafından taşınan sinyali etkilediği görülmüştür. Bu durum gürültülü sinyal elde edilmesine ve yanlış sıcaklık ölçümüne neden olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ısıtıcı çiftler Şekil 3.5'deki gibi sarmal şeklinde hazırlanmış ve etrafı elektromanyetik alanla girişimi engellemek için alüminyumla kaplanmıştır.



Şekil 3.5. Kullanılan ısıtıcı çiftlerin yapısı

3.2.3.2 Infrared kamera ile sıcaklık ölçümü

Helikal boruda ısıtma sırasında termal görüntülerin elde edilmesi için infrared görüntüleme sistemi (Optris, PI200, Almanya) kullanılmıştır. Her bir deney gerçekleştirildikten sonra akış durdurulmuş ve kavite kapağı açılarak hızlıca infrared görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Düz boru konfigürasyonlu sistemde, kavite kapağının açılmaması nedeni ile infrared görüntüleme işlemi gerçekleştirilmemiştir. PTFE borunun emisivite değeri 0,95 olarak kullanılmıştır.

3.2.3.3 Absorbe edilen güç miktarının belirlenmesi

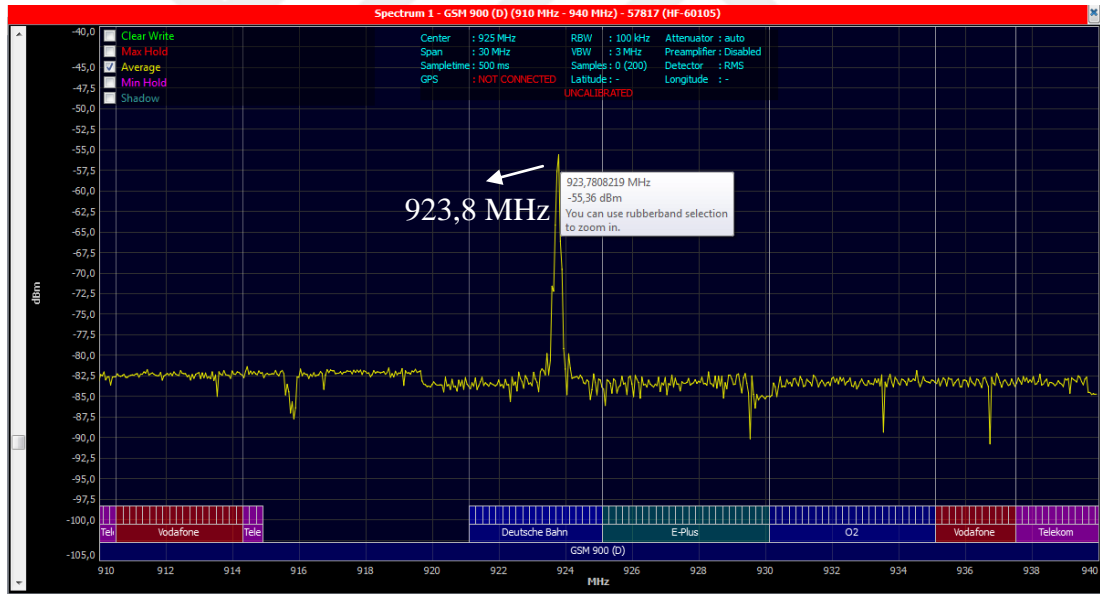
Akışkan örneklerinin absorbe ettiği güç miktarının belirlenmesi için kalorimetrik ısı eşitliği kullanılmıştır. Akışkan örneklerinin ortalama giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve oda sıcaklığındaki fiziksel özelliklerinin Eşitlik 3.19'da yerine yazılması ile hesaplama yapılmıştır.

$$q_{abs} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3.19)$$

Kavite içerisindeki güç dağılımını belirlemek için 650 mL saf su helikal borunun geçtiği yerlere ve kavitenin merkezine yerleştirilmiştir. Mikrodalga enerji 4000 W güçte uygulanmış ve 30 s süre ile ısıtma gerçekleştirilmiştir. Başlangıç ve son sıcaklık değerleri kullanılarak bu noktadaki absorbe edilen güç miktarları Eşitlik 3.19 kullanılarak belirlenmiştir. Akışkan örneklerinin oda sıcaklığındaki fiziksel özellikleri kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Magnetron Frekansının Ölçümü

Magnetronun sağladığı gerçek frekans değerinin belirlenmesi için spektrum analiz cihazı (Spectran Aaronia, HF-60100 (60105) Spectrum Analyser Handheld, Almanya) kullanılmıştır. Analiz sonucunda Şekil 3.6'da görüldüğü gibi magnetronun sağladığı frekans değerinin yaklaşık 923,8 MHz olduğu görülmüştür. Modelleme çalışmalarında frekans değeri 924 MHz olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Frekans spektrumu

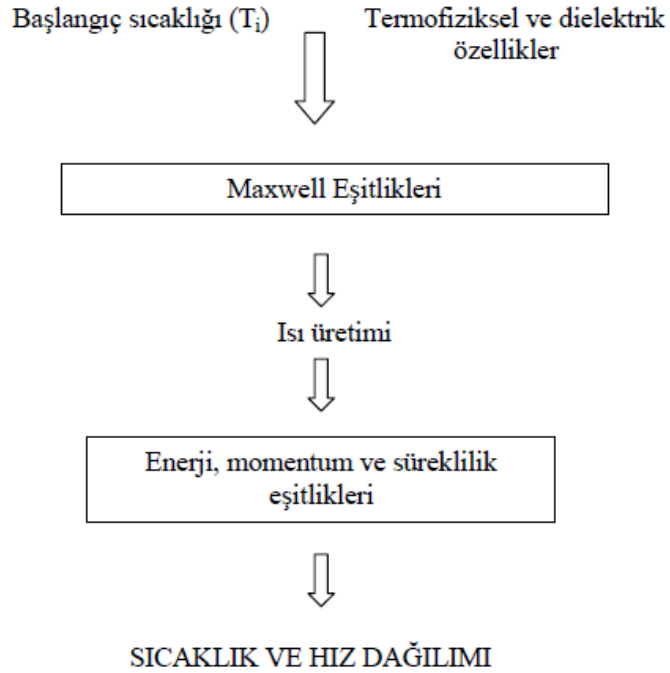
3.2.5. Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Sayısal Benzetimi

Sayısal benzetim sonlu elemanlar yöntemini (FEM-Sonlu eleman yöntemi) esas alarak çözüm gerçekleştiren COMSOL Multiphysics (V. 4.4, Comsol AB, Stockholm, Sweden) yazılımı ile yapılmıştır. Sürekli akış mikrodalga sistemin sayısal çözümü elektromanyetik, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi denklemlerinin

birlikte çözümü ile gerçekleştirilmektedir. Sayısal benzetimde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır;

- Yerçekimi etkisi ihmal edilmiştir,
- Akışkan sıkıştırılmaz özelliğindedir,
- PTFE borunun tamamen mikrodalga transparan olduğu kabul edilmiştir,
- Mikrodalga sistem içerisinde yansımalar en az seviyededir.
- Yatışkın durumda çözüm gerçekleştirilmiştir.

Sayısal benzetimin algoritması Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Öncelikle elektromanyetik alan eşitlikleri çözülmekte ve dielektrik materyal tarafından absorbe olan mikrodalga enerji hesaplanmaktadır. Isı transferi ve akışkanlar mekaniği eşitliklerinin çözümü birlikte gerçekleştirilmektedir. Oda sıcaklığındaki materyal özellikleri kullanılarak boru içerisindeki hesaplanan ısı üretim değeri ile sıcaklık dağılımı belirlenmektedir. Hesaplanan sıcaklık değerlerinde yeni dielektrik özellikler belirlenmekte ve bu değerlerle yeni ısı üretim değeri hesaplanmaktadır(Salvi vd. 2011).



Şekil 3.7 Sürekli akış mikrodalga sistem sayısal benzetiminin algoritması

3.2.5.1. Temel denklemler

Elektromanyetik Alan Çözümü

Mikrodalga kavite içerisindeki elektrik alan dağılımının hesaplanması Maxwell eşitliklerinin çözümü ile gerçekleştirilir (Eşitlik 3.20).

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) - \frac{\omega^2}{c} (\epsilon' - i\epsilon'') \vec{E} = 0 \quad (3.20)$$

Süreklilik eşitliği boru, kavite, dalga kılavuzunda uygulanmaktadır (Eşitlik 3.21).

$$n \times (E_i - E_j) = 0 \quad (3.21)$$

Dalga kılavuzu ve kavite duvarlarında sınır koşulları mükemmel dielektrik olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 3.22).

$$n \times \vec{E} = 0 \quad (3.22)$$

Hesaplanan elektrik alan yoğunluk değeri ve materyal özellikleri mikrodalga enerjisi nedeniyle gerçekleşen hacimsel ısı üretim değerini (Eşitlik 3.23) hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$Q = \sigma \left| \vec{E} \right|^2 = 2\pi\epsilon_0\epsilon'' f \left| \vec{E} \right|^2 \quad (3.23)$$

σ , materyalin elektriksel iletkenlik değeri (S/m); ϵ_0 , boşluğun geçirgenlik değeri (8.854×10^{-12} F/m); f , frekans (Hz) olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitliğin çözümü ile elde edilen hacimsel ısı üretim değeri Fourier enerji denklemlerinin çözümünde enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu denklik kullanılarak konduksiyon ve konveksiyon ile gerçekleşen sıcaklık dağılımı hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.24).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v\nabla T = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c_p} \quad (3.24)$$

Isı transferi ve Akışkanlar Mekaniği Çözümü

Akışkanın hız profili Navier-Stokes eşitlikleri ve sıcaklık dağılımı Fourier eşitlikleri çözülerek elde edilmektedir.

Düz boru için Süreklilik, Momentum, Isı transferi Eşitlikleri

Boru içerisindeki sıcaklık dağılımı, mikrodalga absorpsiyonu nedeni ile iç enerji üretiminin hesaba katıldığı enerji eşitliği (Eşitlik 3.25) kullanılarak çözülmektedir.

Enerji denkliği,

$$u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q \quad (3.25)$$

Akışkanların hızları süreklilik (Eşitlik 3.26) ve momentum denklemlerini (Eşitlik 3.27,3.28,3.29) çözerek elde edilmiştir. Momentum eşitlikleri radyal yönde (r yönü) Eşitlik 3.25, açısall yönde (θ yönü) Eşitlik 3.26 ve boru uzunluğu boyunca (z yönü, dikey yön) Eşitlik 3.27 ile çözülmektedir (Erdoğan,2010).

Süreklilik eşitliği,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = 0 \quad (3.26)$$

Momentum eşitliği,

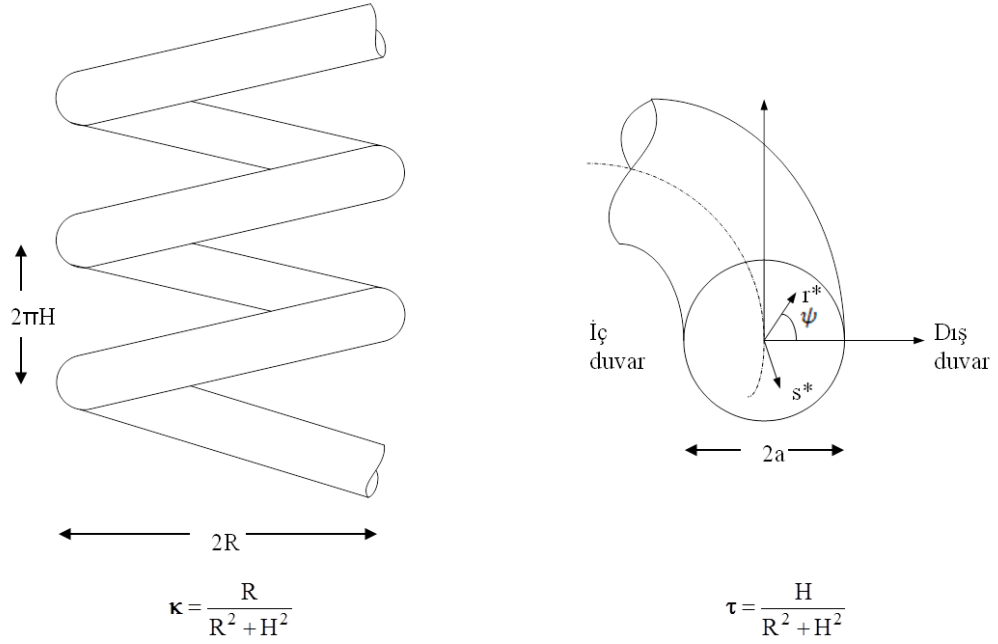
$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \quad (3.27)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (3.28)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \quad (3.29)$$

Helikal boru için Süreklilik, Momentum, Isı transferi Eşitlikleri

Helikal boru geometrisi tek yönlü olmadığı için, helikal koordinatta hız ve enerji eşitlikleri üç boyutludur. Eşitlik 3.30 helikal boru için enerji (Kalb & Seader, 1972), Eşitlik 3.31 süreklilik ve Eşitlik 3.32, 3.33, 3.34 momentum (Palazoğlu, 2001) eşitlikleridir. Şekil 3.8'de helikal koordinat sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Helikal koordinat sistemi

Enerji eşitliği,

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \psi} + \frac{w}{R+r\sin\psi} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{v}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\sin\psi}{R+r\sin\psi} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + \frac{\cos\psi}{r(R+r\sin\psi)} \frac{\partial T}{\partial \psi} + \frac{1}{(R+r\sin\psi)^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right) + Q \quad (3.30)$$

Süreklilik eşitliği,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \psi} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \varepsilon\omega \left[u\cos\psi + v\sin\psi - \lambda \frac{\partial w}{\partial \psi} \right] = 0 \quad (3.31)$$

Momentum eşitlikleri,

$$\frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \psi} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{uv}{r} - \varepsilon\omega w \left(w\cos\psi + \lambda \frac{\partial u}{\partial \psi} \right)$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \psi} + \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \psi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \psi} \right] + \varepsilon \omega \left[\eta \sin \psi + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \psi} \right] \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} & \frac{u}{r} \frac{\partial v}{\partial \psi} + v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{u^2}{r} - \varepsilon \omega w \left(w \sin \psi + \lambda \frac{\partial v}{\partial \psi} \right) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \psi^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \psi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \psi} + \varepsilon \omega \left[\eta \cos \psi + \lambda \frac{\partial \gamma}{\partial \psi} \right] \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} & \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \psi} + v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{u^2}{r} + \varepsilon \omega w \left(u \cos \psi + w \sin \psi + \lambda \frac{\partial w}{\partial \psi} \right) \\ & = -\omega \frac{\partial P}{\partial s} + \varepsilon \omega \lambda \left(\frac{\partial P}{\partial \psi} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \psi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[\varepsilon \omega w \cos \psi + \varepsilon \omega \lambda \frac{\partial u}{\partial \psi} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \left[\varepsilon \omega w \sin \psi + \varepsilon \omega \lambda \frac{\partial v}{\partial \psi} \right] + \frac{1}{r} \left[\varepsilon \omega w \sin \psi + \varepsilon \omega \lambda \frac{\partial v}{\partial \psi} \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

α , γ , η , ω boyutsuz sayıları Eşitlik 3.35 - 3.38 ile tanımlanmaktadır.

$$\alpha = \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \psi} + \varepsilon \omega \left(w \cos \psi + \lambda \frac{\partial u}{\partial \psi} \right) \quad (3.35)$$

$$\gamma = -\frac{\partial w}{\partial \psi} - \varepsilon \omega \left(w \sin \psi + \lambda \frac{\partial v}{\partial \psi} \right) \quad (3.36)$$

$$\eta = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \psi} \quad (3.37)$$

$$\omega = \frac{1}{1 + \varepsilon r \sin \psi} \quad (3.38)$$

Eşitlik (momentum eşitlikleri) de u , v , w simgeleri r, ψ, s yönlerindeki boyutsuz hızlar; P boyutsuz basınç ve ε , λ boyutsuz kavis ve dönme değerleridir (Eşitlik 3.39).

$$\begin{aligned} r &= \frac{r^*}{a}, & s &= \frac{s^*}{a}, & u &= \frac{u^*}{v/a}, & v &= \frac{v^*}{v/a}, & w &= \frac{w^*}{v/a} \\ P &= \frac{p^*}{(\rho v^2/a^2)}, & \varepsilon &= \kappa a, & \lambda &= \frac{\tau}{\kappa} = \frac{H}{R} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Düz ve helikal boruda sıcaklık ve hız dağılımlarının belirlenmesi için kullanılan sınır koşulları; Navier-Stokes denkliklerinin çözümü için, başlangıç hızı \bar{u}

ve borunun duvarlarında kaymazlık sınır koşulu uygulanmaktadır (Eşitlik 3.40 ve 3.41).

$$\text{Başlangıç akış hızı} \quad u_0 = \bar{u} \quad (3.40)$$

$$\text{Boru duvarında} \quad u_{duvar} = 0 \quad (3.41)$$

Fourier denkliklerinin çözümü için sınır koşulları; başlangıç sıcaklığı model akışkanların deneysel olarak ölçülen ilk sıcaklıklarıdır (Eşitlik 3.42). Borudan dışarıya ısı kaybı konveksiyonla gerçekleşmektedir bu nedenle boru duvarında konveksiyon sınır koşulu uygulanmıştır (Eşitlik 3.43).

$$\text{Başlangıç sıcaklığı} \quad T = T_i \quad (3.42)$$

$$\text{Boru duvarında konveksiyon sınır koşulu} \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{yüzey}} = h(T - T_\infty) \quad (3.43)$$

3.2.5.2. Sayısal benzetim

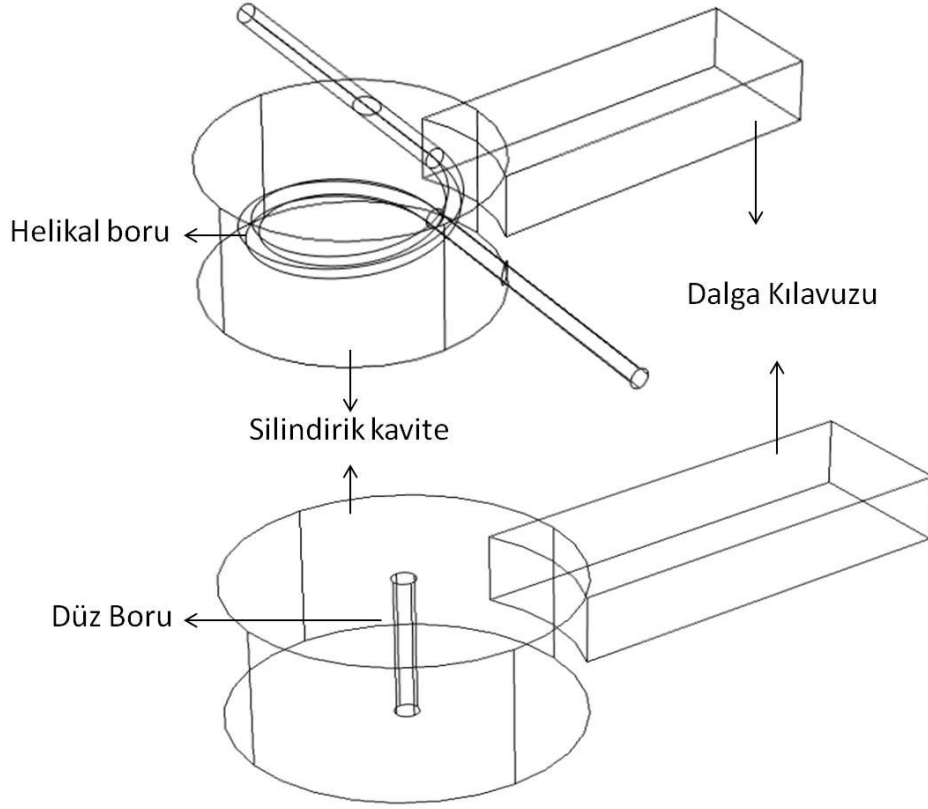
COMSOL Multiphysics (V. 4.4) programı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal benzetim,

- Üç boyutlu geometrinin oluşturulması
- Materyal özelliklerinin belirlenmesi
- Başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi
- Sayısal ağ oluşturma
- Çözüm

aşamalarını içermektedir.

Üç Boyutlu Geometrinin Oluşturulması

Mikrodalga sistem silindirik kavite, aplikatör (düz/ helikal boru) ve dalga kılavuzundan oluşmaktadır. Düz boru kavitenin tam merkezinde, helikal boru ise sarmal kısmın orta noktası kavitenin merkezinde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bölüm 3.2.2'de belirtilen boyutlarda çizilen sürekli mikrodalga sistemin üç boyutlu geometrisi Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Helikal/Düz boru konfigürasyonlu sürekli mikrodalga sistemin üç boyutlu geometrisi

Materyal Özelliklerinin Belirlenmesi

Akışkan örneklerinin Bölüm 3.2.1'de belirtildiği şekilde belirlenen materyal özellikleri sıcaklığa bağımlı olarak tanımlanmış ve bunun için interpolasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

Başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi

Elektromanyetik Alan Dağılımı Denkliklerinin Çözümü

Maxwell eşitliklerinin çözümü, COMSOL Multiphysics programının radyo frekansı modülü (Radio Frequency > Electromagnetic waves) kullanılarak uygulanmıştır. Elektromanyetik alan dağılımı silindirik kavite, dalga kılavuzu ve düz/helik boruda çözüm gerçekleştirilerek belirlenmiştir. 924 MHz frekansta çalışan dikdörtgensel dalga kılavuzu TE₁₀ temel modunda, 4000 W giriş gücünde tanımlanmıştır. Silindirik kavite ve dalga kılavuzunun duvarları alüminyum olarak belirlenmiş ve mükemmel iletken (perfect electric conductor) sınır koşulları

uygulanmıştır. Dalga kılavuzu ve kavite içerisindeki boşluk hava (mükemmel dielektrik) olarak belirlenmiştir. Akışkan giriş ve çıkışında elektromanyetik dalgaların geçirgen olduğu sınır koşulları kullanılmıştır (scattering boundary condition). Süreklilik sınır koşulu boru, dalga kılavuzu ve kavitede default olarak uygulanmaktadır. Teflon boru mikrodalga geçirgen olduğu için boru yüzey kalınlığı ihmal edilmiştir. Gıda maddeleri manyetik alanla etkileşime girmediği için bağlı geçirgenlik değeri (μ), 1'dir (Schubert ve Regier, 2005).

Isı Transferi ve Akışkanlar Mekaniği Denkliklerinin Çözümü

Fourier enerji ve Navier-Stokes denkliklerinin çözümü için Comsol Multiphysics programının ısı transferi (Heat Transfer > Heat Transfer in Fluids) ve akışkanlar mekaniği (Fluid Flow > Single Phase Flow > Laminar Flow) modülleri kullanılmıştır. Bu eşitlikler ile çözüm düz ve helikal boruda gerçekleştirilmiştir.

Fourier enerji denkliklerinin çözümünde, boru içerisinde akan akışkan ısı kaynağı olarak belirlenmiştir. Boru duvarında hava ile akışkan arasında konveksiyon sınır koşulu uygulanmıştır. Ortamın ısı transfer katsayısı $5 \text{ W/m}^2\text{C}$ ve sıcaklığı 20°C olarak tanımlanmıştır.

Navier - Stokes denkliklerinin çözümü için helikal ve düz borunun duvarları boyunca kaymazlık sınır koşulu, akışkanın giriş ve çıkış yaptığı kısımlarda sırasıyla ortalama hız değerleri ve atmosferik basınç tanımlanmıştır. Akışkan örneklerinin ortalama akış hızı değerleri $0,0147 \text{ m/s}$ (1 Lpm), $0,0294 \text{ m/s}$ (2 Lpm), $0,0441 \text{ m/s}$ (3 Lpm); başlangıç sıcaklığı $20 \pm 1^\circ\text{C}$ olarak tanımlanmıştır.

Sayısal ağ oluşturma

Uygulanacak sayısal ağ değeri Nyquist kriterine (Eşitlik 3.44) göre belirlenmiştir.

$$S_{\max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon'\mu'}} \quad (3.44)$$

bu eşitlikte λ , dalga boyu (m); c, ışık hızı (m/s); f, frekans (Hz); ϵ' , dielektrik sabiti; μ' , bağlı geçirgenlik değerini göstermektedir. Nyquist kriterine göre dalga boyuna düşen element sayısı en az iki olmalıdır. (Comsol, 2007; Salvi vd., 2011). Bu kural ve materyal özellikleri dikkate alınarak helikal boru konfigürasyonlu sistemde silindirik kavite ve dalga kılavuzunda sayısal ağ boyutu 0,03 m, düz/helikol boruda 0,005 m ve tetrahedral olarak belirlenmiştir. Düz boru konfigürasyonlu sistemde sayısal ağ boyutları aynı değerlerde olup boru yüzeyinde yoğunlaşmaktadır. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde sayısal ağ sayısı tüm sistem için 530.739; helikal boru için 336.739 dur. Düz boru konfigürasyonlu sistemde sayısal ağ sayısı tüm sistem için 144.383; boru için 53.138'dir.

Çözüm

Model çözümü için ilk olarak elektromanyetik alan çözümü gerçekleştirilmiş ve boru içerisinde hacimsel ısı üretim değeri (Q) belirlenmiştir. Birinci kısımda elde edilen Q değeri kullanılarak ısı transferi ve akışkanlar mekaniği eşitlikleri birlikte çözülmüştür. Maxwell denklemlerinin çözümü ve Q değerinin belirlenmesi için literatürde kullanılan GMRES (General Minimum Residual Solver) iteratif çözüm yöntemi kullanılmıştır. Fourier ve Navier-Stokes denklemlerinin çözümü PARDISO (Parallel Direct Linear Solver) doğrudan çözüm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Salvi vd., 2010; Salvi vd., 2011). Çözüm yatışkın olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetim çalışmaları, Intel Core i7 2670 QM CPU @ 2.2 GHz (Intel, Santa Clara, CA, USA) işlemciye ve 8 Gb DDR3 hafızaya sahip Windows 7 işletim sistemi ile çalışan dizüstü bilgisayar kullanılarak yürütülmüştür.

Helikal boru için serbestlik derecesi elektromanyetik alan çözümünde 2.677.671; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği çözümünde 318.220'dir. Çözüm süresi model akışkanlar arasında ve akış hızına göre değişkenlik göstermiştir. Akış hızı 1 L/min, 2 L/min, 3 L/min olduğu durumda çözüm süresi sırasıyla saf su için 1 sa 10 dk., 2 sa 21 dk, 3 sa 19 dk; % 0,5 CMC çözeltisi için 3 sa 26 dk., 2 sa 40 dk, 5 sa 46 dk; % 1 CMC çözeltisi için 2 sa 38 dk., 2 sa 7 dk, 5 sa 46 dk'dır.

Düz boru için serbestlik derecesi elektromanyetik alan çözümünde 939.619; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği çözümünde 55.270'dir. Çözüm süresi akışkan

örnekleri arasında ve akış hızına göre önemli bir değişiklik göstermemiştir. Çözüm, akış hızı 1 L/min, 2 L/min, 3 L/min olduğu durumda sırasıyla saf su için 246 s, 285 s, 285 s; % 0,5 CMC çözeltisi için 220 s, 230 s, 215 s; % 1 CMC çözeltisi 240, 247, 260 s sürmüştür.

3.2.6. İstatistiksel Analiz

Sıcaklık ölçümleri iki paralel gerçekleştirilmiştir ve her noktanın sıcaklık değeri iki değer in ortalaması olarak verilmiştir. Boru çıkışındaki deneysel sıcaklık dağılımlarını belirlemek için OriginPro programı (OriginPro 9.0.0, OriginLab Corporation, Northampton, ABD) kullanılmıştır. On üç noktadaki deneysel sıcaklık verileri kullanılarak doğrusal regresyon uygulanmış ve kontur çizimleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetim sonuçları ile deneysel sonuçların uygunluğunu karşılaştırmak amacıyla karekök ortalama hata (KOH) değerleri hesaplanmıştır. Eşitlik 3.45 kullanılarak, deneysel sıcaklık verilerinin alındığı noktalarda sayısal benzetim sonuçları belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır.

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{deneysel}} - T_{\text{model}})^2} \quad (3.45)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. MODEL AKIŞKANLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

4.1.1. Reolojik Özellikler

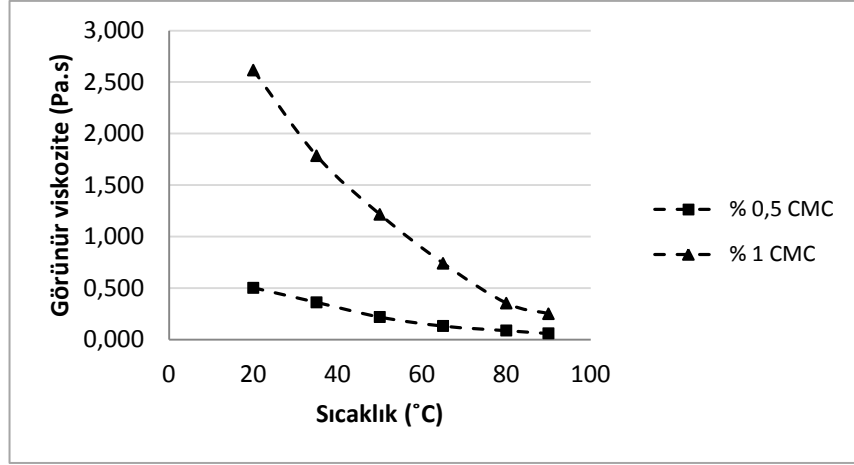
Saf su, % 0,5, %1 konsantrasyonlarındaki CMC çözeltilerinin 20-90°C sıcaklıklardaki reolojik özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Model akışkanların reolojik özellikleri

T(°C)	Saf su*	% 0,5 CMC		% 1 CMC	
	μ (Pa.s)	m (Pa.s ⁿ)	n	m (Pa.s ⁿ)	n
20	$1,005 \times 10^{-3}$	0,639	0,791	5,522	0,449
35	$0,7228 \times 10^{-3}$	0,409	0,844	2,722	0,652
50	$0,5494 \times 10^{-3}$	0,246	0,860	1,621	0,753
65	$0,4355 \times 10^{-3}$	0,148	0,865	0,953	0,781
80	$0,3565 \times 10^{-3}$	0,096	0,906	0,453	0,785
90	$0,3165 \times 10^{-3}$	0,062	0,974	0,285	0,885

* Geankoplis. C. J.1993.

CMC çözeltilerinin reolojik özellikleri incelendiğinde konsantrasyon arttıkça m değerinin arttığı, n değerinin azaldığı; sıcaklık arttıkça m ve n değerlerindeki değişimin bu durumun tersi olduğu görülmektedir. Pseudoplastik ($n < 1$) özellik gösteren CMC çözeltilerinin sıcaklık arttıkça n değerinin 1'e yaklaştığı gözlemlenmektedir. CMC çözeltilerinin reolojik özelliklerini ve sıcaklıkla değişimi ile ilgili Vais vd. (2002), Abdelrahim ve Ramaswamy (1995)' nin yaptığı çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.1'de % 0,5 ve % 1 CMC çözeltilerinin görünür viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Her iki çözeltilerin görünür viskozite değeri sıcaklık arttıkça azalmakta, % 1 CMC çözeltilerinde azalmanın daha önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. CMC çözeltilerinin görünür viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Tez kapsamında yüksek viskoziteli akışkan gıdalara model teşkil etmesi nedeniyle CMC çözeltisi model gıda olarak kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda frambuaz püresi (kuru madde içeriği % 27,6; K: 0,52 Pa.sⁿ, n:0,9) , ananas püresi (kuru madde içeriği % 35,7; K: 0,58 Pa.sⁿ, n:0,8) [Krokida vd. 2007] ve yumurta sarısının (K: 0,682 Pa.sⁿ, n:0,87) [Abbasnezhad vd., 2014] ile % 0,5 CMC çözeltisinin reolojik özelliklerinin, mango püresi (kuru madde içeriği % 18,3; K: 4,98 Pa.sⁿ, n:0,4) % 1 CMC çözeltisine benzer reolojik özellikler gösterdiği görülmektedir [Krokida vd. 2007].

4.1.2. Dielektrik Özellikler

Saf su, % 0,5, % 1 konsantrasyonlarındaki CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp faktörü (ϵ'') ve tanjant kayıp faktörü değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Materyalin mikrodalga ile etkileşimi, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü ile ilişkilidir. Dielektrik sabiti, materyalin depoladığı elektromanyetik enerji; dielektrik kayıp faktörü, depolanan elektromanyetik enerjinin ısıya dönüşme kabiliyeti ile ilgili bilgi vermektedir.

Her üç çözeltinin dielektrik sabiti değeri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. CMC çözeltilerinin dielektrik kayıp faktörü sıcaklıkla artış gösterirken, saf suyun dielektrik kayıp faktörü CMC çözeltilerinin tersine sıcaklıkla azalmaktadır. Bu durum sıcaklık arttıkça suyun mikrodalga enerjisiyi ısıya dönüştürme yeteneğinin azaldığını göstermektedir. CMC çözeltilerinde sıcaklık arttıkça ϵ'' değerindeki artış sıcaklık

artışının viskozitenin azalmasına neden olması ve buna bağlı olarak çözelti içerisindeki iyonların daha kolay hareket edebilmesi ile açıklanabilir [Coronel vd., 2008]. Mikrodalga enerjinin materyal içerisinde absorpsiyon miktarı tanjant kayıp faktörü ile ilişkilendirilmektedir. Bu değerdeki artış materyal tarafından absorbe edilen mikrodalga enerjinin daha fazla olması anlamına gelmektedir. Her iki CMC çözeltisinin tanjant kayıp faktörü saf suya göre daha yüksektir ve sıcaklık artışı saf suyun tanjant kayıp faktöründe önemli bir değişime neden olmazken, CMC çözeltilerinde artış göstermektedir. CMC çözeltilerinin konsantrasyonundaki artışı ile (özellikle yüksek sıcaklıklarda) dielektrik sabitinin ve tanjant kayıp faktörünün azaldığı gözlemlenmektedir. Coronel vd. (2008) bu durumu CMC nin suyu bağlama potansiyeli sonucunda viskozitenin artması ve iyonların, dipollerin hareketinin azalması ile dielektrik sabitinin azalmasına bağlamışlardır.

Çizelge 4.2. Model akışkanların hesaplanan dielektrik özellikleri

Materyal	T (°C)	ϵ'	ϵ''	$\tan \delta$
Saf su*	20	84,9	4,09	0,048
	35	75,8	3,39	0,045
	50	70,0	2,98	0,043
	65	65,7	2,79	0,042
	80	62,3	2,73	0,044
	90	60,4	2,74	0,045
% 0,5 CMC**	20	77,80	8,91	0,115
	35	74,14	9,26	0,125
	50	70,22	10,32	0,147
	65	66,04	12,11	0,183
	80	61,60	14,62	0,237
	90	58,49	16,69	0,285
% 1 CMC**	20	77,05	9,07	0,118
	35	73,52	9,23	0,126
	50	69,73	10,11	0,145
	65	65,67	11,70	0,178
	80	61,36	14,02	0,228
	90	58,33	15,97	0,274

* Komarov ve Tang, 2004. (Eşitlik 3.6 ve Eşitlik 3.7)

** Coronel vd., 2008. (Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5)

Eşitlik 3.9 ile hesaplanan penetrasyon derinliği ve Eşitlik 3.8 ile hesaplanan materyal içindeki dalga boyu değerleri Çizelge 4.3'de gösterilmektedir. % 0,5 ve % 1 CMC çözeltilerinin penetrasyon derinliği değerleri borunun yarıçapından yüksektir. Bu durum kullanılan borunun çapının bu çözeltileri ısıtmak için uygun olduğunu göstermektedir. Penetrasyon derinliğinin boru yarıçapından küçük olması mikrodalga enerjinin iç kısımlara doğru ilerleyememesi ve boru yüzeyine yakın kısımlarda mikrodalga absorpsiyonunun daha fazla olması anlamına gelmektedir. Bu durumda borunun iç kısımları dış kısımlara göre soğuk kalmaktadır. Penetrasyon derinliği boru yarıçapından çok yüksek ise enerji boru içerisinde yeterince kullanılmadan borunun içinden geçmekte ve enerji boru içerisinde odaklanamamaktadır. Bu da ısınmanın daha az gerçekleşmesine neden olmaktadır. [Buffler, 1993; Deng, 2014]. Sıcaklık artışı ile dielektrik kayıp faktörü artarken, penetrasyon derinliğinin sıcaklık 20°C'den 90°C'ye geldiğinde yaklaşık yarısı kadar azaldığı görülmektedir. Penetrasyon derinliğinin azalması sıcaklık arttıkça yüzeyde

ısınmanın daha fazla olduğu ve mikrodalga enerjinin borunun iç kısımlarına penetre olma miktarının azaldığını göstermektedir. Saf suyun ortalama penetrasyon derinliği değeri CMC çözeltilerinkinden yaklaşık 4 kat ve borunun yarıçapından yaklaşık 8 kat fazladır. Bu saf suyun ısıtılması sırasında mikrodalga enerjinin boru içerisinde yeterince kullanılmaması ve saf suda CMC çözeltilerine göre daha düşük sıcaklık artışının gözlemlenmesi anlamına gelmektedir.

CMC çözeltilerinin dalga boyu değerleri birbirine yakın ve saf sudan düşüktür. Sıcaklık artışı ile dalga boyu saf su için artarken; CMC çözeltilerinde azalmaktadır. Materyal içerisine giren mikrodalga enerji materyalin içinde de birçok yansımaya neden olmaktadır. Dielektrik materyalin içinde en yüksek ve en düşük uzunluktaki yansımalar dalga boyuna bağlıdır [Buffler, 1992]. Dalga boyu arttıkça, materyal içerisinde mikrodalga salınımı azalmaktadır [Santos vd., 2010]. Buna bağlı olarak dalga boyunun artışı ile ısı üretiminin azalacağı çıkarımı yapılabilir. Saf suyun dalga boyunun, CMC çözeltilerinden yüksek olması saf suyun mikrodalga ile ısıtılması sonucunda sıcaklığındaki artışın, CMC çözeltilerinden düşük olacağını göstermektedir.

Çizelge 4.3. Model akışkanların Eşitlik 3.9 ile hesaplanan dalga boyu (λ) ve Eşitlik 3.10 ile hesaplanan penetrasyon derinliği (D_p) değerleri

T (°C)	Saf Su		% 0,5 CMC		% 1 CMC	
	D_p (m)	λ (m)	D_p (m)	λ (m)	D_p (m)	λ (m)
20	0,118	0,049	0,052	0,037	0,051	0,037
35	0,134	0,052	0,049	0,038	0,049	0,038
50	0,147	0,054	0,043	0,039	0,043	0,039
65	0,152	0,056	0,035	0,040	0,036	0,040
80	0,151	0,058	0,028	0,041	0,029	0,042
90	0,148	0,058	0,024	0,042	0,025	0,043

4.1.3. Elektriksel Özellikler

% 0,5 ve % 1 konsantrasyonlarındaki CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki elektriksel iletkenlik (σ , S/m) değerleri Çizelge 4.4'de gösterilmektedir. Saf suyun elektriksel iletkenlik değeri $5,5 \times 10^{-6}$ S/m olarak kullanılmıştır (Comsol Multiphysics). % 1 CMC çözeltisinin elektriksel iletkenlik değeri % 0,5 CMC çözeltisinden yaklaşık 2 kat fazladır, bu % 1 CMC çözeltisinin

hareketli iyon sayısının daha fazla olması anlamına gelmektedir. Hareketli iyon içeren materyaller elektriksel olarak iletken olarak tanımlanırlar. İletken iyon sayısı daha fazla olan materyaller daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir ve birbiriyle ilişki içinde olan molekül sayısı arttıkça iyonik etkileşimin artması sonucunda mikrodalga absorpsiyonu artmaktadır [Buffler,1993]. Saf suyun elektriksel iletkenliğinin düşük olması mikrodalga ile ısınmanın polar etkileşim (dipol rotasyon) ile gerçekleştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.4. CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklarda ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri

T (°C)	σ (S /m)	
	% 0,5 CMC	% 1 CMC
20	0,0871	0,1489
35	0,0921	0,1650
50	0,0970	0,1780
65	0,1002	0,1932
80	0,1045	0,1986
90	0,1081	0,2123

4.1.4. Termofiziksel Özellikler

Saf su, % 0,5 ve % 1 konsantrasyonlarına sahip CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki termofiziksel özellikleri Çizelge 4.5'de gösterilmektedir. Her bir model akışkan için sıcaklık arttıkça ısı iletim katsayısı ve özgül ısı artarken, yoğunluk azalmaktadır.

Çizelge 4.5. Saf su, % 0,5, % 1 konsantrasyonlarındaki CMC çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki termofiziksel özellikleri

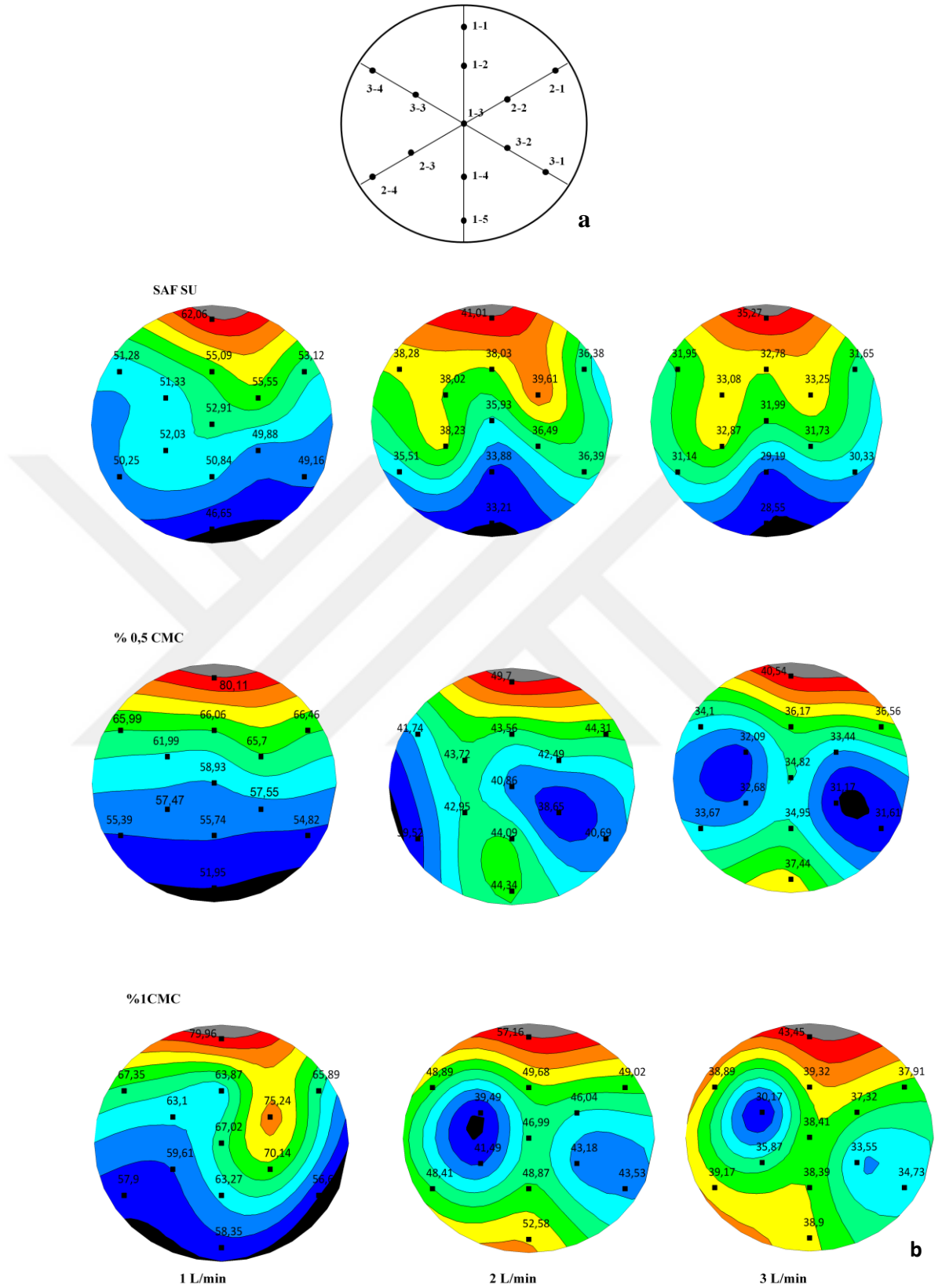
T(°C)	Saf Su*			% 0,5 CMC*			% 1 CMC*		
	k (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/kg.K)	k (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/kg.K)	k (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/kg.K)
20	0,604	995,7	4178,4	0,602	997,6	4170,3	0,601	999,5	4162,1
35	0,625	992,7	4182,9	0,623	994,5	4174,8	0,622	996,4	4166,8
50	0,642	987,9	4189,9	0,641	989,8	4181,9	0,640	991,7	4173,9
65	0,657	981,5	4199,3	0,656	983,4	4191,4	0,655	985,2	4183,4
80	0,669	973,4	4211,2	0,668	975,2	4203,3	0,667	977,1	4195,4
90	0,675	967,0	4220,5	0,674	968,9	4212,7	0,673	970,8	4204,8

*Toledo, (1999).

4.2. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA SİSTEM DENEYSEL SONUÇLAR

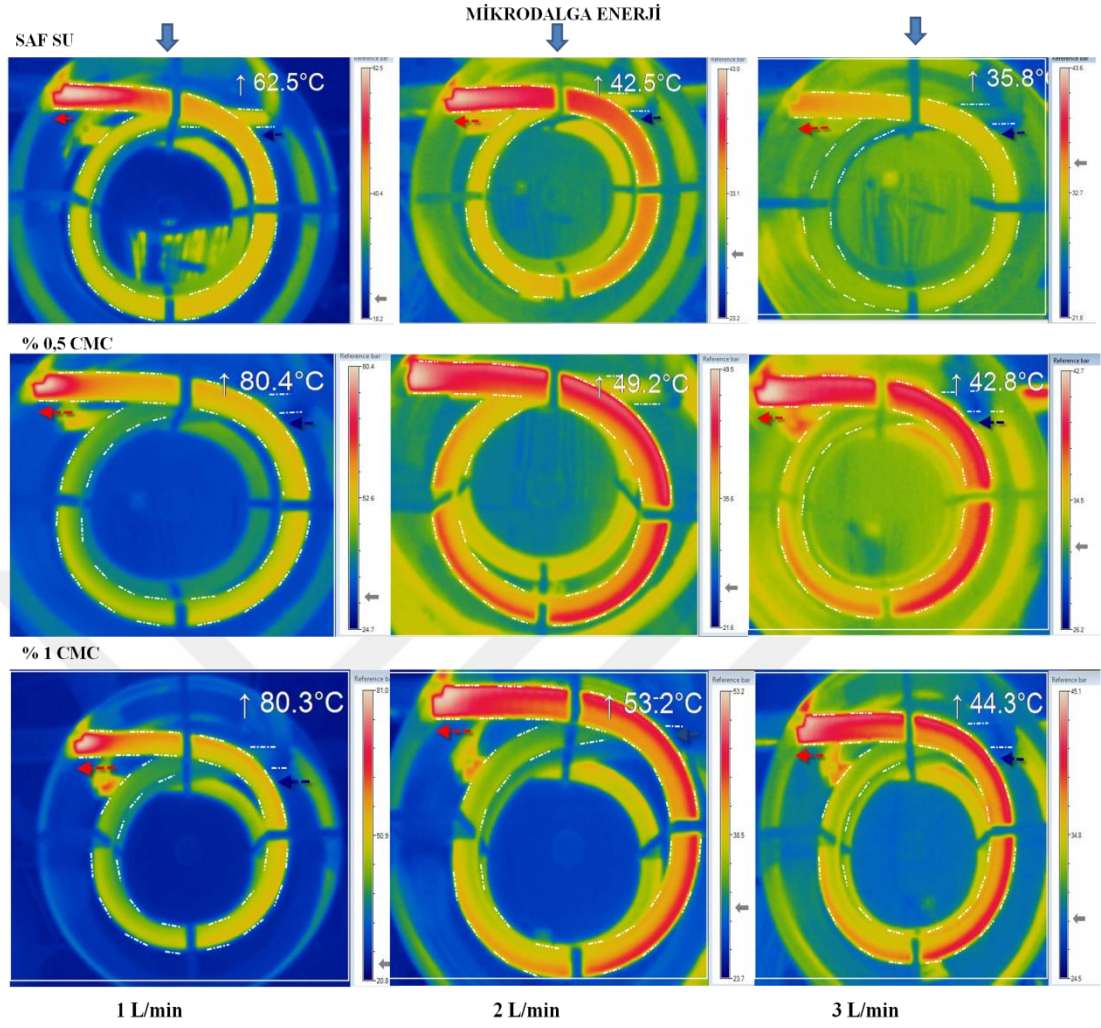
4.2.1. Helikal Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistem

Boru çıkışına yerleştirilen ısı çift düzeneği ile ölçülen sıcaklık değerleri yardımıyla çizilen kontur sıcaklık profilleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Saf su ile elde edilen en yüksek sıcaklık farkı 1 L/min hız için 15,4°C (62,06 - 46,65°C), 2 L/min hız için 7,8°C (41,01 - 33,21°C) ve 3 L/min hız için 6,7°C (35,27 - 28,55°C)'dir. En yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri 1-1 ve 1-5 noktalarında, boru duvarına yakın bölgelerde elde edilmiştir. % 0,5 CMC çözeltisi ile elde edilen en yüksek sıcaklık farkı 1 L/min hız için 28,2°C (80,12 - 51,95°C), 2 L/min hız için 10,7°C (49,35 - 38,65°C) ve 3 L/min hız için 9,4°C (40,54 - 31,17°C)'dir. En yüksek sıcaklık değeri 1-1 noktasında olduğu ve en düşük sıcaklık değerinin akış hızıyla değişkenlik gösterdiği 1 L/min hızda 1-5 noktasının, 2 ve 3 L/min hızlarda 3-2 noktasının en az ısındığı görülmüştür. % 1 CMC çözeltisi ile elde edilen en yüksek sıcaklık farkı 1 L/min hız için 23,3°C (79,96 - 56,69°C), 2 L/min hız için 17,7°C (57,16 - 39,50°C) ve 3 L/min hız için 13,3°C (43,45 - 30,17°C)'dir. En yüksek sıcaklık değeri 1-1 noktasında olduğu görülmüş ve en düşük sıcaklık değerinin akış hızıyla değişkenlik gösterdiği 1 L/min hızda 3-1 noktasında, 2 ve 3 L/min hızlarda 3-3 noktasının en az ısındığı görülmüştür.



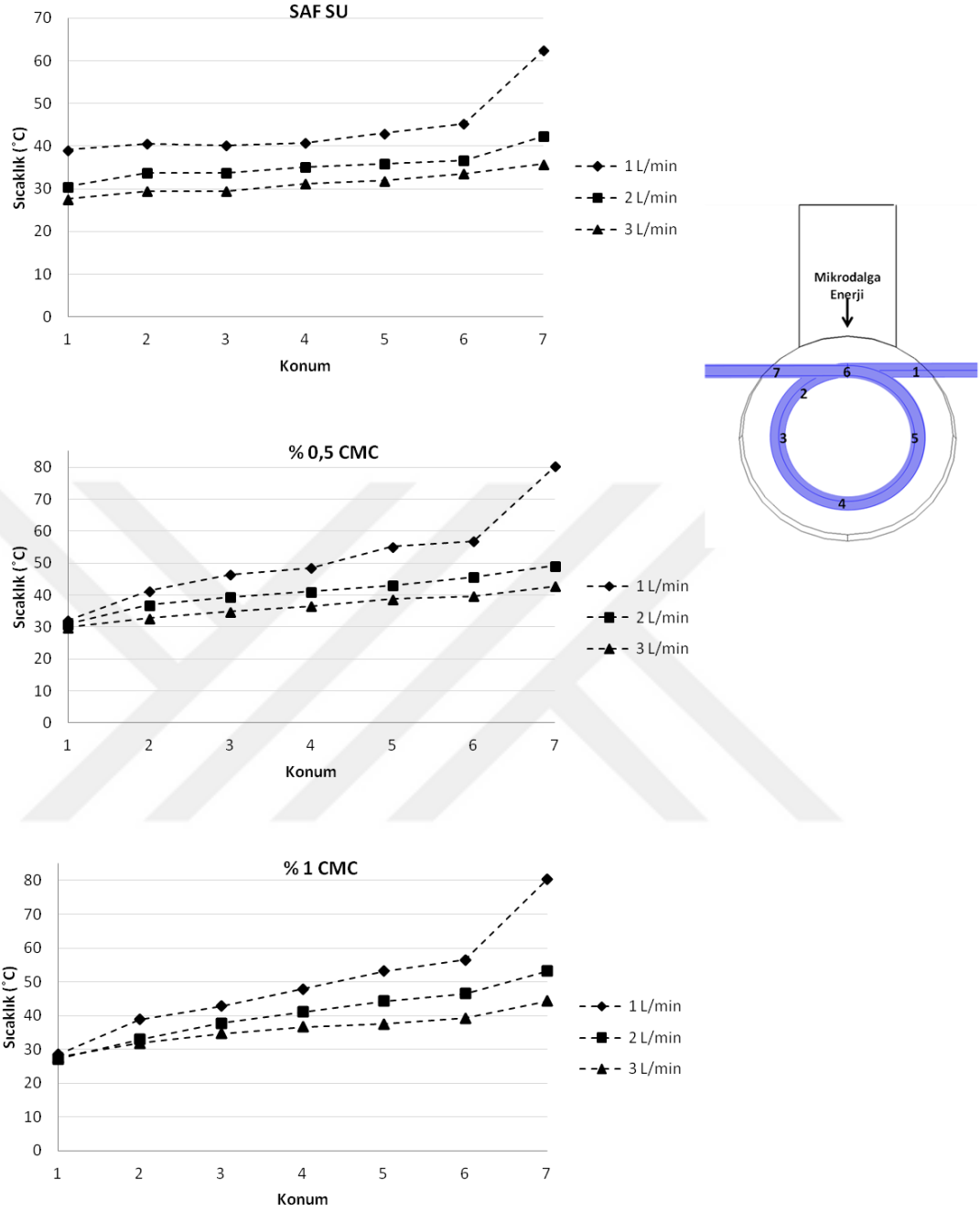
Şekil 4.2. a) Isıl çiftlerin yerleri b) Model akışkanların farklı akış hızlarında helikal boru konfigürasyonlu sistemin çıkışında elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları

Şekil 4.3'de infrared kamera ile elde edilen ve borunun üst yüzey sıcaklıklarını gösteren termal görüntüler verilmiştir. Her bir imajın üzerinde gösterilen değer boru yüzeyi boyunca ulaşılan en yüksek sıcaklık değerini ve beyaz kesikli çizgiler ise borunun sınırlarını göstermektedir (beyaz kesikli çizgilerin dışında kalan alanlar kavite içerisindeki yansımalarıdır). Boru üst yüzeyi boyunca en çok ısınan noktanın bütün koşullarda borunun kaviteyi terkettiği kısımda olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki sıcaklık değerleri 1-1 noktası ile karşılaştırılabilir ancak 1-1 noktası borunun iç yüzeyinden de içeridedir, bu nedenle sıcaklık değerleri farklılık göstermektedir. Şekil 4.2'de gösterilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımlarında da 1-1 noktasının (yani borunun üst kısmının) her koşulda diğer noktalara göre daha sıcak olduğu görülmektedir. Helikal borunun sistemden çıktığı yer kavitenin üst yüzeyine oldukça yakındır (3-4 cm). Bu durumun kavitenin üst kısmından olan elektromanyetik yansımanın doğrudan 1-1 noktasına gelmesine ve bu noktanın daha çok ısınmasına neden olabileceği düşünülmektedir. Bu noktadaki sıcaklık değeri akışkan türüne ve akış hızına göre değişmektedir. Akış hızı arttıkça ve akışkanın viskozitesi azaldıkça bu noktadaki değerin diğer noktalarla daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Artan akış hızı ve düşük viskozite değerlerinde konveksiyon etkisi, düşük akış hızı ve yüksek viskozite değerlerinde ise konduksiyon etkisi daha baskındır. Konveksiyon etkisinin akışkan içerisinde karışma etkisi yaratmasının, sıcaklık farklılıklarının azalmasına neden olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Helikal boru boyunca model akışkanların farklı akış hızlarındaki termal görüntüleri

Termal görüntülerden yararlanılarak, model akışkanların helikal boru uzunluğu boyunca belirli noktadaki sıcaklık değerleri belirlenmiştir (Şekil 4.4). Model akışkanların kaviteden çıktığı 6-7 noktası arasındaki sıcaklık artışının diğer noktalar arasındaki sıcaklık artışından yüksek olduğu görülmektedir. Akış hızının 2 L/min ve 3 L/min olduğu durumda sıcaklık kademeli olarak artarken, 1 L/min akış hızında ise 6 noktasına kadar aynı şekildeyken 7 noktasında artış keskin bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu gözlem 1-1 noktasında sıcaklık değerinde görülen artışla ilişkilendirilebilir. 1 L/min akış hızında sıcaklık artışının bu kadar keskin olması, düşük akış hızı nedeni ile alıkonma süresinin artması ve bu nedenle akışkanın kavitenin üst yüzeyinden yansıdığı düşünülen mikrodalga enerjisi daha fazla absorbe etmesi olarak açıklanabilir.



Şekil 4.4. Helikal boru uzunluğu boyunca 7 noktada termal görüntülerden elde edilen sıcaklık değerleri

Akışkanların sistemi terkettiği ortalama çıkış sıcaklıkları ve standart sapma değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmektedir. Saf suyun ortalama çıkış sıcaklığının bütün akış hızlarında CMC çözeltilerine göre daha düşük ve en yüksek sıcaklık artışının % 1 CMC çözeltisinde olduğu gözlemlenmiştir. Isınmanın saf suyun 3 L/min hacimsel akış hızında en fazla, % 0,5 CMC çözeltisinin 1 L/min hacimsel akış

hızında en az homojen olduğu gözlemlenmiştir. Akış hızı arttıkça standart sapma değerlerinde azalma olduğu ve en yüksek standart sapma değerinin % 0,5 CMC çözeltisinin 1 L/min akış hızında olduğu gözlemlenmiştir. Akışkanların viskozitesi azaldıkça sıcaklığın daha homojen dağıldığı ve akış hızı arttıkça homojenliğin de arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.6. Helikal konfigürasyonlu sistemde ısıtılan model akışkanların farklı akış hızlarında ortalama çıkış sıcaklıkları

Akış hızı	T _{ort,çıkış} (°C)		
	Saf Su	% 0,5 CMC	% 1 CMC
1 L/min	52,32 ± 3,77	61,40 ± 7,50	65,26 ± 6,86
2 L/min	37,00 ± 2,17	42,43 ± 2,67	47,33 ± 4,72
3 L/min	31,83 ± 1,78	34,56 ± 2,63	37,39 ± 3,25

Homojen sıcaklık dağılımını model akışkanların boru içerisinde akış profilleri ve akış davranışları incelenerek açıklanabilir. Helikal boru içerisinde akış sırasında iki etki ortaya çıkmaktadır; birinci etki borudaki kavis nedeniyle akış hızının en yüksek olduğu yerin borunun dış duvarına doğru yer değiştirmesi ve alıkonma süresi dağılımının (RTD, U_{max}/U_{ort}) azalması, ikinci etki ise radyal yönde karışım sağlayan ikincil akışın oluşmasıdır. Bu iki etki arasındaki denge Reynolds sayısı ile ilişkilendirilmekte ve ikincil akışın derecesi Dean sayısı ile açıklanmaktadır. Helikal boru içerisinde katmanlı akış koşullarında, Reynolds sayısının artışı ikincil akışın artmasına böylece boru içerisinde meydana gelen en yüksek ve en düşük hız değerlerinin birbirine yakın olmasına neden olmaktadır [Castelain vd. 2006; Palazoğlu ve Sandeep, 2004].

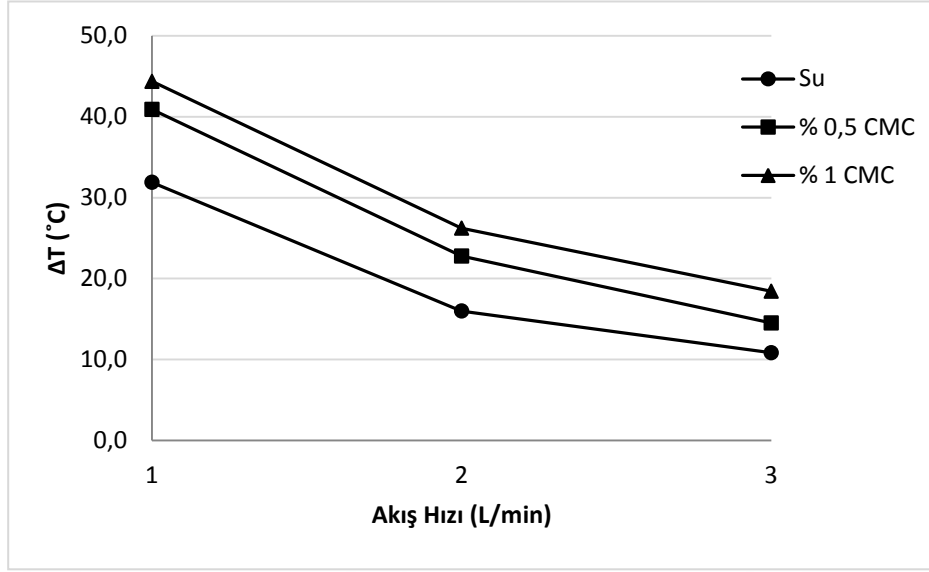
Çizelge 4.7. Model akışkanların farklı akış hızlarındaki Re ve Dn sayıları

Akış hızı (L/min)	Saf Su		% 0,5 CMC		% 1 CMC	
	Re	Dn	Re	Dn	Re	Dn
1	556,2	180,76	1,36	0,44	0,14	0,05
2	1112,4	361,53	2,39	0,78	0,42	0,14
3	1668,6	542,29	3,91	1,27	0,79	0,26

Model akışkanların farklı akış hızlarındaki Reynolds ve Dean sayıları Çizelge 4.7'de verilmiştir. % 0,5 ve % 1 CMC çözeltilerinin Dean sayısının saf suyunkinden

oldukça düşük olduğu görülmektedir. Her üç akış hızında da saf suda en düşük standart sapma değerinin görülmesi (Çizelge 4.6), helikal boruda akış sırasında saf suda ikincil akış etkisinin CMC çözeltilerinden daha fazla olması ile açıklanabilir. Saf suyun akışı sırasında ikincil akış etkisinin daha yüksek olması karışma etkisinin daha çok görülmesine neden olmuştur. Austin ve Seader (1973), Saxena ve Nigam (1979, 1984)'ın yaptıkları çalışmalarda düşük Dean sayısı değerlerinde akışkanların eksensel akış profillerinin ve alıkonma süresi dağılımlarının düz borudaki ile benzer olduğunu rapor etmişlerdir. Dean sayısı 10'un üzerine çıktığında en yüksek hızın görüldüğü bölge borunun dış duvarına doğru hareket etmektedir. Yüksek Dean sayısı değerlerinde ikincil akış etkisi iki veya dört vorteks oluşumu şeklinde gerçekleşmektedir [Masliyah, 1980]. Bu çalışmada, bütün akış hızlarında saf suyun Dean sayısı değeri 100'ün üzerinde, CMC çözeltilerinin ise 1'in altındadır. Bu nedenle model akışkanların akış ve sıcaklık profillerinin farklı olduğu görülmektedir. Yüksek Dean sayısı saf suda ikincil akış etkisinin daha fazla görülmesine neden olmaktadır. Dean sayısının artışı ile karıştırma etkisi artarak sıcaklık dağılımı daha homojen olmuş ve yüksek akış hızlarında ikincil akış derecesini artışı ile daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Saf su için akış hızı arttıkça standart sapma değerlerinin azalması ikincil akış etkisinin yüksek akış hızında düşük akış hızına göre daha etkin olmasındandır. CMC çözeltileri kullanıldığında Dean sayısının düşük olması sebebi ile ikincil akışın neden olduğu karıştırma etkisi sağlanamamaktadır. Saf suda ısı transferi zorlamalı konveksiyonla gerçekleşirken, CMC çözeltilerinde daha yavaş gerçekleşen doğal konveksiyon ve kondüksiyon mekanizmaları daha etkindir. Bu nedenle ısının katmanlar arasında dağılımı daha yavaş gerçekleşmekte bunun sonucunda da daha az homojen sıcaklık dağılımı ortaya çıkmaktadır. Dean sayısının düşük olduğu durumda helikal konfigürasyonlu boru ile karıştırma etkisinden çok, borunun kavite içerisinde farklı elektrik alan bölgelerinden geçmesinin sıcaklık artışı ve dağılımında daha etkili olduğu söylenebilir.

Helikal boru konfigürasyonlu sistemde saf suyun ısıtılması sırasında homojen ısınmanın daha fazla gerçekleştiği ancak sıcaklık artışının en düşük saf suda olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.5). CMC çözeltileri ile karşılaştırıldığında saf suyun tanjant kayıp faktörünün daha düşük olduğu ve sıcaklık artışı ile bu değerde önemli bir değişim gözlemlenmediği görülmektedir (Çizelge 4.2). Saf suyun tanjant kayıp faktörü CMC çözeltilerinden düşüktür ve sıcaklık artışı ile tanjant kayıp faktörü önemli bir değişim göstermemektedir. CMC çözeltilerinin tanjant kayıp faktörü değerlerinin saf suya göre yüksek oluşu ve sıcaklık ile artış göstermesi, CMC çözeltilerinin sıcaklık artışı ile mikrodalga enerjiyi daha iyi absorbe etmesine ve ısınma kabiliyetinin artışına neden olduğu söylenebilir. Tanjant kayıp faktörünün yanı sıra borunun çapı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişki akışkanların ısınma davranışını etkilemektedir. Penetrasyon derinliği borunun çapından büyükse elektromanyetik dalgaların önemli bir kısmı kullanılmadan materyal içerisinden geçmektedir. Isınmanın homojen gerçekleşmesi için çapın penetrasyon derinliğinin optimum 2-2,5 katı olması gerekmektedir [Buffler,1993]. Bu durumda daha homojen ısınma ve mikrodalga enerji daha etkin kullanılacağı için sıcaklık artışı daha fazla olacaktır. Saf suyun penetrasyon derinliğinin borunun çapının yaklaşık 4 katı olması ve mikrodalga enerjinin boru içerisinde etkin olarak kullanılmaması saf suyun daha az ısınmasına neden olmuş olabilir. CMC çözeltilerinin ise penetrasyon derinliği boru çapının yaklaşık 1,4 katıdır ve sıcaklık artışı daha fazla olmuştur. Saf suda ısınmanın daha fazla gerçekleştirilmesinin boru çapının artırılması ile sağlanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.5. Model akışkanların helikal boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık artış değerlerinin akış hızı ile değişimi

Literatürde sürekli akış mikrodalga sistemler ile ilgili yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu ve bu çalışmalarda mikrodalga enerjiyi borunun merkezinde odaklayan sistemler kullanıldığı görülmektedir. Salvi vd. (2011) yaptıkları çalışmada musluk suyu, tuzlu su ve % 0,5 CMC çözeltisinin 1, 1,6 ve 2 L/min akış hızlarında sürekli akış mikrodalga sistemde ısınma davranışını belirlemişlerdir. Bu amaçla mikrodalga enerjiyi ve gücü akış hızının en yüksek olduğu bölgeye (borunun merkezi) odaklayan frekansı 915 MHz, 4 kW gücünde sürekli akış mikrodalga sistem kullanmışlardır. Bu çalışma sonucunda homojen ısınmanın en az % 0,5 CMC çözeltisinde en fazla tuzlu suda olduğu gözlemlenmiştir. % 0,5 CMC çözeltisinde 1 L/min akış hızında sıcaklık artışı 35°C iken, en yüksek sıcaklık farkının 60°C, aynı hızda musluk suyu ısıtıldığında ise sıcaklık artış değerinin 35°C ve en yüksek sıcaklık farkının 16°C olduğu rapor edilmiştir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, % 0,5 CMC çözeltisinde 1 L/min akış hızında sıcaklık artışı 41°C iken, en yüksek sıcaklık farkının 28,2°C, aynı hızda saf su ısıtıldığında ise sıcaklık artış değerinin 32°C ve en yüksek sıcaklık farkının 15°C olduğu görülmüştür. Salvi vd. (2011)'nin yaptıkları çalışma ve helikal konfigürasyonlu sistem ile saf suyun ısıtılması karşılaştırıldığında sıcaklık artışı ve dağılımının benzer olduğu, % 0,5 CMC çözeltisi için sıcaklık artışı daha fazla iken ısınmanın da daha homojen gerçekleştiği görülmektedir.

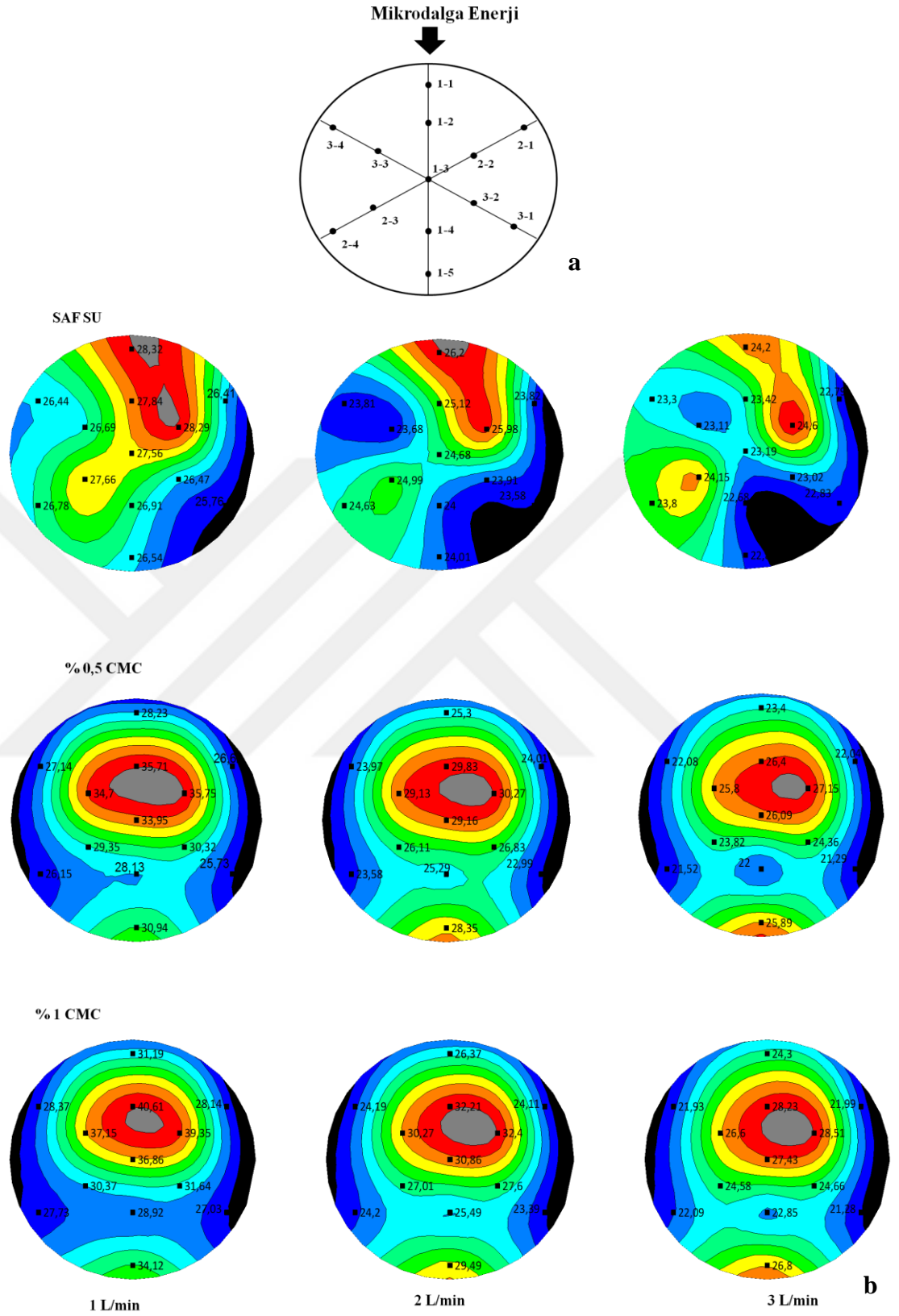
Zhong vd. (2003), yaptıkları çalışmada sürekli akış radyo frekansı sistemle % 1 CMC çözeltisinin ısıtılmasını ve sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Boru (iç çapı 0,144 m; uzunluğu 2,06 m) içerisinde akan % 1 CMC çözeltisi radyo frekans sistem (frekansı 40,68 MHz ve 30 kW gücünde) ile ısıtılmış ve boru çıkışındaki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Hacimsel akış hızının 7,56 L/min, 15,12 L/min, 22,68 L/min olduğu durumda merkez ile boru duvarı arasındaki sıcaklık farkı 20°C, 14°C ve 10°C olarak ölçülmüştür. Tez kapsamında yapılan çalışmada % 1 CMC çözeltisi ile 1 L/min, 2 L/min ve 3 L/min akış hızlarında bu değerlerin en yüksek 12,9°C; 10,2°C; 5,0°C olduğu görülmektedir. Helikal geometri boru ile daha düşük hacimsel akış hızı değerlerine rağmen boru ile duvar arasındaki sıcaklık farklılıklarının daha düşük olduğu görülmektedir.

4.2.2. Düz Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistem

Boru çıkışına yerleştirilen ısı çift düzeneği ile ölçülen sıcaklık değerleri kullanılarak çizilen kontur sıcaklık grafikleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Saf su ile elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 2,62°C (28,32-25,76°C), 2 L/min hız için 2,56°C (26,2-23,58°C) ve 3 L/min hız için 1,9°C (24,6-22,68°C)'dir. En yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri 1 ve 2 L/min akış hızlarında 1-1 ve 3-1 (Şekil 4.6) noktalarında boru üst duvarına yakın kısımlarda, 3 L/min akış hızında ise 2-2 ve 1-4 noktalarında orta kısımda elde edilmiştir. % 0,5 CMC çözeltisi ile elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 10,02°C (35,75 - 25,73°C), 2 L/min hız için 7,28°C (30,27 - 22,99°C) ve 3 L/min hız için 5,86°C (27,15 - 21,29°C)'dir. Bütün akış hızlarında en yüksek ve en düşük sıcaklık değeri 2-2 ve 3-1 noktalarında görülmüştür. % 1 CMC çözeltisi ile elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 13,58°C (40,61 - 27,03°C), 2 L/min hız için 9,01°C (32,4 - 23,39°C) ve 3 L/min hız için 7,23°C (28,51 - 21,28°C)'dir. Üç akış hızında da en düşük sıcaklık değerleri 3-1 noktasında gözlenmiş, en yüksek sıcaklık farkı 1 L/min akış hızında 1-2 noktasında, 2 ve 3 L/min akış hızlarında 2-2 noktasında gözlemlenmiştir.

Model akışkan değiştikçe borudaki soğuk ve sıcak noktaların yer değiştirdiği görülmektedir. Saf su, mikrodalga enerjinin geldiği yönde ısınmaktayken borunun

diğer kısımları daha soğuk kalmaktadır. CMC çözeltilerinde elde edilen sıcaklık dağılımları benzerdir, mikrodalga enerjinin geliş yönünde (saf suya göre daha iç kısımlarda) ısınma olduğu ve tam karşı bölgede de (1-5) benzer sıcaklık artışı olduğu gözlemlenmiştir. CMC çözeltilerinde sıcak nokta borunun merkezine yakın bir noktadadır. Zhang ve Datta, (2005a) mikrodalga ısıtma sırasında silindirik ve küresel geometriye sahip gıdalarda ısınma davranışlarını incelemişler ve silindirik gıdalar için küçük yarıçap değerlerinde ısınma davranışı dalga boyu ile ilişkiyken penetrasyon derinliğinden bağımsız olduğunu rapor etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada materyalin yarıçapının dalga boyundan küçük ($\lambda \gg r$) olduğu durumda materyali elektromanyetik olarak küçük olarak tanımlamışlardır. Bu durumda sıcak nokta borunun merkezine yakın bir noktada odaklanmaktadır, bunun için kriter olarak dalga boyunun yarıçapa oranının 2,73'den küçük olması gerekmektedir. Su ve CMC çözeltilerine ait dalga boyu değerleri Çizelge 4.3'de gösterilmektedir. Dalga boyunun yarıçapa oranı saf su için 2,58 iken, CMC çözeltileri için yaklaşık 1,95'dir. Bu değer saf suda 2,73'e daha yakın olması sıcaklık dağılımında yüzeyde ısınmanın daha baskın olmasının, CMC çözeltilerinde ise daha düşük değerde olması sıcak noktanın merkeze yakın bir noktada olmasının nedeni olarak açıklanabilir.



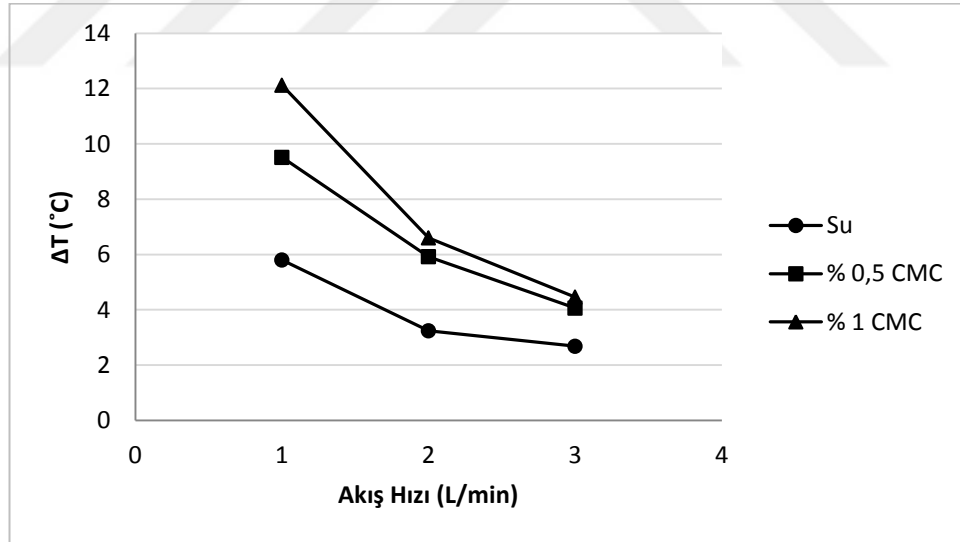
Şekil 4.6. a) Isıl çiftlerin yerleri b) Model akışkanların farklı akış hızlarında düz boru konfigürasyonlu sistemin çıkışında elde edilen deneysel sıcaklık dağılımları

Model akışkanların sistemi terk ettiği ortalama sıcaklık değerleri Çizelge 4.8' de gösterilmektedir. En yüksek standart sapma değeri 1 L/min akış hızında % 1 CMC çözeltisinde, en düşük standart sapma değeri ise 3 L/min akış hızında saf suda gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.8. Düz boru konfigürasyonlu sistemde ısıtılan model akışkanların farklı akış hızlarında ortalama çıkış sıcaklıkları

Akış hızı	$T_{\text{ort,çıkış}} (^{\circ}\text{C})$		
	Saf Su	% 0,5 CMC	% 1 CMC
1 L/min	27,05 \pm 0,80	30,21 \pm 3,69	32,42 \pm 4,69
2 L/min	24,49 \pm 0,87	26,52 \pm 2,57	27,50 \pm 3,23
3 L/min	23,38 \pm 0,62	24,06 \pm 2,03	24,71 \pm 2,57

Model akışkanlara ait sıcaklık artış değerleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Sıcaklık artış değerinin en düşük saf suda, en yüksek % 1 CMC çözeltisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Model akışkanların düz boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık artış değerlerinin akış hızı ile değişimi

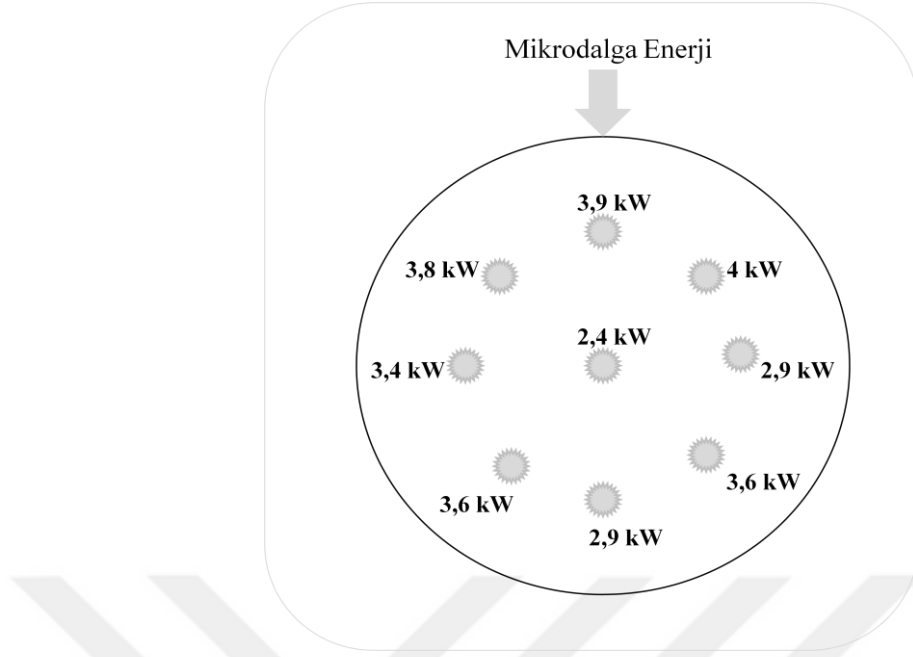
4.2.3. Düz ve Helikal Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Karşılaştırılması

Her iki sistemde yapılan deneyler sonucunda düz boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık artışının helikal boru konfigürasyonlu sisteme göre daha düşük olduğu, model akışkanların ise ısınma davranışlarının boru konfigürasyonuna göre değişmediği gözlemlenmiştir. Standart sapma değerleri karşılaştırıldığında düz boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık dağılımının daha homojen gerçekleştiği söylenebilir. Helikal boruya göre daha kısa olan düz boruda sıcaklık dağılımında meydana gelebilecek farklılıklar sıcaklıktaki artışın fazla olmaması nedeni ile gözlenememiştir. Tez kapsamında düz boru kavitenin merkezine yerleştirilmiş ve model akışkanların bu pozisyondaki sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Sürekli akış mikrodalga sistemlerde kavitenin geometrisi ve boyutları, borunun çapı ve yerleştirildiği yer akışkanın ısınmasını etkilemektedir [Zhu vd., 2007b; Cuccuollo vd., 2013]. Elde edilen sonuçlar bu noktada mikrodalga enerjinin etkin kullanılmadığını göstermektedir. Helikal boru kullanımı ile boru kavitenin farklı bölgelerinden geçmekte ve bu bölgelerde farklı elektromanyetik alana maruz kalmaktadır. Bu da helikal konfigürasyonlu sistemde model akışkanlar tarafından absorbe edilen mikrodalga enerjinin (q_{abs}) daha fazla olmasına neden olmaktadır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Düz ve helikal konfigürasyonlu sistem için deneysel olarak elde edilen ve Eşitlik 3.19 ile hesaplanan q_{abs} değerleri

Akışkan	Akış hızı (L /min)	HELİKAL		DÜZ	
		q_{abs} (W)	q_{abs} (%)	q_{abs} (W)	q_{abs} (%)
SAF SU	1	2.199,2	54,9	399,8	9,9
	2	2.206,2	55,2	446,8	11,2
	3	2.233,8	55,8	554,3	13,9
% 0,5 CMC	1	2.824,5	70,6	656,8	16,4
	2	3.149,1	78,7	817,7	20,4
	3	3.004,1	75,1	841,2	21,0
% 1 CMC	1	3.065,8	76,6	836,9	20,9
	2	3618,2	90,5	911,5	22,8
	3	3.811,6	95,3	923,9	23,1

Toplam giriş gücü 4000 W olarak uygulanmış ve her iki sistem için en yüksek absorbe edilen güç miktarı (helikal boruda % 95,2 ve düz boruda % 23,1) % 1 CMC çözeltisinde 3 L/min akış hızında görülmüş, en az ise (helikal boruda % 54,9 ve düz boruda % 9,9) saf suyun 1 L/min hızda akışı sırasında gözlemlenmiştir. Helikal konfigürasyonlu sistemde absorbe olan mikrodalga enerjinin düz konfigürasyonlu sisteme göre yüksek olduğu görülmektedir. Helikal konfigürasyonlu sistemde, kavite içerisindeki borunun uzunluğu (154 cm), düz borunun (25 cm) yaklaşık 6 katıdır. Kavite içerisindeki borunun uzunluğunun fazla olması ve akışkanın farklı bölgelerde farklı elektrik alana maruz kalması absorbe edilen mikrodalga enerjinin daha fazla olmasına neden olmaktadır. Şekil 4.8'de gösterilen noktalarda belirli miktardaki su tarafından absorbe edilen mikrodalga enerji değerleri gösterilmektedir. Kavitenin farklı noktalarında absorbe edilen güç değerleri, helikal borunun geçtiği yerlerde akışkanın farklı ve kavitenin merkezine göre yüksek değerlerde mikrodalga enerjiyi absorbe ettikleri görülmektedir. Bu noktalar içerisinde en düşük güç kavitenin merkezinde, en yüksek ise mikrodalga enerjini geldiği yöndeki noktalarda olduğu belirlenmiştir. Düz borunun helikal borudan kısa olması ile birlikte yerleştirildiği kavitenin merkezinde mikrodalga enerji absorpsiyonunun düşük olması sıcaklık artışının helikal boruya göre daha düşük olmasına neden olmuştur.



Şekil 4.8. Kavitenin farklı noktalarında absorbe olan mikrodalga gücü değerleri

Akışkanın sistem içerisinde alıkonma süresinin akış hızı arttıkça azalması sıcaklık artışını azaltırken (Şekil 4.5 - 4.7), q_{abs} değerinin akış hızı arttıkça arttığı görülmektedir. Absorbe edilen mikrodalga enerji miktarı dielektrik sabiti (ϵ') ile ilişkilendirildiğinde, düşük sıcaklıkta ϵ' değeri yüksekken sıcaklık arttıkça azalmaktadır (Çizelge 4.2). Yüksek akış hızında sıcaklıktaki artışın daha az olması ve buna bağlı olarak ϵ' değerinin yüksek olması nedeni ile q_{abs} değerinin akış hızı arttıkça artış gösterdiği söylenebilir.

Alıkonma süresi düz boru konfigürasyonlu sistemde helikal boru konfigürasyonlu sisteme göre daha azdır ancak literatürde düz boru ile benzer alıkonma sürelerinde daha fazla sıcaklık artışı olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda (Çizelge 4.10) kullanılan sürekli mikrodalga sistemler eliptik kavite, daralan dalga kılavuzu ve düz boru konfigürasyonuna sahip 915 MHz frekansta çalışan mikrodalga enerjinin borunun merkezine odaklandığı sistemlerdir. Bu çalışmalar içerisinde Salvi vd. (2009) yaptıkları çalışmada 1 L/min ve 2 L/min akış hızında musluk suyunun ve % 0,5 CMC çözeltisinin sıcaklık artışının her ikisi için yaklaşık 35°C ve 15°C iken; düz boru konfigürasyonlu sistemde sıcaklık artışı % 0,5 CMC çözeltisi için 9°C ve 6°C , saf su için ise 6°C ve 3°C'dir. Salvi vd. (2009)'nin

yaptıkları çalışmada boru çapı ve uzunluğunun düz boru konfigürasyonlu sistemden çok farklı olmamasına rağmen, elde edilen sıcaklık artış değerinin helikal borunun sıcaklık artış değeri ile benzer olduğu görülmektedir. Silindirik kavitenin merkezinde sıcaklık artış değerinin eliptik kaviteye göre oldukça düşük gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Çalışmada kavitenin geometrisi ve borunun mikrodalga enerjinin etkin kullanılmadığı bir pozisyona yerleştirilmesi sıcaklık artışının daha az olmasına neden olmuştur.



Çizelge 4.10. Literatürde sürekli mikrodalga sistemler ile yapılan çalışmalar

Materyal	Boru Çap/Uzunluk (m)	Güç	Alınma süresi	ΔT	Kaynak
Süt	0,039 / 0,124	5 kW	4,4 s (2 L/min) 2,9 s (3 L/min)	42°C (39 - 42,8°C) 29°C (28,5 - 31°C)	Coronel vd., 2003
Yağ - Etanol karışımı	0,032 / 0,254	4 kW 4,7 kW	14,6 s (0,84 (L/min)	30°C (46,5 - 68,9°C) 30°C (58,6 - 76,1°C)	Muley ve Boldor, 2012
Su			12,1 s (1 L/min) 6,08 s (2 L/min)	35°C (62 - 78°C) 17°C	
%0,5 CMC	0,0318 / 0,254	4 kW	12,1 s (1 L/min) 6,08 s (2 L/min)	35°C (40 - 100°C) 15°C	Salvi vd., 2009
Tuzlu su			12,1 s (1 L/min) 6,08 s (2 L/min)	55°C (74 - 84°C) 28°C	
Bezelye - Havuç püresi	0,038 / 0,28 0,038 / 0,90	3 kW 30 - 40 kW	21,1 s (0,9 L/min) 16,4 s (3,78 L/min)	100°C 100°C	Kumar vd., 2008
Tatlı patates püresi	0,038 / 0,125 0,038 / 0,40	5 kW 60 kW	17 s (0,5 L/min) 6,8 s (4 L/min)	110°C (80-120°C) 110°C (70-145°C)	Coronel vd., 2005

Kumar vd. (2008) yaptıkları çalışmada bezelye ve havuç püresinin iki farklı sürekli akış mikrodalga sistemde ısıtılmasını ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımlarını incelemiştir. Bu amaçla frekansı 915 MHz olan 5 ve 60 kW olmak üzere iki farklı güçte mikrodalga enerjinin borunun merkezine odaklandığı sistemler kullanmışlardır. Gücü 60 kW olan sistemde iki ayrı kavite birbirine bağlanmış, viskoz akışkanlar 3,78 L/min akış hızında (alıkonma süresi 16,4 s) ısıtılmıştır. Gözlenen sıcaklık dağılımlarının önemli düzeyde farklılık göstermesi nedeni ile her iki kavite çıkışına statik karıştırıcılar yerleştirilmiş ve bu sayede en yüksek sıcaklık farkı değerleri bezelye püresi için 38,2°C'den 15,4°C'ye ve havuç püresi için 54,5°C'den 11,6°C'ye indirilmiştir. Benzer sistem kullanılarak tatlı patates püresinin ısıtılması ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımları incelenmiştir [Coronel vd., 2003]. Öncelikle 5 kW güce sahip sistemde ısıtma gerçekleştirilmiş 110°C , 130°C ve 140°C ortalama çıkış sıcaklıklarında en yüksek sıcaklık farkı sırası ile 35°C, 40°C , 43°C olarak gözlemlenmiştir. Gücü 60 kW olan sistemle en yüksek sıcaklık farkı 75°C'ye kadar çıkmış ve sıcaklık dağılımını homojenleştirmek için sisteme statik karıştırıcılar eklenmiştir. Bu sayede sıcaklık farkının 75°C'den 9°C'ye düştüğü rapor edilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan gıda örneklerinin viskozitesi tez kapsamında kullanılan model akışkanlardan yüksektir. Meydana gelen homojen olmayan sıcaklık dağılımını önlemek için sisteme statik karıştırıcılar eklenmiştir. Tez kapsamında kullanılan boru ve helikal çapında bu akışkanlar için ikincil akış etkisi ile karışmanın sağlanamayacağı düşünülmektedir. Ancak helikal boru aynı zamanda kavitenin farklı bölgelerinde farklı elektromanyetik alan şiddetine maruz kalması nedeniyle de homojen sıcaklık dağılımına neden olabilmektedir. Bu nedenle viskozitesi yüksek akışkanlar için helikal boru kullanımı ile sisteme karıştırıcı eklenmeden daha homojen sıcaklık dağılımının elde edileceği düşünülmektedir.

4.3. SÜREKLİ AKIŞ MİKRODALGA SİSTEMİN SAYISAL BENZETİMİ

Sayısal benzetimin ilk aşamasında sürekli akış mikrodalga sistem ile ısıtma modelinin doğrulanması amacıyla literatürde bulunan bir çalışmadan [Sabliov vd., 2007] yararlanılmıştır. Sabliov vd. (2007)'nin yaptığı çalışmada eliptik kavite, daralan dalga kılavuzuna sahip bir sürekli akış mikrodalga sistem ile suyun ısıtmasının sayısal benzetimi ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Tez kapsamında sürekli akış mikrodalga sistemi COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Bölüm 3.2.5'de anlatıldığı gibi suyun ısıtılmasının sayısal modeli oluşturulmuş, suyun dielektrik ve termofiziksel özellikleri sabit tanımlanmıştır. Çizelge 4.11'de Sabliov vd. (2007) ve tez kapsamında kullanılan yöntemle elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.11. Akış hızı 1 L/min ve 2 L/min olan suyun ANSYS ve COMSOL yazılımları ile sayısal benzetiminin sonuçları

		Sabliov vd. 2007 (ANSYS)	Tez (COMSOL)
1 L/min	T_{ort,çıkış} (°C)	42,0	43,7
	T_{max,çıkış} (°C)	80,0	71,6
2 L/min	T_{ort,çıkış} (°C)	34,3	34,0
	T_{max,çıkış} (°C)	57,0	48,5

COMSOL Multiphysics programı ile modellenen eliptik kavite daralan dalga kılavuzu konfigürasyonlu sistemde hacimsel ısı üretim değeri 104.000 - 60.810.000 W/m³ aralığında değişim göstermektedir. Sabliov vd. (2007) ANSYS ile yaptıkları modelleme sonucunda bu değeri 58.400 - 45.400.000 W/m³ olarak hesaplamışlardır. Her iki çalışmada da hacimsel ısı üretim değeri borunun dikey kesit alanında belirlenmiş ve beklenildiği gibi borunun merkezinde en yüksek olduğu görülmüştür. Su için absorbe edilen mikrodalga enerji COMSOL ile % 28, ANSYS ile % 24 olarak hesaplanmıştır. Bu kısımda yapılan çalışma ile hem modelin doğruluğu ile ilgili bilgi edinilmiş, aynı zamanda da iki ayrı sayısal benzetim programı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Salvi vd. (2010) yaptıkları çalışmada ANSYS ile COMSOL programını

karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada 4,5 kW gücündeki mikrodalga sistemde suyun mikrodalga enerjii absorbe etme miktarını ANSYS ile % 16,2 ve COMSOL ile % 18,3 olarak hesaplamışlardır. Yaptıkları karşılaştırmada en yüksek sıcaklık değerlerinde farklılık olduğu görülmüştür. COMSOL ve ANSYS programlarının birbiriyle benzer sonuçlar verdiğini rapor etmişlerdir.

4.3.1. Helikal Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Sayısal Benzetimi

4.3.1.1. Sıcaklık dağılımı ve absorbe edilen güç miktarı

Model akışkanların sayısal benzetimi sonucu hesaplanan ve deneysel olarak belirlenen ortalama çıkış, absorbe edilen mikrodalga güç değerleri Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14'de gösterilmiştir. KOH değeri Şekil 3.4'de belirtilen 13 noktada deneysel ve sayısal model sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır. Her üç akışkan için düşük akış hızında gözlenen KOH değerleri daha yüksek, akış hızı arttıkça bu değerin daha az ve oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Üç akışkan örneği için, 2 L/min ve 3 L/min akış hızlarında hesaplanan KOH değerleri sayısal model ile deneysel sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir.

Saf su ile boru çıkışında sayısal olarak hesaplanan ortalama çıkış sıcaklığı ve absorbe olan güç değerlerinin bütün akış hızlarında deneysel değerlerden düşük tahmin edildiği görülmektedir. % 0,5 CMC çözeltisi ile üç akış hızında da ortalama çıkış sıcaklığı değerinin deneysel değerlerde daha yüksek olduğu görülse de 2 L/min ve 3 L/min akış hızlarındaki farkın çok düşük olduğu görülmektedir. % 1 CMC çözeltisi ile 1 L/min akış hızında hesaplanan değerin deneysel sonuçtan daha yüksek ve diğer hızlarda daha düşük olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlarda da görüldüğü gibi absorbe edilen güç değeri arttıkça ortalama çıkış sıcaklık değerleri artış göstermektedir.

Deneysel olarak belirlenen absorbe edilen güç değerleri ile sayısal benzetim sonuçları arasındaki fark 1 L/min, 2 L/min, 3 L/min akış hızlarında saf su için (Çizelge 4.12) hesaplanan değerlerin daha düşük; % 0,5 CMC (Çizelge 4.13) ve % 1 CMC (Çizelge 4.14) çözeltileri ile ise 1 L/min akış hızında daha düşük, 2 L/min ve 3L/min akış hızlarında daha yüksek değerler elde edildiği görülmektedir.

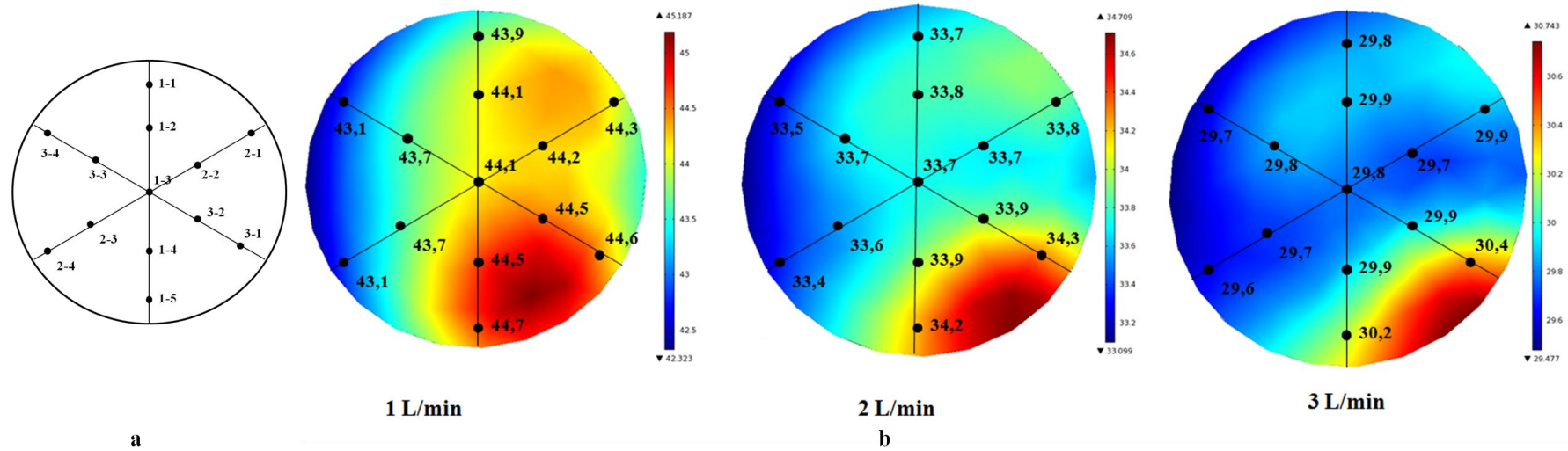
Çizelge 4.12. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde saf suyun sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

SAF SU	KOH (°C)*	T _{ort,deneysel} (°C)	T _{ort,model} (°C)	ΔT (°C)**	Q _{abs,deneysel} (W)	Q _{abs,model} (W)	Δq (W)***
1 L/min	9,09	52,3	44,0	8,3	2199,2	1435,9	797,9
2 L/min	3,91	37,0	33,8	3,2	2206,2	1520,4	685,8
3 L/min	2,67	31,8	29,9	1,9	2233,8	1560,2	639,0

* 13 noktadaki sıcaklık değerleri ile Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

** ΔT= T_{ort,deneysel} - T_{ort,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

*** Δq= Q_{abs,deneysel} - Q_{abs,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. a) Isıl çift konumları b) Saf suyun helikal boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları

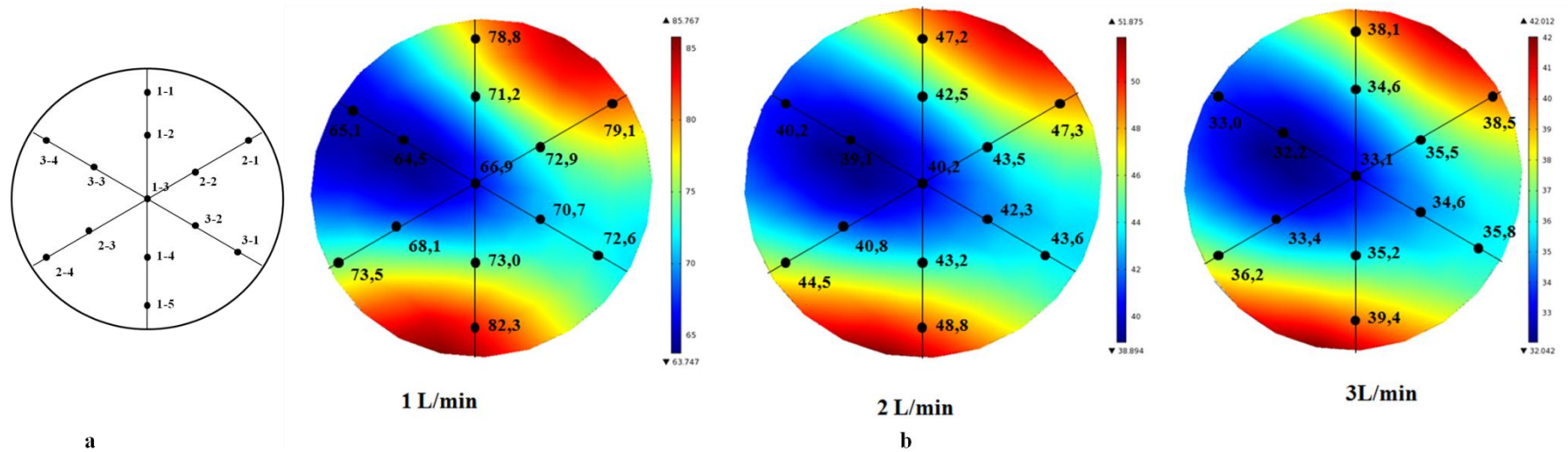
Çizelge 4.13. Helikal konfigürasyonlu sistemde % 0,5 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

%0,5 CMC	KOH (°C)*	T _{ort,deneysel} (°C)	T _{ort,model} (°C)	ΔT (°C)**	Q _{abs,deneysel} (W)	Q _{abs,model} (W)	Δq (W)***
1 L/min	13,75	61,4	72,2	-10,8	2824,5	3199,6	-375,1
2 L/min	3,19	42,4	43,3	-0,9	3149,1	2873,4	275,7
3 L/min	2,16	34,6	35,3	-0,7	3004,1	2820,4	183,7

* 13 noktadaki sıcaklık değerleri ile Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

** ΔT= T_{ort,deneysel} - T_{ort,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

*** Δq= q_{abs,deneysel} - q_{abs,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.10. a) Isıl çift konumları b) % 0,5 CMC çözeltisinin helikal boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları

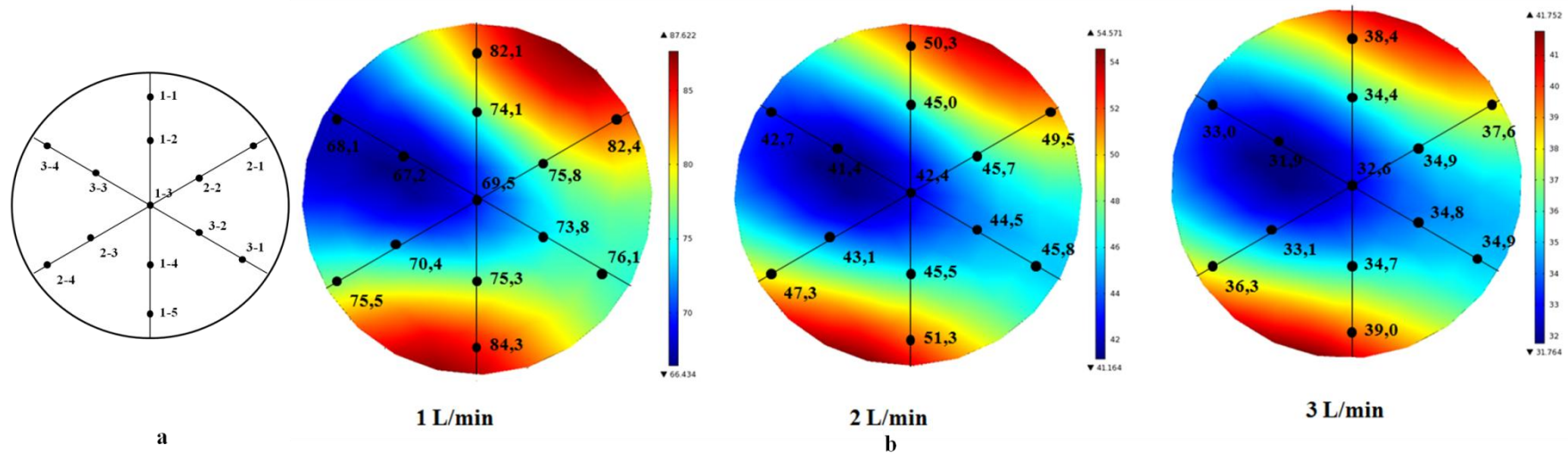
Çizelge 4.14. Helikal konfigürasyonlu sistemde % 1 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

%1 CMC	KOH (°C)*	T _{ort,deneysel} (°C)	T _{ort,model} (°C)	ΔT (°C)**	Q _{abs,deneysel} (W)	Q _{abs,model} (W)	Δq (W)***
1 L/min	12,53	65,3	75,0	-9,7	3065,8	3349,8	-284,0
2 L/min	3,47	47,3	45,7	1,6	3618,2	3028,6	589,6
3 L/min	3,48	37,4	35,1	2,3	3811,6	2954,0	857,6

* 13 noktadaki sıcaklık değerleri ile Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

** ΔT= T_{ort,deneysel} - T_{ort,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

*** Δq= q_{abs,deneysel} - q_{abs,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

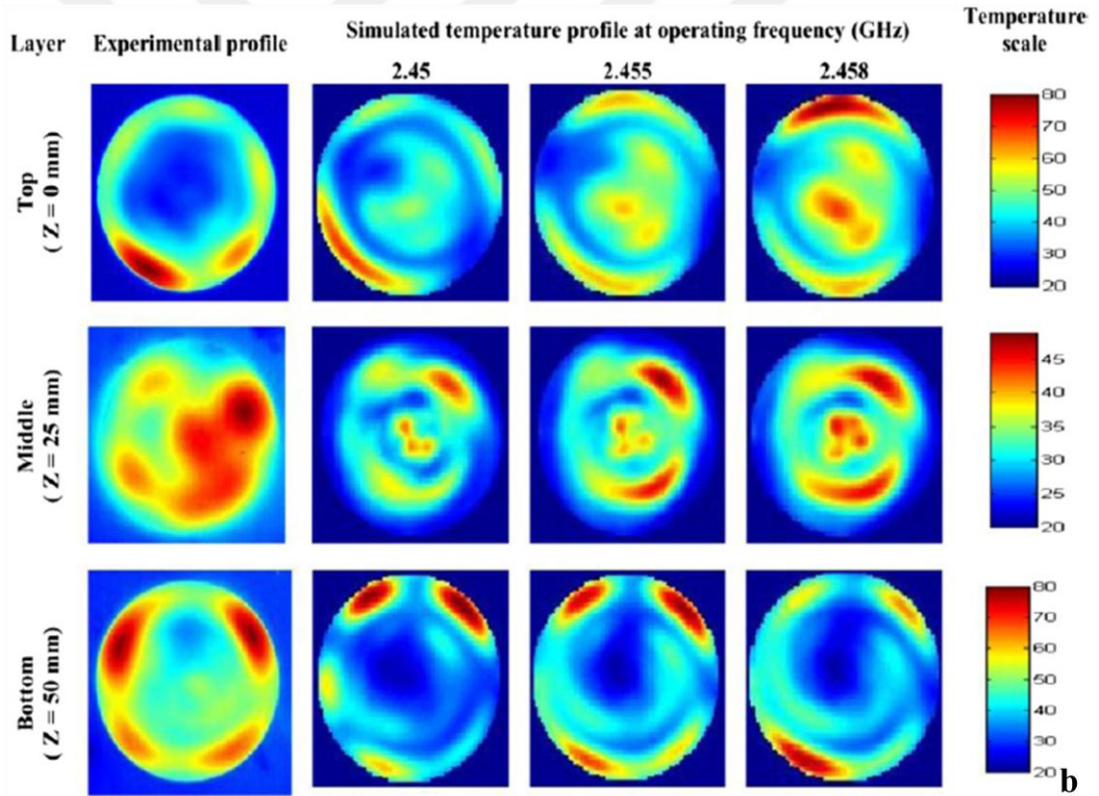
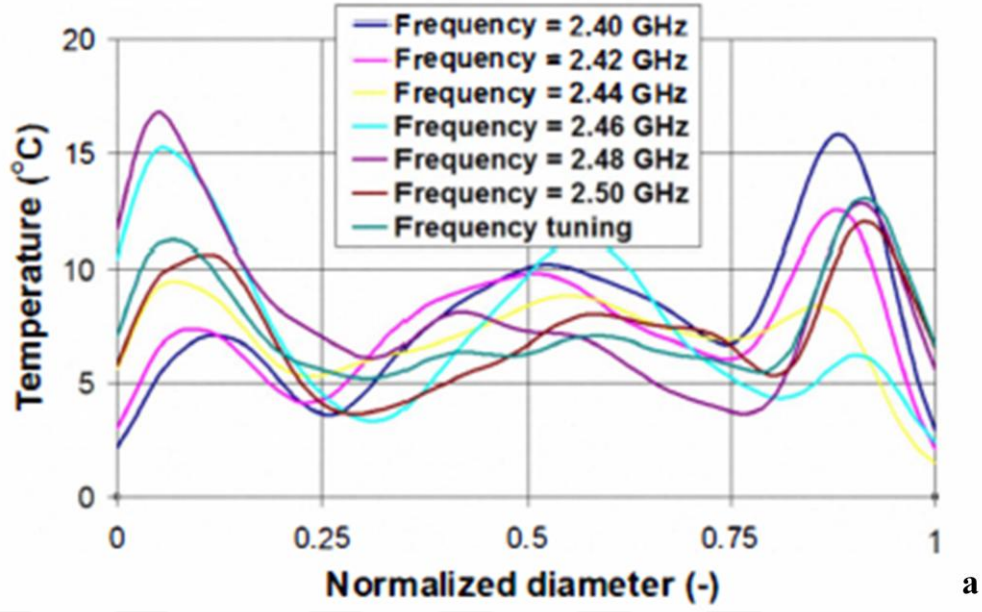


Şekil 4.11. a) Isıl çift konumları b) % 1 CMC çözeltisinin helikal boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları

Deneysel olarak sıcaklık ölçümü gerçekleştirilen 13 noktanın sayısal modeldeki değerleri model akışkanlar için farklı akış hızlarında değerlendirilmiştir (Şekil 4.9, 4.10, 4.11). Saf su ile elde edilen en yüksek sıcaklık farkı 1 L/min hız için 1,60°C (44,66 - 43,06°C), 2 L/min hız için 0,94°C (34,33 - 33,39°C) ve 3 L/min hız için 0,72°C (30,36 - 29,64°C)'dir. En yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri 1 L/min akış hızında 1-5 ve 2-4 noktalarında, 2 L/min ve 3 L/min akış hızlarında 3-1 ve 2-4 noktalarında elde edilmiştir (Şekil 4.9). Bu noktalar boru alt duvarına yakın kısımlarda yer almaktadır. % 0,5 CMC çözeltisi ile elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 17,86°C (82,32 - 64,46°C), 2 L/min hız için 9,69°C (48,81 - 39,12°C) ve 3 L/min hız için 7,22°C (39,43 - 32,21°C)'dir (Şekil 4.10). % 1 CMC çözeltisi ile elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 17,18°C (84,33 - 67,15°C), 2 L/min hız için 9,92°C (51,29 - 41,37°C) ve 3 L/min hız için 7,05°C (38,96 - 31,91°C)'dir (Şekil 4.11). % 0,5 ve % 1 CMC çözeltileri için bütün akış hızlarında en yüksek sıcaklık değeri 1-5, en düşük sıcaklık değeri 3-3 noktasında bulunmuştur. Deneysel olarak en yüksek sıcaklık değerleri bütün akış hızlarında ve akışkan örnekleri için 1-1 noktasında elde edilmiş, en düşük sıcaklık değerlerinin akışkana ve akış hızına göre değiştiği gözlenmiştir. Sayısal benzetim sonucunda % 0,5 ve % 1 CMC çözeltilerinde en yüksek sıcaklık değerleri 1-5 noktasında elde edilse de, 1-1 ve 1-5 noktaları arasındaki sıcaklık değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık dağılımları borunun alt ve üst yüzeyine yakın bölgelerde benzer düzeyde ısınma gerçekleştiğini göstermektedir. Saf suda ise en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri arasındaki fark deneysel değerlere göre çok düşüktür. En yüksek sıcaklık değerleri 1-5 ve 3-1 noktalarında hesaplanmış ve diğer noktalarla çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

Sayısal model (Şekil 4.9, 4.10, 4.11) ve deneysel sıcaklık dağılımları (Şekil 4.2) karşılaştırıldığında sıcak ve soğuk noktaların farklılık gösterdiği dikkat çekmektedir. Mikrodalga sistemin tek bir frekansta çalışmasının kabul edilmesi sıcaklık profillerinde görülen bu farklılıkların nedeni olarak gösterilebilir. Gerçekte magnetron frekansları belirli değerler arasında (915 ± 13 MHz ve 2450 ± 50 MHz aralıklarında) salınım göstermektedirler [Soltysiak vd. 2010, Santos vd. 2011, Pitchai et. al. 2012; Resurreccion vd. 2015]. Soltysiak vd. (2010), sabit frekansta yapılan sayısal benzetim çalışmalarının gerçek mikrodalga ısıtma sonuçlarını

yansıtılabileceğini rapor etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada magnetron frekansındaki değişimin son sıcaklık değerleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Frekansın 2,4 -2,5 GHz aralığında değişimi ile yaklaşık 10°C sıcaklık değişimine ve sıcak soğuk noktalar arasında 18°C civarında farklılığa neden olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 4.12-a). Pitchai vd. (2012) yaptıkları çalışmada silindirik şeklindeki materyali (gellan gel) mikrodalga fırın içerisinde 700 W güçte 30 s süre ile ısıtılmasını sayısal olarak modellemişlerdir. İşlem sonrasında materyalin üst, orta ve alt kısımlarının sıcaklıklarının termal kamera ile ölçmüşlerdir. Deneysel çalışma ve sayısal benzetim sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 4.12-b'de gösterilmektedir. Sıcaklık dağılımına frekansın etkisini belirlemek amacıyla 3 farklı frekans değerindeki sıcaklık profilleri gösterilmiş ve frekanstaki küçük bir değişimin sıcaklık profilini önemli düzeyde etkilediğini rapor etmişlerdir. Şekil 4.12-b'deki deneysel ve sayısal modele ait sıcaklık dağılımlarındaki sıcak ve soğuk bölgelerinin bu çalışmadaki gibi farklılık gösterdiği görülmektedir.

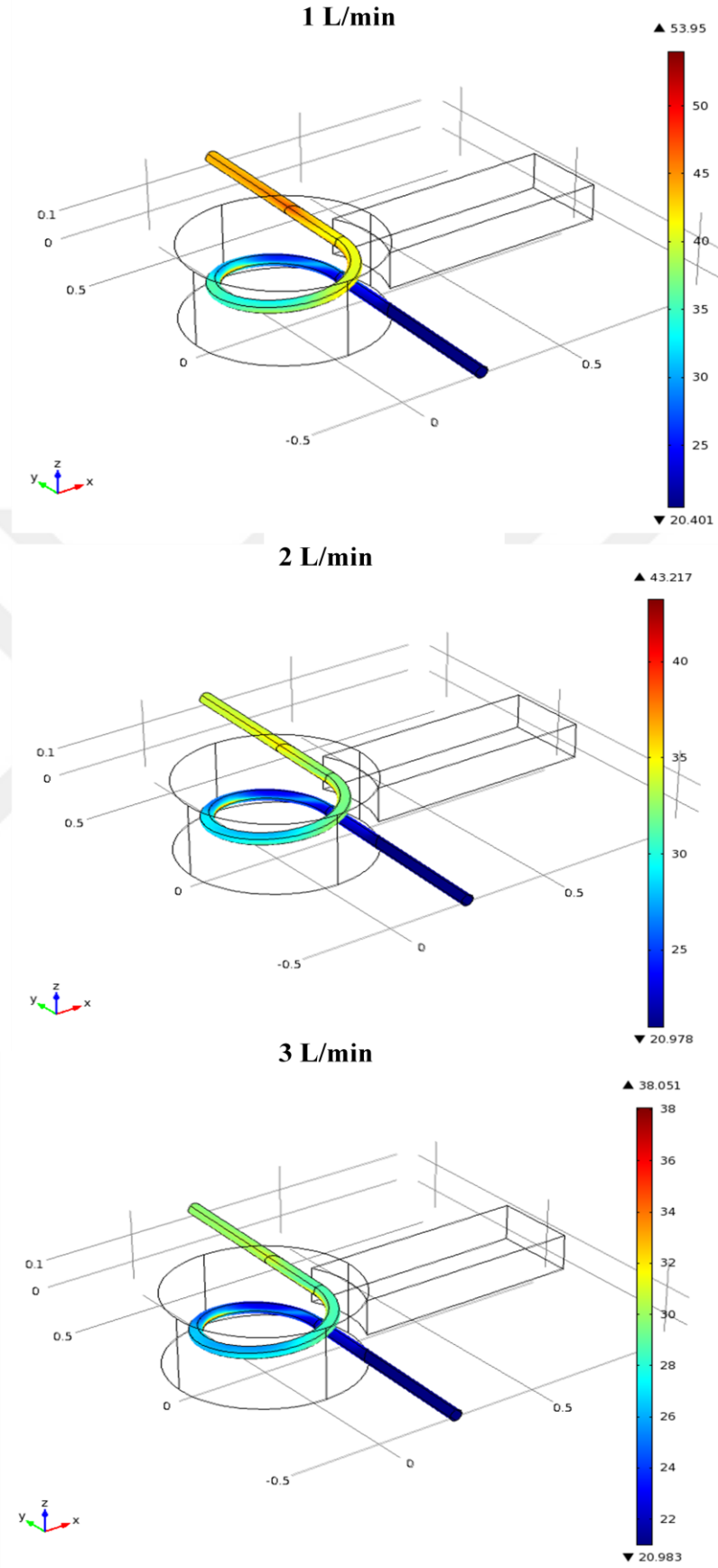


Şekil 4.12. Literatürde frekans değişiminin sıcaklık değişimine etkisini gösteren çalışmalar a) Soltysiak vd., (2010) b) Pitchai vd., (2012).

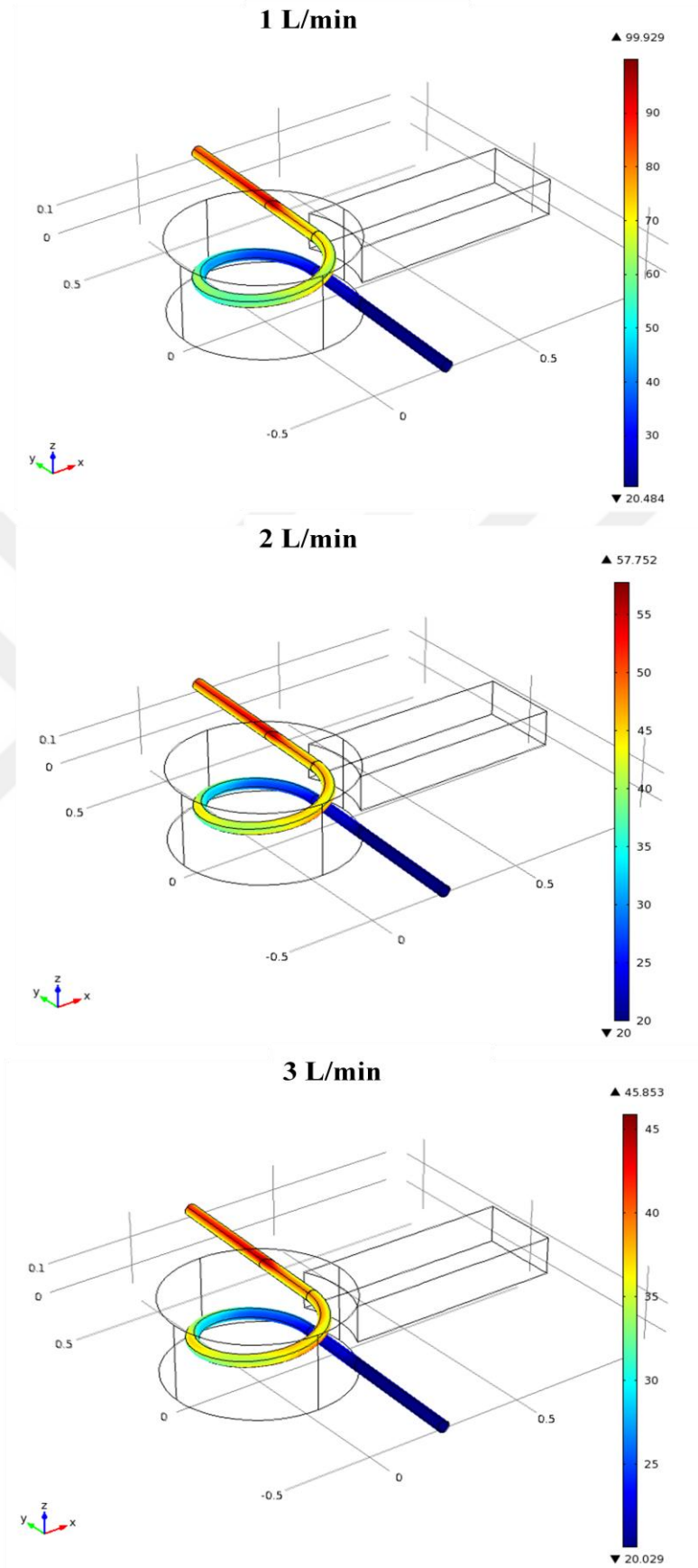
Akış hızının 1 L/min olduğu durumda model akışkanların KOH değerinin diğer iki hıza göre yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Helikal boruda yatışkın duruma gelme süresi en uzun 1 L/min akış hızında, yaklaşık 10 dakikadır; akış hızı

arttıkça bu süre 5 dk veya daha az olmaktadır. Bu sistemde su soğutmalı magnetron kullanılmış ve helikal konfigürasyonlu sistemde soğutma suyunun çok ısındığı fark edilmiştir. Magnetron ortamının sıcaklığında meydana gelen değişim frekansta ve sıcaklık dağılımında değişime neden olabilir [Metaxas ve Meredith, 1993]. Düşük akış hızında yatışkın duruma uzun sürede gelmesi magnetron sıcaklığında daha fazla artışa dolayısıyla kaviteye ulaşan güç ve frekans değerlerinde diğer hızlara göre daha fazla değişime neden olmuş olabilir. Düşük akış hızında KOH değerinin yüksek olması Cuccurollo vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir. Bu çalışmada mikrodalga kavite içerisinde belli bir hızda akan suyun ısıtılması (2 kW güç ve 2,4 GHz frekansa sahip sistemde) sırasında sıcaklık değerleri infrared kamera ile görüntülenmiş ve sistemin sayısal modeli COMSOL sayısal benzetim programı ile oluşturulmuştur. Sayısal benzetim bu tez kapsamında gerçekleştirildiği gibi elektromanyetik alan, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği eşitlikleri bir arada kullanılarak çözülmüştür. Çalışmanın sonucunda akış hızı artışının modelin güvenilirliğini artırdığını rapor etmişler ve bunun nedenini çözüm yönteminde olabilecek değişikliklere bağlamışlardır.

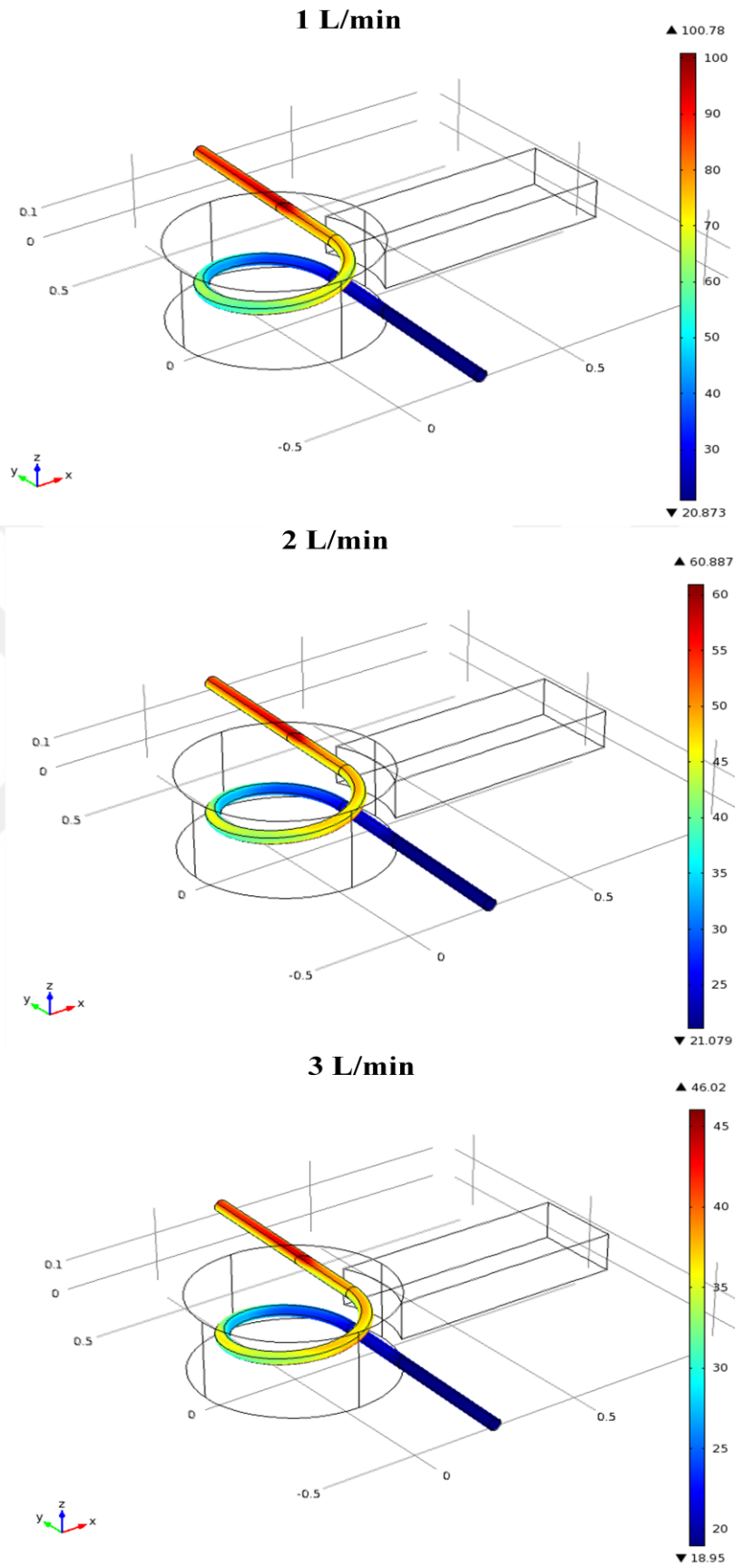
Saf su, % 0,5 ve % 1 CMC çözeltisinin helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'de gösterilmektedir



Şekil 4.13. Saf suyun helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim

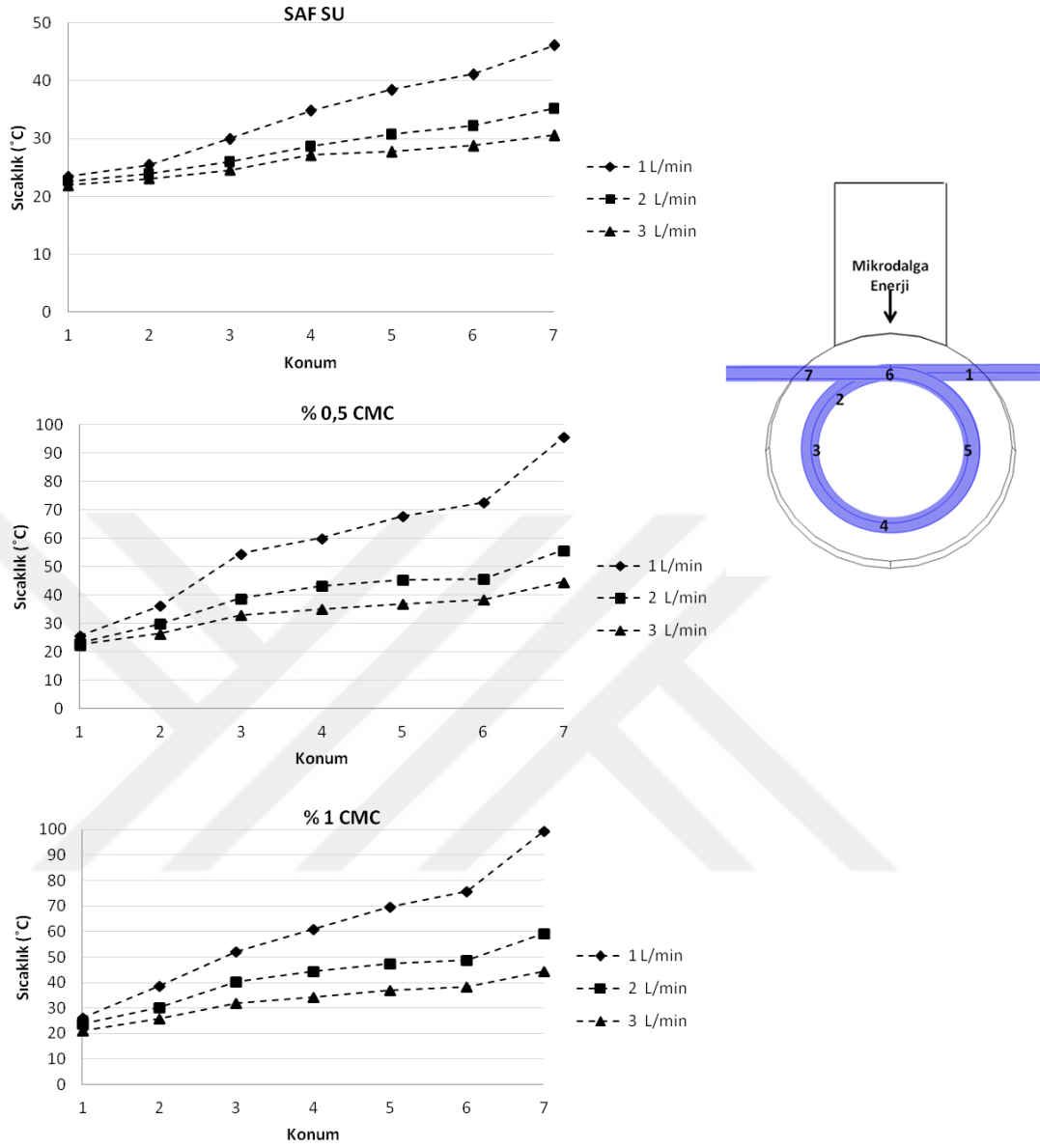


Şekil 4.14. % 0,5 CMC çözeltisinin helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim



Şekil 4.15. % 1 CMC çözeltisinin helikal boru boyunca yüzey sıcaklığındaki değişim

Helikal boru boyunca model akışkanların ulaştığı en yüksek sıcaklık değeri akış hızı arttıkça azalmakta ve en yüksek sıcaklık değeri 1 L/min akış hızında gözlemlenmektedir. Akışkanların kaviteyi terkettiği noktada sıcaklığın boru üst yüzeyinde en yüksek değeri aldığı görülmüştür. Şekil 4.16'da gösterilen boru yüzeyi boyunca 7 noktada hesaplanan sıcaklık değerleri kavite çıkışına yakın bölgede sıcaklıkta ani yükselmeyi göstermektedir. Akış hızı 1 L/min olduğunda bu artış daha keskin gözlemlenmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.16 karşılaştırıldığında, her ikisinde de sıcaklığın 6 ve 7 noktaları arasında daha fazla yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu bölgede görülen sıcaklık artışı Bölüm 4.2.1'de değerlendirildiği gibi, kavitenin üst kısmından olan elektromanyetik yansımanın doğrudan bu bölgeye gelmesi ve bu noktanın daha çok ısınmasına neden olması olarak düşünülmektedir. Sadece boru üst yüzey sıcaklıkları karşılaştırıldığında deneysel ve sayısal sonuçların tutarlı olduğu söylenebilirse de Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de görüldüğü gibi boru alt yüzeyinde de sıcaklık artışı olmaktadır.



Şekil 4.16. Helikal boru uzunluğu boyunca 7 noktada sayısal benzetim sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

4.3.1.2. Hız profilleri

Hız değerlerinin teorik doğrulaması

Akışkanlar mekaniği denklemlerinin çözümünün doğruluğunu test etmek için basit bir geometride akış modellenmiş ve sonuçlar teorik olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 38 mm iç çapa, 360 mm kavis çapına ve 0,124 m eksensel aralığa sahip helikal boru modellenmiştir. Helikal boruda akışkanlar mekaniği sayısal çözüm sonuçlarını teorik olarak doğrulamak için Palazoğlu ve Sandeep (2002)' in yaptıkları çalışmadaki eşitliklerden (Eşitlik 4.1 ve 4.2) yararlanılmıştır. Bu eşitlikler $0,077 \leq d/D \leq 0,143$ ve $158 \leq Re \leq 759$ aralıklarında geçerlidir. Bu nedenle 0,008 m/s çizgisel akış hızındaki, yoğunluğu 1000 kg/m^3 ve viskozitesi 0,001 Pa.s ($d/D=0,105$; $Re=304$) olan tez kapsamında kullanılan boyutlardaki helikal boruda sayısal benzetimi yapılmıştır. Maksimum hızı belirlemek için Eşitlik 4.3 ($26 \leq Dn \leq 108$, $Dn=98,5$) kullanılmıştır.

$$f_c = 22,95 \left(\frac{d}{D}\right)^{0,230} Re^{-0,619} \quad (4.1)$$

$$\frac{\Delta P}{l} = f_c \frac{\rho u_{ort}^2}{2d} \quad (4.2)$$

$$\frac{u_{max}}{u_{ort}} = 2,92 Dn^{-0,122} \quad (4.3)$$

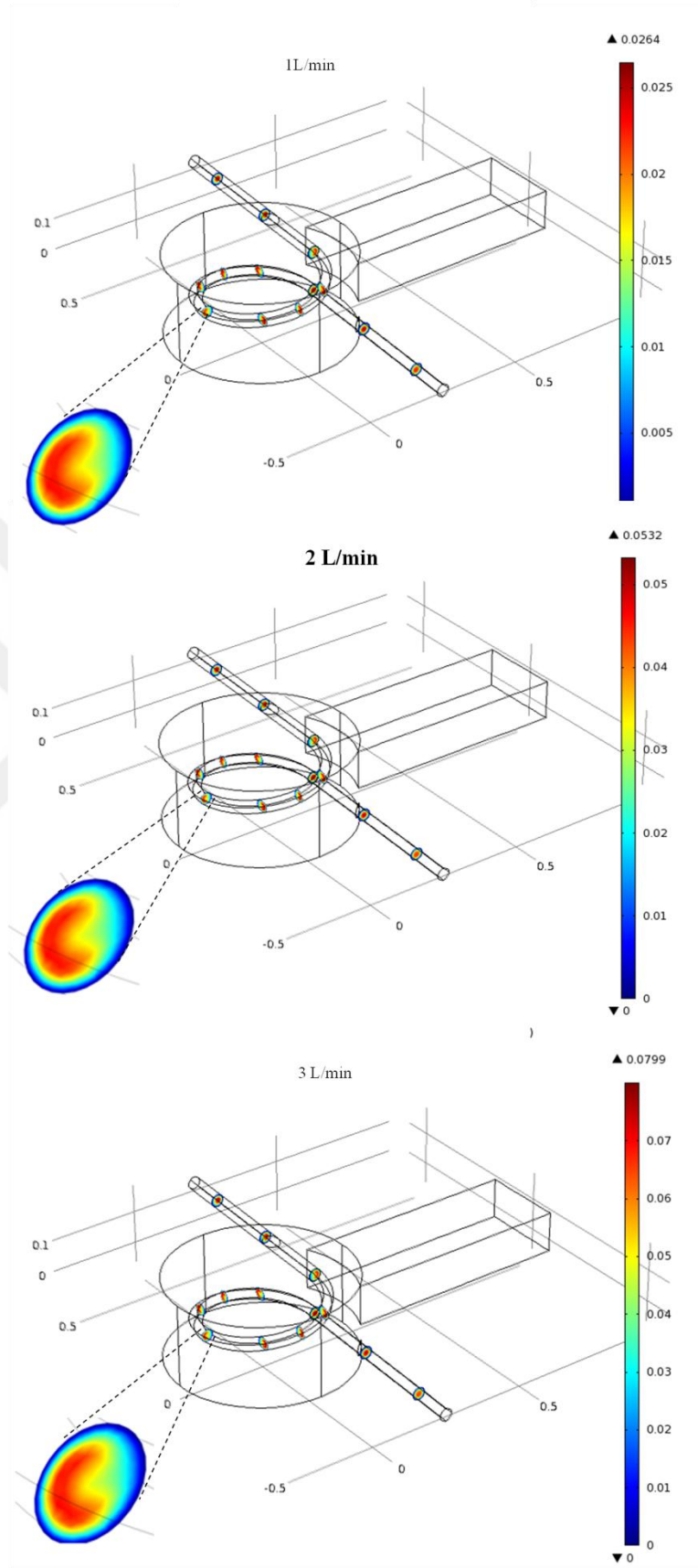
Bu eşitliklerde; f_c , sürtünme faktörü, $\frac{\Delta P}{l}$, birim uzunlukta meydana gelen basınç kaybını (Pa/m), d, borunun iç çapını (m), D, helikal borunun kavis çapını (m) göstermektedir. Yapılan teorik ve sayısal model hesaplamaları sonucunda hesaplanan değerler arasındaki farkın çok düşük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.15). Bu sonuçlar doğrultusunda Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için, kullanılan sayısal ağ boyutu ve yapısının uygun olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.15. Helikal boruda akış için hesaplanan teorik ve sayısal model sonuçları

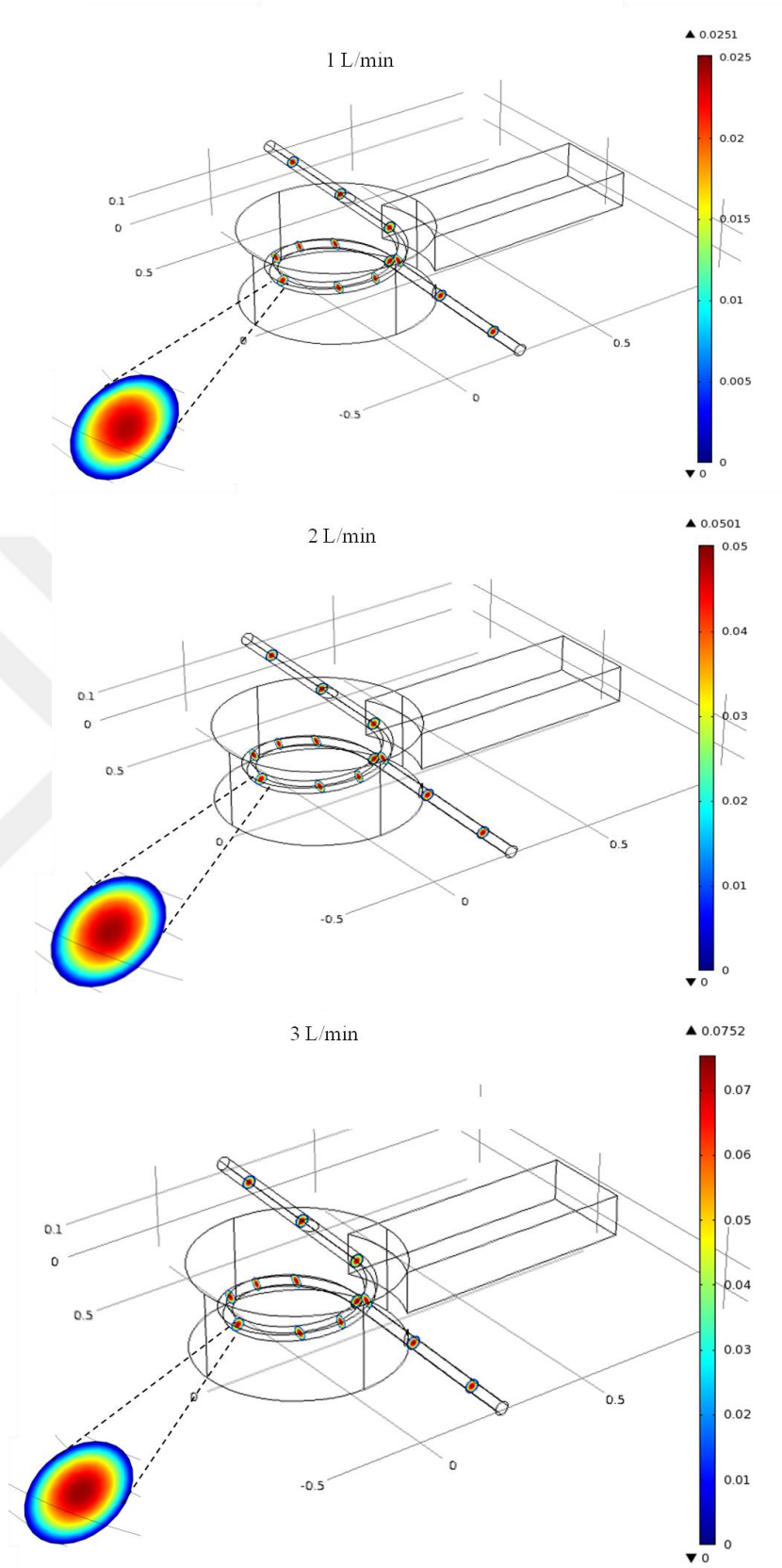
	Teorik	Cmsol	% fark
u_{\max} (m/s)	0,0133	0,0135	-1,5
ΔP (Pa)	0,377	0,368	2,4

Sayısal benzetim sonuçları

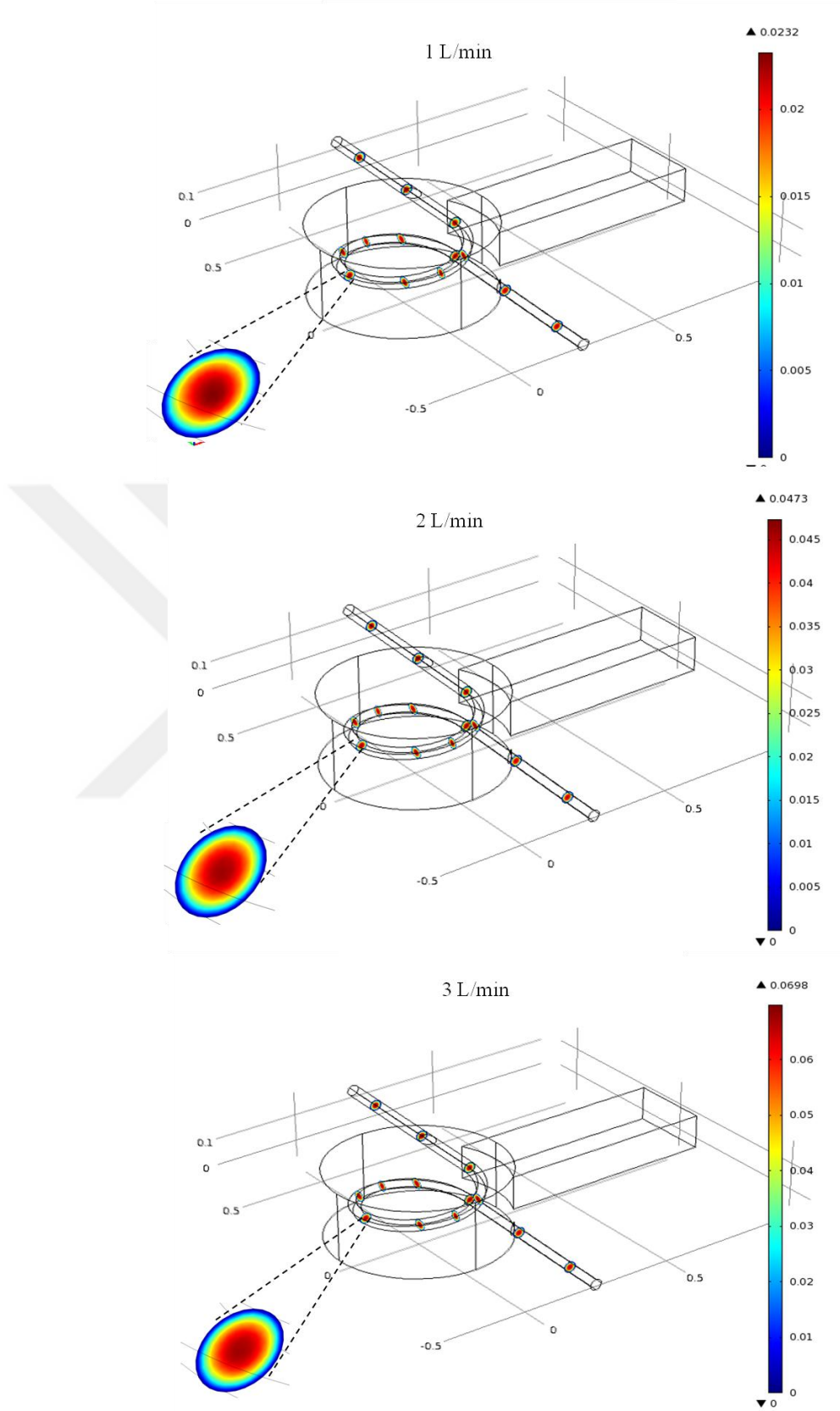
Akışkan örneklerine ait hız profilleri Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19' da görüldüğü gibidir. Saf suyun akışı sırasında maksimum hız bölgesinin dışa doğru savrulduğu görülmektedir. CMC çözeltilerinde ise en yüksek hızın borunun merkezinde olduğu parabolik akış profilinde değişiklik olmadığı gözlemlenmektedir. Saf suyun Reynolds ve Dean sayılarının yüksek olması ikincil akış etkisi ile maksimum hız bölgesinin dışa doğru savrulmasına neden olmuştur. CMC çözeltilerinde Dean sayılarının çok düşük ($De < 1,3$) olması Bölüm 4.2.1'de değerlendirildiği gibi hız profilinin düz borudan farklı olmamasına neden olmaktadır.



Şekil 4.17. Helikal boruda saf suyun farklı akış hızlarındaki akış profilleri



Şekil 4.18. Helikal boruda % 0,5 CMC çözeltisinin farklı akış hızlarındaki akış profilleri



Şekil 4.19. Helikal boruda % 1 CMC çözeltisinin farklı akış hızlarındaki akış profilleri

Çizelge 4.16'da model akışkanların helikal boruda sayısal benzetim sonucunda elde edilen basınç kaybı ve boru çıkışında hesaplanan maksimum hız değerleri görülmektedir. Düz boruda tam gelişmiş akış koşullarında en yüksek hız değeri Newtonumsu akışkanlar için $u_{max} = 2u_{ort}$ Newtonumsu olmayan akışkanlar için $u_{max} = \frac{3n+1}{n+1}u_{ort}$ eşitlikleriyle hesaplanmaktadır. Bütün akışkanlarda helikal boruda akış yönündeki hız dağılımının farklılaşması ve düzleşmesi nedeni ile alıkonma süresi dağılımı (u_{max}/u_{ort}) düz borudan farklı olmaktadır. Sayısal benzetim sonuçları ile hesaplanan alıkonma süresi dağılımları saf su için 1,8; % 0,5 CMC çözeltisi için 1,7 ve % 1 CMC çözeltisi için 1,6 olarak hesaplanmıştır. Model akışkanların düz boruda akması durumunda teorik alıkonma süresi dağılımı, Newtonumsu akışkan olan su için 2, Newtonumsu olmayan % 0,5 ve % 1 CMC çözeltileri için 1,88 ve 1,62'dir. Teorik alıkonma süresi dağılımı ile model sonuçları karşılaştırıldığında ikincil akış etkisi ile alıkonma süresi dağılımının azaldığı görülmektedir. Helikal konfigürasyonlu borunun % 1 CMC çözeltisinin akışı sırasında düz borudan farklı akış profili oluşturmadığı ve istenilen karışma etkisinin görülmediği söylenebilir. Saf su ile kuvvetli ikincil akış etkisinin oluşması ve bu nedenle karıştırma etkisinin yüksek olması, deneysel ve sayısal benzetim sonuçlarında en homojen sıcaklık dağılımının görülmesine neden olmuştur.

Çizelge 4.16. Helikal boruda sayısal benzetim ile elde edilen ΔP ve u_{max} değerleri

Akış hızı (L/min)	u_{ort} (m/s)	Saf Su		% 0,5 CMC		% 1 CMC	
		ΔP (Pa)	u_{max} (m/s)	ΔP (Pa)	u_{max} (m/s)	ΔP (Pa)	u_{max} (m/s)
1	0,0147	1,5	0,0264	192,4	0,0251	1131,1	0,0232
2	0,0294	5,6	0,0532	467,4	0,0501	2339,6	0,0473
3	0,0441	12,1	0,0799	727,5	0,0752	3405,4	0,0698

Model akışkanların viskozitesindeki ve ortalama çizgisel hızındaki artışın basınç kaybını artırdığı görülmektedir. Akışkanların pompalanması sırasında viskozite artışı sürtünme kayıplarının artışı nedeni ile daha yüksek basınç kaybına neden olmaktadır. Basınç kaybı, akışı sürdürebilmek için gerekli pompa gücü ile doğrudan ilişkilidir. Farklı viskozitelerdeki akışkanların aynı hacimsel akış hızında akması için uygulanması gereken pompa gücü farklılık göstermektedir. Ortalama

akış hızındaki artış sürtünme faktöründe artışa neden olduğu için daha fazla basınç kaybı meydana gelmektedir [Çengel ve Cimbala,2008; Palazoğlu ve Sandeep, 2001].

Basınç kaybı, istenilen akış hızında akışkanın akışını sağlamak için gerekli pompa gücünü belirlemek açısından önemlidir. Pompalama için en yüksek enerji sarfiyatı, basınç kaybının en yüksek olduğu % 1 CMC çözeltisinde ve en düşük saf suda olmuştur. Nigam vd. (1999) yaptıkları çalışmada Newtonumsu olmayan akışkanlar için helikal borularda sürtünme faktörünün Dean sayısı ve akış davranış katsayısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Dean sayısının artışı sürtünme faktöründe artışa neden olurken, n değerindeki artış sürtünme faktöründe azalmaya neden olmaktadır. Bu çalışmadaki bilgiler doğrultusunda % 1 CMC çözeltisinin akış davranış indeksinin ($n = 0,449$) % 0,5 CMC çözeltisinin akış davranış indeksinden ($n = 0,791$) düşük olması sürtünme faktöründe artışa ve daha fazla basınç kaybına neden olmuş olabilir. Akış hızının artması Dean sayısında artmasına ve dolayısıyla sürtünme faktöründe ve basınç kaybında artışa neden olmuştur. Düşük Reynolds sayılarında merkezkaç kuvvetleri ihmal edilebilir düzeydedir ve sürtünme kaybı viskoz kuvvetlerin etkisiyle gerçekleşmektedir [Palazoğlu, 2001]. White (1929), yaptığı çalışmada Dean sayısının 11,6'dan daha düşük olduğu durumda akışa karşı gösterilen direncin düz borudakinden farklı olmadığını belirtmiştir. CMC çözeltilerinde tez kapsamında kullanılan helikal boruda basınç kaybının merkezkaç kuvvetinden daha çok geometriden kaynaklandığı söylenebilir.

4.3.1.3. Elektromanyetik alan dağılımı çözümü

Mikrodalga sistem içerisinde ve helikal boru yüzeyinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı Şekil 4.20'de gösterilmektedir. Elektromanyetik alan şiddetinin model akışkana göre değiştiği gözlemlenmiştir. Mikrodalga sistem içerisinde elektromanyetik alan şiddeti saf su için 7,0-46.900 V/m, % 0,5 CMC çözeltisi için 5,9-37.629 V/m, % 1 CMC çözeltisi için 7,9-36.523 V/m olarak hesaplanmıştır. Boru yüzeyi boyunca elektromanyetik alan büyüklüğündeki değişim saf su, % 0,5 CMC ve % 1 CMC çözeltisi için sırasıyla 783,3-37.333 V/m, 666,5-28.967 ve 523,9-28.186 V/m değerleri arasında değişmektedir. Boru yüzeyi boyunca model akışkanların hacimsel ısı üretimi değerleri; saf suda 1620,3 -2.130.000 W/m³ ,

% 0,5 CMC çözeltisinde 36.800-3.340.000 W/m³ , % 1 CMC çözeltisinde 23.800-3.670.000 W/m³ değerleri arasındadır. Bu değerler en yüksek ısı üretiminin % 1 CMC çözeltisinde ve en düşük saf suda olduğunu göstermektedir.

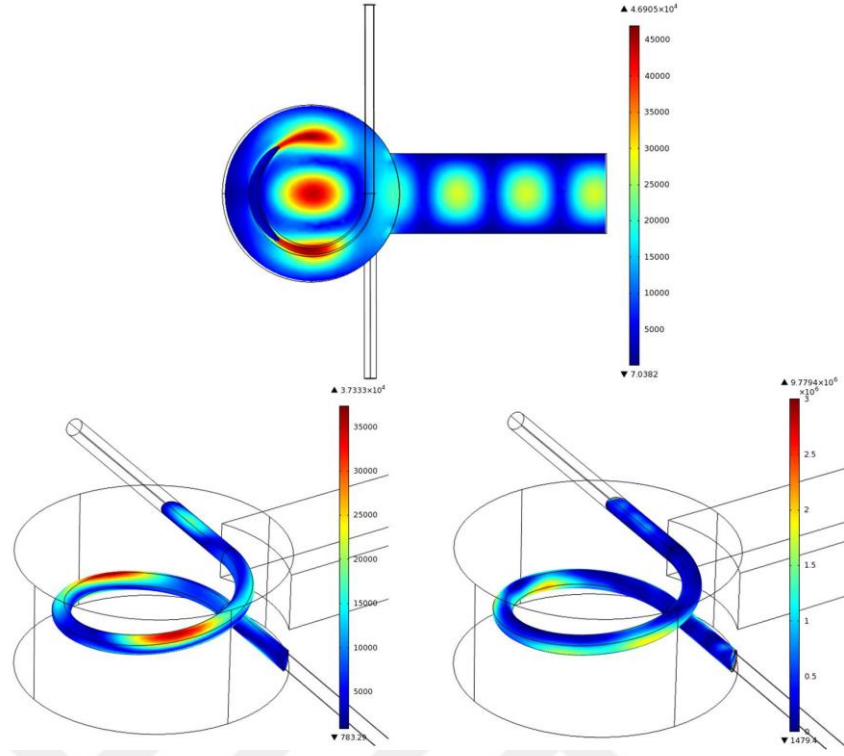
Dielektrik materyal üzerine düzlem dalga etki ettiğinde, mikrodalga enerjinin bir kısmı yansırken bir kısmı da absorbe olur (Şekil 2.4). Kavite içerisinde birçok düzlem dalga materyal üzerine çeşitli yönlerden gelmektedir [Dibben, 2001]. Saf su ve CMC çözeltilerinin dielektrik sabiti değerleri birbirine yakın değerlerdedir ancak tanjant kayıp faktörü değerleri farklılık göstermektedir. Düşük tanjant kayıp faktörü değerine sahip materyaller mikrodalga enerjiyi daha az absorbe etmektedirler. Elektromanyetik ısı üretimi eşitliğinde ($q_{abs} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon' (\tan \delta E^2)$) dielektrik sabiti ve frekans değeri sabit tutulduğunda elektromanyetik ısı üretimi miktarının tanjant kayıp faktörü ile doğru orantılı olarak değiştiği anlaşılmaktadır [Zhu vd. 2007a]. Aynı zamanda tanjant kayıp faktörü ile mikrodalga güç absorpsiyonu arasındaki ilişki yansıma katsayısı (R) (Eşitlik 4.4) ile açıklanabilir.

$$R = \frac{1 - [2\epsilon'(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})]^{0,5} + \epsilon' \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}{1 + [2\epsilon'(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta})]^{0,5} + \epsilon' \sqrt{1 + \tan^2 \delta}} \quad (4.4)$$

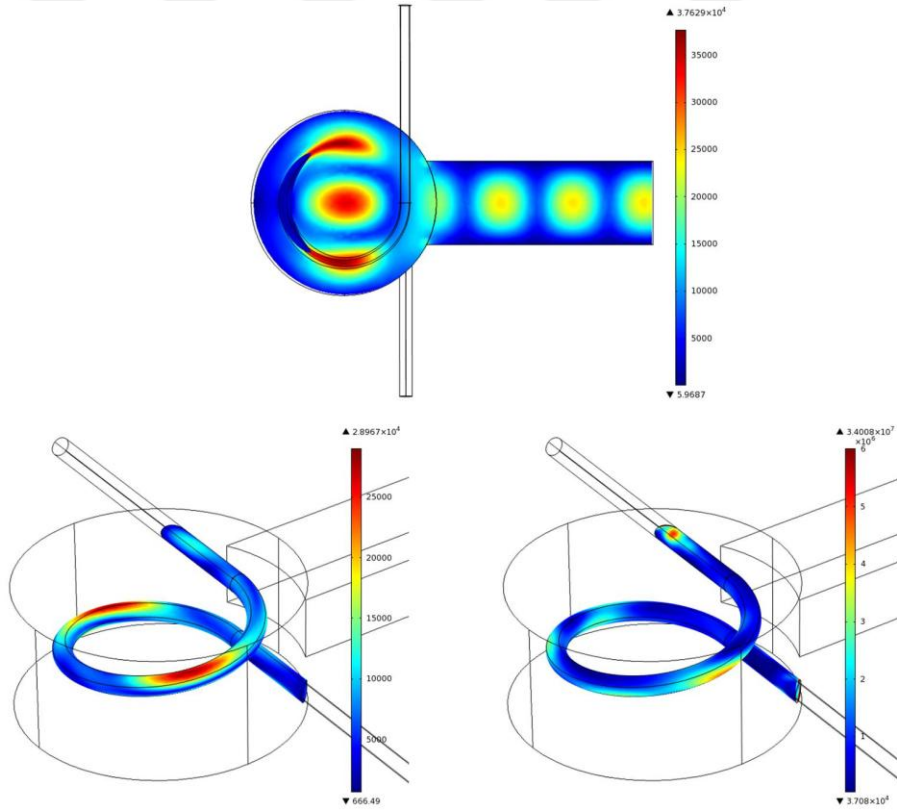
Sabit dielektrik sabiti değerinde, daha yüksek tanjant kayıp faktörü Eşitlik 4.4 ile hesaplanan yansıma katsayısının düşük olmasına neden olmakta ve bu da daha yüksek güç absorpsiyonunun meydana geldiğini göstermektedir [Zhu vd. 2007b]. Elektromanyetik alan şiddeti ve elektromanyetik güç dağılımı birlikte değerlendirildiğinde; absorbe edilen mikrodalga enerjinin artmasının yansımanın azalmasına ve sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan şiddetinin daha düşük olmasına neden olabileceği düşünülmektedir. Saf suyun tanjant kayıp faktörü değeri CMC çözeltilerinden daha düşüktür, bu nedenle saf suyun mikrodalga enerji absorpsiyonu daha düşük ve yansıma katsayısı daha yüksektir. Penetrasyon derinliği de diğer önemli bir faktör olarak değerlendirilirse, saf suyun penetrasyon derinliğinin (Çizelge 4.2) borunun çapından yüksek değerde olması elektromanyetik enerjinin boru içerisinde konsantre olamamasına, CMC çözeltileri içinse boru çapı ile benzer değerlerde olması sonucu saf sudan daha fazla mikrodalga absorpsiyonunun gerçekleşmesine neden olabileceği düşünülmektedir. Bu da CMC çözeltilerinde saf suya göre yansımanın daha az, absorpsiyonun daha yüksek olması anlamına

gelmektedir. Deneysel verilerle hesaplanan absorbe edilen mikrodalga enerji miktarının (Çizelge 4.9) en az saf suda gözlemlenmesi elektrik alan şiddeti ve elektromanyetik güç dağılımı değerleri ile açıklanabilir. En yüksek mikrodalga enerji absorpsiyonu gözlemlenen % 1 CMC çözeltisinde ise mikrodalga sistem içerisinde elektrik alan şiddeti daha düşük ve elektromanyetik güç dağılımı değerleri daha yüksektir. Bu saf suda ısı üretiminin daha az, % 1 CMC çözeltisinde daha fazla olmasının nedeni olarak söylenebilir.

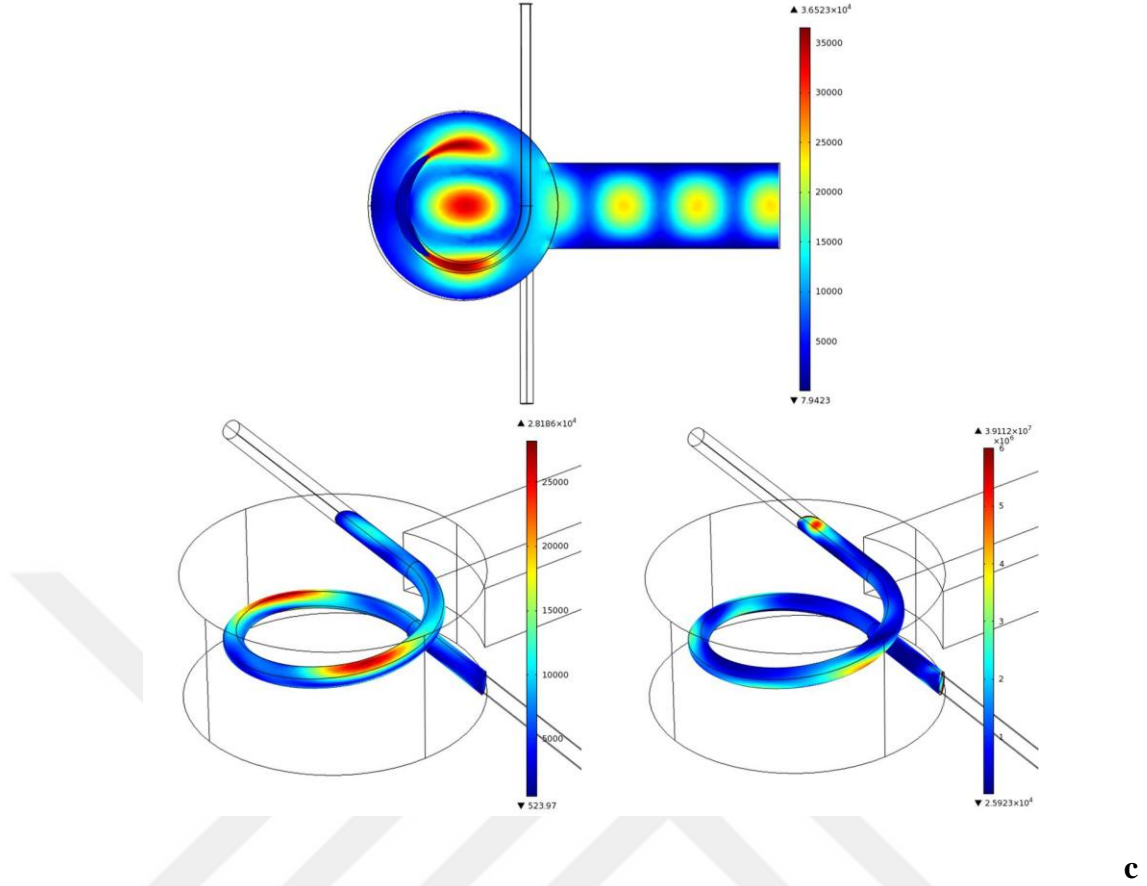




a



b



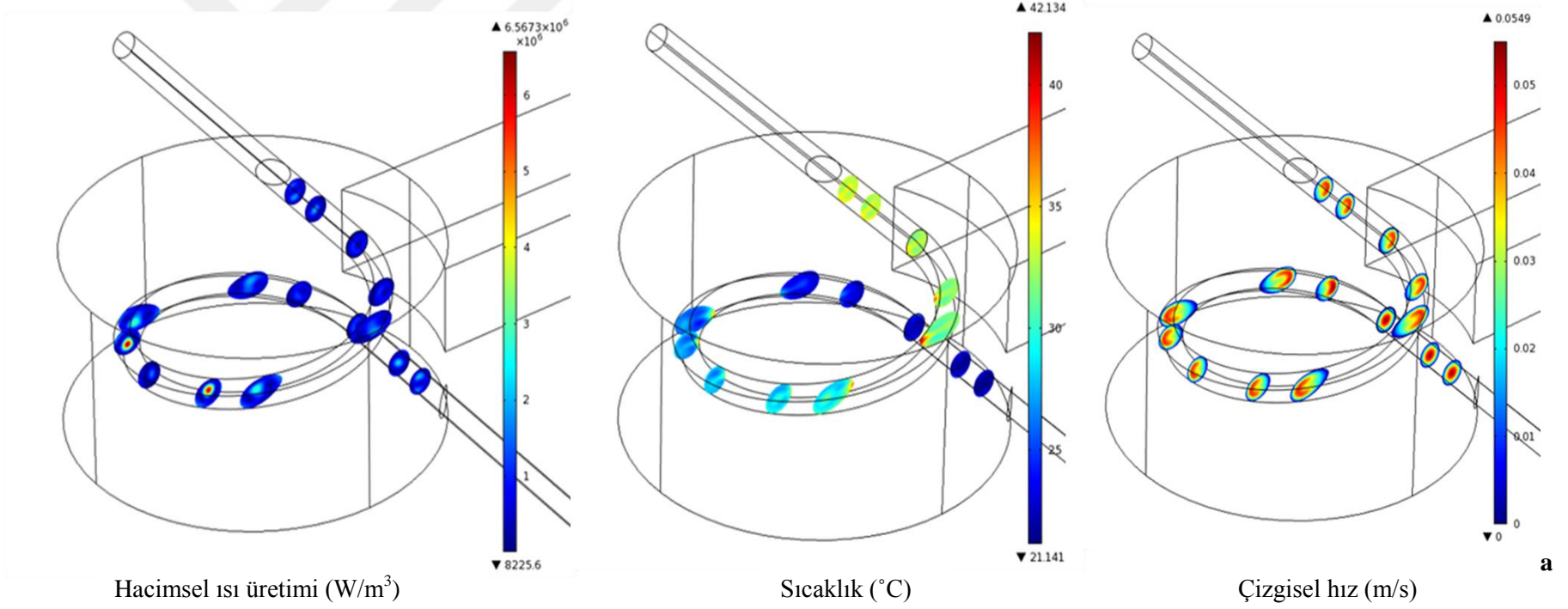
Şekil 4.20. Tüm sistem elektromanyetik alan dağılımı, V/m (üst), helikal boru yüzeyinde elektromanyetik alan dağılımı, V/m (sol alt) ve ısı üretimi, W/m³ (sağ alt) a) Saf su, b) % 0,5 CMC çözeltisi, c) % 1 CMC çözeltisi

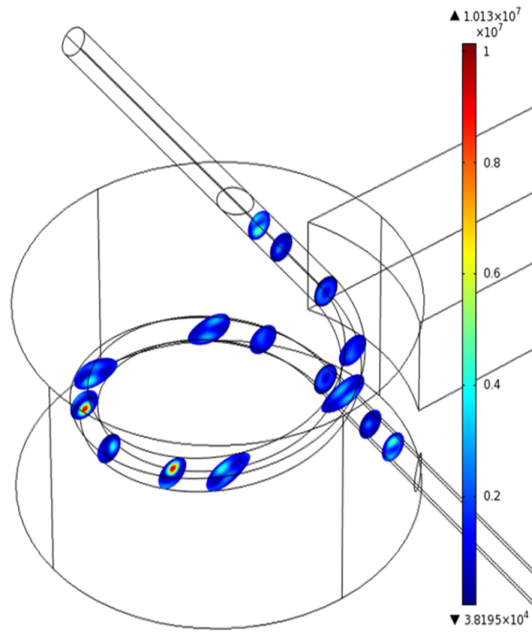
Elektrik alan ve boru yüzeyinde absorbe olan mikrodalga güç değerleri model akışkana göre farklılık gösterirken, akış hızının bu değerler üzerine etkisi gözlenmemiştir. Akış hızının değişmesi ile sıcaklık profillerinin değişimi boru içerisinde meydana gelen ısı üretim miktarlarının farklılaşması ile açıklanabilir. Helikal borunun iç kısmında meydana gelen ısı üretim ve aynı kesitlerdeki sıcaklık-akış hızı profilleri model akışkanlar için 2 L/min akış hızında Şekil 4.21(a,b,c)'de gösterildiği gibidir. Model akışkanların borunun iç kısmında en düşük ve en yüksek ısı üretim değerleri 1, 2, 3 L/min akış hızlarında saf su için 7.511,2 - 6.170.300 W/m³, 8.225,6 - 6.567.300 W/m³, 8.570 - 6.735.500 W/m³; % 0,5 CMC çözeltisi için 39.320 - 10.937.000 W/m³, 38.195 - 10.130.000 W/m³, 36.669 - 9.990.100 W/m³; % 1 CMC çözeltisi için 26.879 - 10.866.000 W/m³, 26.539 - 10.108.000 W/m³, 25.174 - 9.923.200 W/m³'tür. En düşük ortalama çıkış sıcaklığına sahip olan saf suda hesaplanan ısı üretim değerinin en düşük (Çizelge 4.12); en yüksek

ortalama çıkış sıcaklığına sahip olan % 1 CMC çözeltisinde hesaplanan ısı üretim değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 4.14).

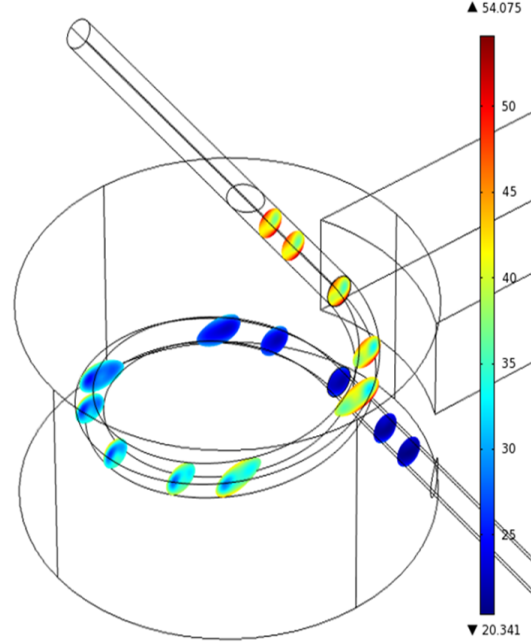
Şekil 4.21'de hacimsel ısı üretimi borunun farklı bölgelerinde farklı değerler almakta ve helikal boru konfigürasyonu nedeni ile farklı noktalarda maksimum değerde olduğu görülmektedir. Saf su ile CMC çözeltilerinin hız profillerinin farklı olması sıcaklık dağılımını farklılaştırmaktadır. Saf suda maksimum hızın görüldüğü bölge helikal boru dış duvarına doğrudur ve maksimum ısı üretim değeri boru boyunca bu bölgede veya tam aksi yönünde oluşmaktadır. Bu farklılığın saf suda ısınmanın daha homojen gerçekleşmesine neden olduğu düşünülmektedir. CMC çözeltilerinde maksimum hız bölgesi borunun merkezinde, en yüksek ısı üretim değeri değişken ve merkezden farklı aynı zamanda daha yavaş hıza sahip bölgelerde olduğu görülmektedir. Isı transferinin baskın olarak konduksiyonla gerçekleşmesi ile birlikte bu durum saf suya göre daha az homojen sıcaklık dağılımına neden olabileceği söylenebilir. Boru çıkışına yakın kesitte görülen yüksek ısı üretim değeri en düşük hıza sahip bu bölgelerde (boru duvarında hız sıfır) sıcaklığın daha çok artışına neden olmuş olabilir.

Helikal boru yüzeyinde absorbe edilen güç miktarları (Şekil 4.20) ve boru içerisinde hacimsel ısı üretim değerinin (Şekil 4.21) akışkanın kaviteden çıktığı (kavitenin üst yüzeyine yakın bölgede) absorbe edilen güç değerinde artış olduğunu göstermektedir. Deneysel ve sayısal benzetimlerde (Şekil 4.4 ve 4.6) borunun üst yüzeyindeki sıcaklığın boru çıkışında artış göstermesi bu noktalarda ısı üretim değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum Bölüm 4.2.1'de bahsedildiği gibi kavitenin üst kısmından olan elektromanyetik yansımanın doğrudan bu bölgeye gelerek daha fazla ısınmaya neden olması olarak açıklanabilir.

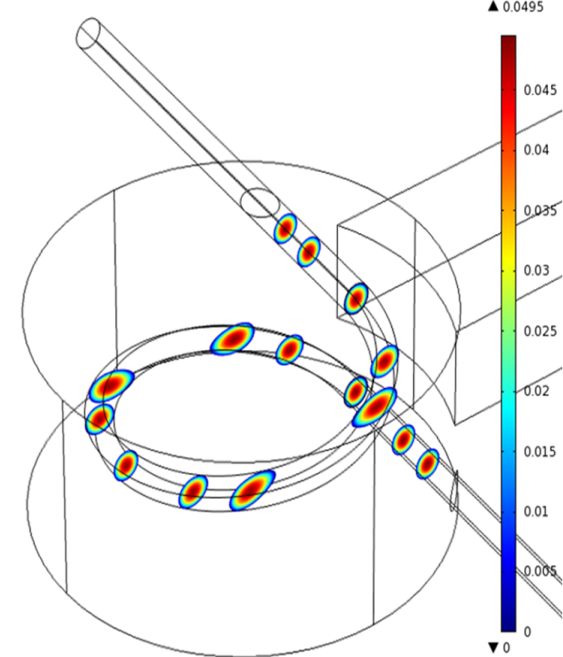




Hacimsel ısı üretimi (W/m^3)

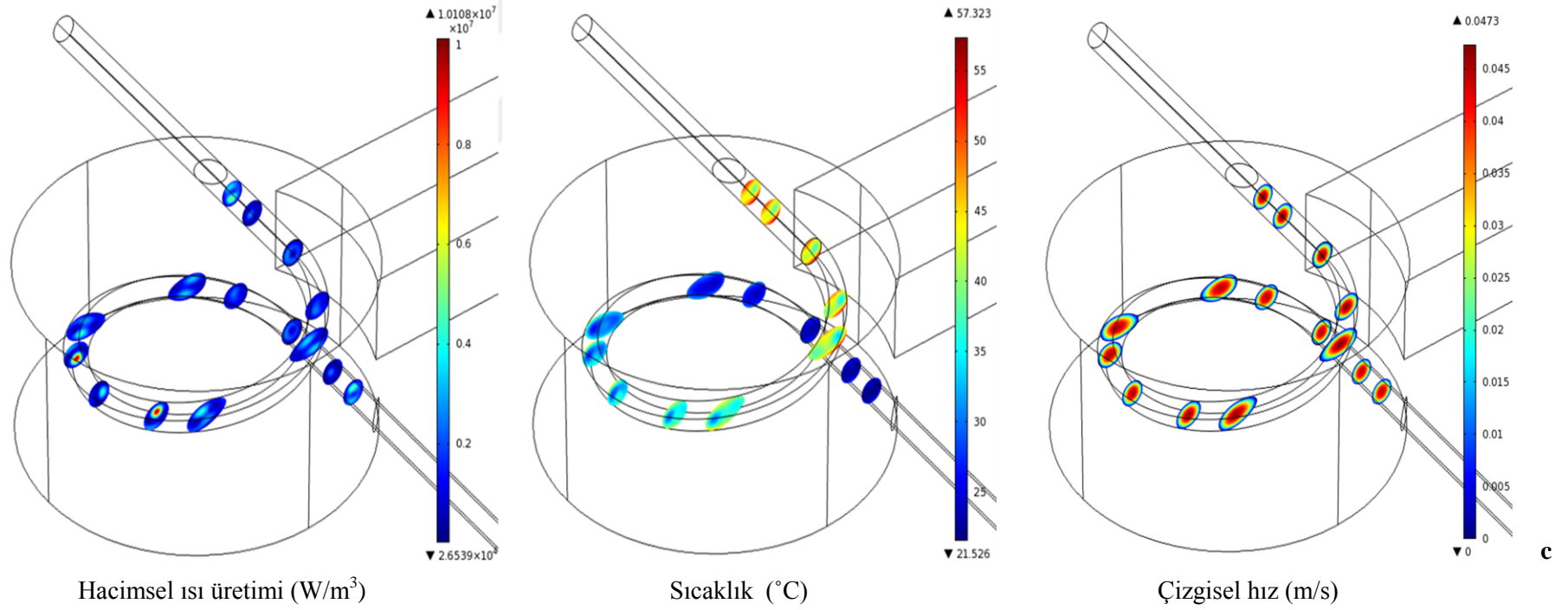


Sıcaklık ($^{\circ}C$)



Çizgisel hız (m/s)

b



Şekil 4.21. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde sayısal olarak hesaplanan hacimsel ısı üretimi, sıcaklık ve akış hızının boru boyunca değişimi a) Saf su b) % 0,5 CMC çözeltisi c) % 1 CMC çözeltisi

4.3.2. Düz Boru Konfigürasyonlu Sürekli Akış Mikrodalga Sistemin Sayısal Benzetimi

4.3.2.1. Sıcaklık dağılımı ve absorbe edilen güç miktarı

Model akışkanların düz boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistemde sayısal benzetimi sonucu hesaplanan değerler ve deneysel sonuçlar Çizelge 4.17, 4.18 ve 4.19'da gösterilmiştir. KOH değerleri en düşük saf su ve en yüksek % 1 CMC çözeltisi için elde edilmiştir. Bütün akışkanlar için hesaplanan ortalama çıkış sıcaklıklarının deneysel sonuçlardan daha düşük ve absorbe edilen mikrodalga enerjinin de deneysel değerlerden çok düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel olarak sıcaklığı ölçülen 13 noktanın sayısal modeldeki sıcaklıkları model akışkanlar için farklı akış hızlarında değerlendirilmiştir (Şekil 4.22, 4.23,4.24). Saf suda elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 5,6°C (27,45 - 21,82°C), 2 L/min hız için 3,3°C (23,83 - 20,55°C) ve 3 L/min hız için 2,3°C (23,15 - 20,85°C)'dir (Şekil 4.22). % 0,5 CMC çözeltisinde elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 8,5°C (29,86 - 21,36°C), 2 L/min hız için 4,4°C (25,59 - 20,84°C) ve 3 L/min hız için 3,3 °C (23,46 - 20,14°C)'dir (Şekil 4.23). % 1 CMC çözeltisinde elde edilen en yüksek sıcaklık farklılıkları 1 L/min hız için 8,1°C (29,14 - 21,04°C), 2 L/min hız için 4,6°C (25,78 - 21,18°C) ve 3 L/min hız için 3,2°C (23,63 - 20,41°C)'dir (Şekil 4.24). Bu değerler incelendiğinde mikrodalga'nın geldiği yönün aksi yönünde (1-5 noktası) sıcaklığın tüm model akışkanlar için daha yüksek olduğu görülmektedir. Deneysel sıcaklık dağılımlarında (Şekil 4.6) ise bu artış CMC çözeltileri için gözlemlense de saf suda gözlemlenmemiştir. Saf suya ait deneysel sıcaklık dağılımında en yüksek sıcaklık değeri mikrodalga enerjinin geldiği yönde elde edilirken, CMC çözeltilerinde borunun merkezine yakın bölgede gözlemlenmiştir.

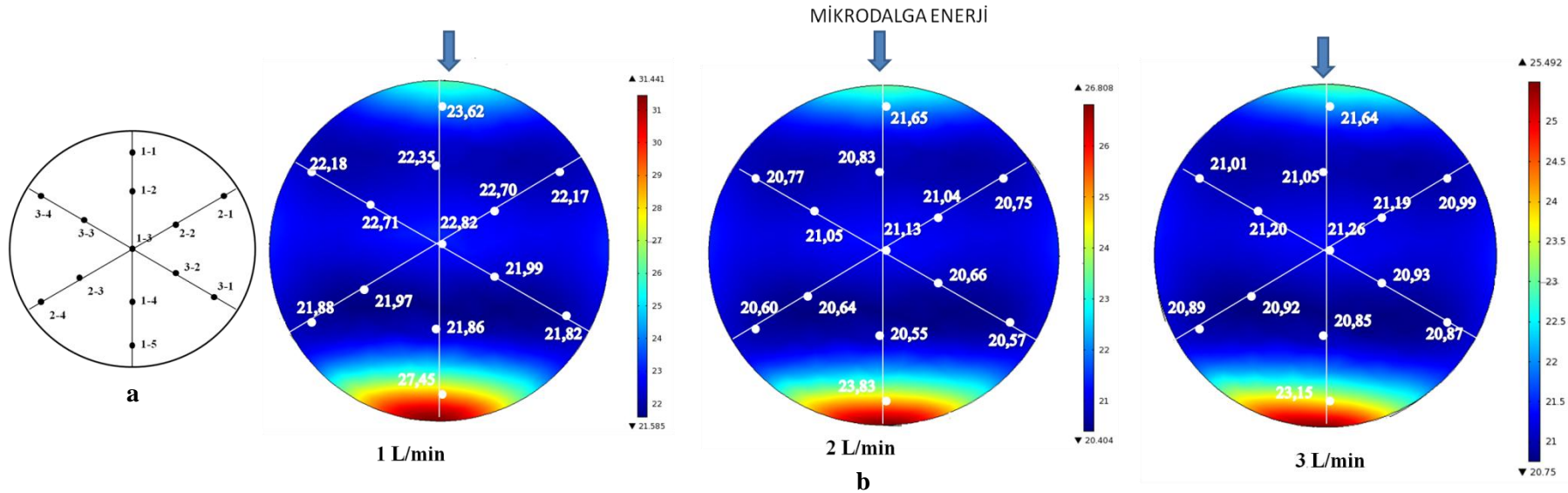
Çizelge 4.17. Düz boru konfigürasyonlu sistemde saf suyun sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

SAF SU	KOH (°C)*	T _{ort,deneysel} (°C)	T _{ort,model} (°C)	ΔT (°C)**	Q _{abs,deneysel} (W)	Q _{abs,model} (W)	Δq (W)***
1 L/min	4,61	27,0	22,7	4,3	399,8	92,8	307,0
2 L/min	3,60	24,5	21,1	3,4	446,8	94,9	351,9
3 L/min	2,32	23,4	21,2	2,2	554,3	94,8	459,5

* 13 noktadaki sıcaklık değerleri ile Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

** ΔT= T_{ort,deneysel} - T_{ort,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

*** Δq= q_{abs,deneysel} - q_{abs,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.22. a) Isıl çift konumları b) Saf suyun düz boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları

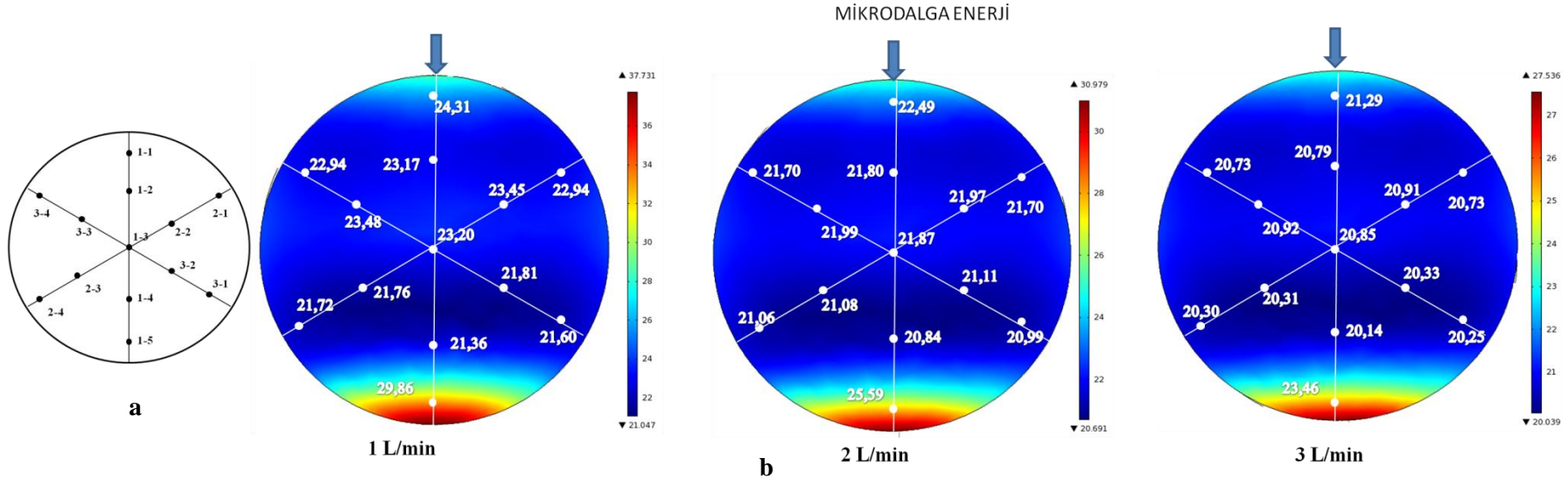
Çizelge 4.18. Düz boru konfigürasyonlu sistemde % 0,5 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

%0,5 CMC	KOH (°C)*	T _{ort,deneysel} (°C)	T _{ort,model} (°C)	ΔT (°C)**	Q _{abs,deneysel} (W)	Q _{abs,model} (W)	Δq (W)***
1 L/min	7,89	30,2	23,2	7,0	656,8	168,4	488,4
2 L/min	5,20	26,5	21,9	4,6	817,7	167,9	649,8
3 L/min	3,67	24,1	20,8	3,3	841,2	167,6	673,6

* 13 noktadaki sıcaklık değerleri ile Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

** ΔT= T_{ort,deneysel} - T_{ort,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

*** Δq= q_{abs,deneysel}- q_{abs,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.23. a) Isıl çift konumları b) % 0,5 CMC çözeltisinin düz boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları

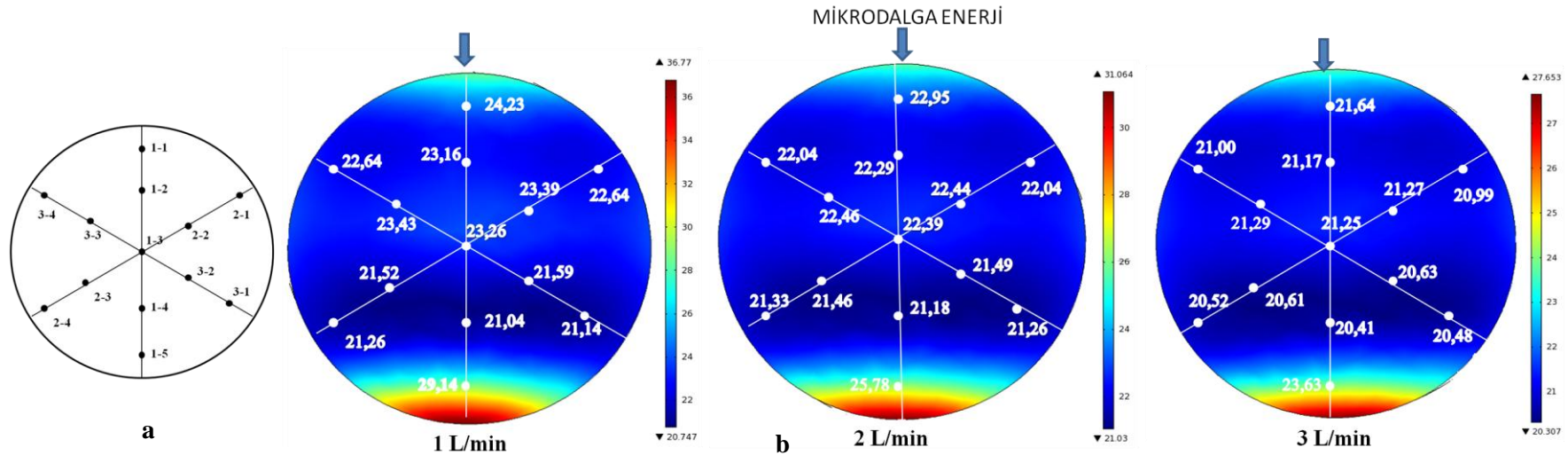
Çizelge 4.19. Düz boru konfigürasyonlu sistemde % 1 CMC çözeltisinin sayısal benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

%I CMC	KOH (°C)*	T _{ort,deneysel} (°C)	T _{ort,model} (°C)	ΔT (°C)**	Q _{abs,deneysel} (W)	Q _{abs,model} (W)	Δq (W)***
1 L/min	12,85	32,4	23,0	9,4	836,9	182,0	654,9
2 L/min	5,97	27,5	22,2	5,3	911,5	181,7	729,8
3 L/min	4,19	24,7	21,1	3,6	923,9	181,2	742,7

* 13 noktadaki sıcaklık değerleri ile Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

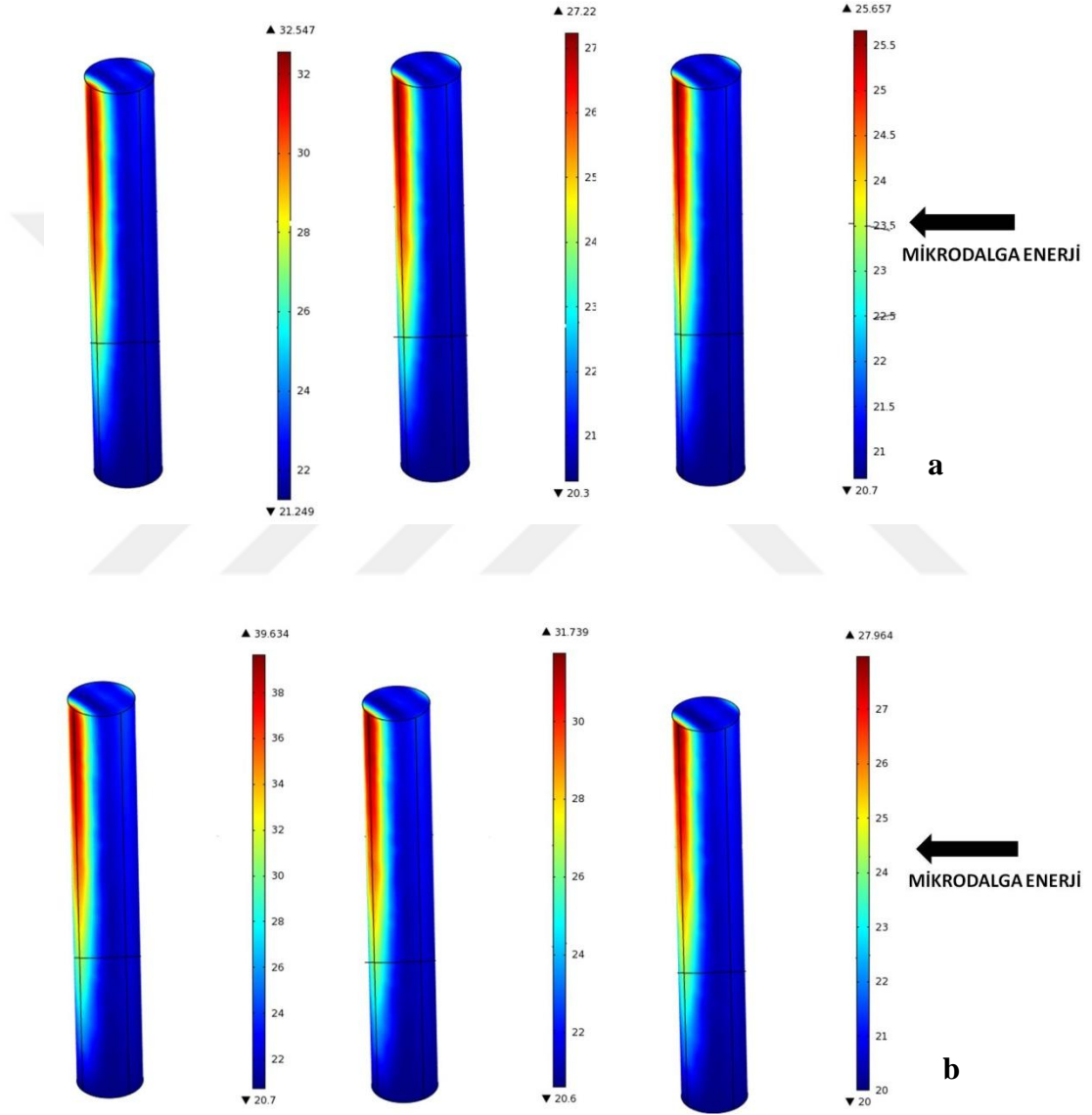
** ΔT= T_{ort,deneysel} - T_{ort,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük değerde olduğunu göstermektedir.

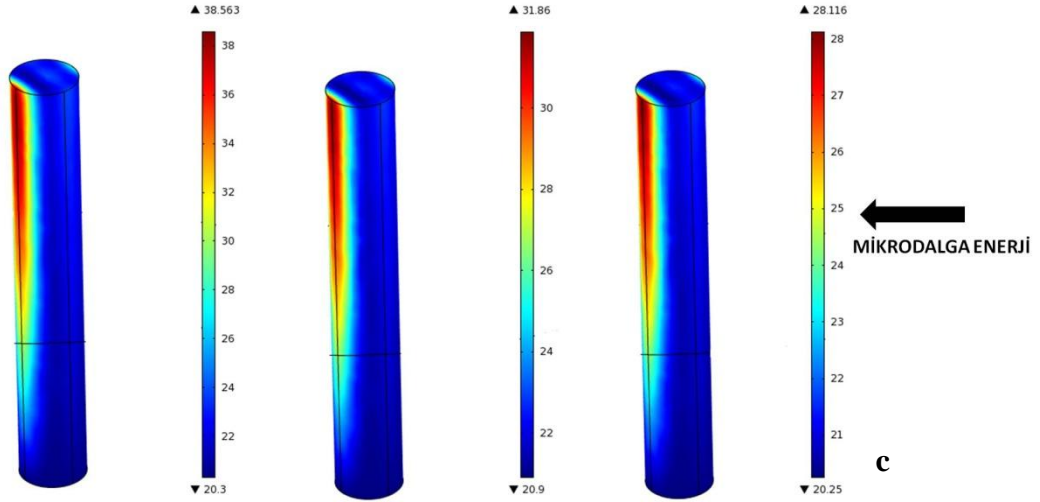
*** Δq= q_{abs,deneysel} - q_{abs,model}, pozitif değerler sayısal benzetimin daha düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24. a) Isıl çift konumları b) % 1 CMC çözeltisinin düz boru çıkışındaki sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımları

Boru yüzeyi boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Mikrodalga enerjinin geldiği yönün aksi yönünde boru yüzeyinde model akışkanların sıcaklık artışının daha yüksek ve mikrodalganın geldiği yönde sıcaklığın daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Her üç model akışkan için hesaplanan en yüksek sıcaklık değeri akış hızı arttıkça azalmış ve bütün hızlarda en düşük değer saf suda görülmüştür.





Şekil 4.25. Boru yüzeyi boyunca sıcaklık değişiminin akış hızı ile değişimi (sol 1 L/min, orta 2 L/min, sağ 3 L/min) a) Saf su b) % 0,5 CMC çözeltisi c) % 1 CMC çözeltisi

Düz boru konfigürasyonlu sistemde yapılan sayısal benzetimlerde elde edilen sıcaklık profilleri ve absorbe edilen mikrodalga enerji değerlerinin deneysel sonuçlardan oldukça farklı olduğu görülmüştür. Deneysel olarak hesaplanan absorbe edilen mikrodalga enerji miktarı (Çizelge 4.9) en yüksek % 1 CMC çözeltisinin 3 L/min akış hızında (% 23,1), en düşük saf suyun 1 L/min akış hızında (% 9,9) ısıtılması sonucunda elde edilmiştir. Absorbe edilmeyen mikrodalga enerji magnetrona geri yansımaktadır yani başka bir deyişle magnetrona yansıyan enerji en fazla saf suyun, en az % 1 CMC çözeltisinin ısıtılması sırasında gerçekleşmektedir. Her koşulda geri yansıyan mikrodalga enerji helikal konfigürasyonlu sisteme göre çok yüksek değerlerdedir. Mikrodalga sistemlerde gıdaya ulaşan gücün en yüksek seviyede olması için; duran dalga (standing wave) oranı ile yansıyan enerjinin en düşük değerde olması gerekmektedir. Böylece dalga kılavuzu ve gıdanın empedansı eşleşmektedir [Coronel, 2005]. Bir başka deyişle magnetron tarafından üretilen enerji ile dielektrik yük tarafından absorbe edilen enerjinin yakın değerlerde olması uyumlanmış yük (matched load), eğer fark yüksekse uyumsuz yük (mismatched load) olarak tanımlanmaktadır. Helikal boru kullanımı ile model akışkanların hem borunun kavitenin farklı yerlerinde farklı değerlerdeki elektromanyetik enerjiye maruz kalması hem de akışkan hacminin düz borudan yüksek olması (6 kat fazla) bu konfigürasyonun uyumlanmış yük olmasına neden olmuştur. Düz boruda ise aynı mikrodalga gücünde absorbe edilen mikrodalga'nın daha düşük seviyede yani

yansıyan enerjinin daha yüksek olması düz boru konfigürasyonunun uyumsuz yük olmasına neden olabileceği söylenebilir. Bu durum magnetrona dönen elektromanyetik dalga miktarının fazla olmasına, magnetronun aşırı ısınmasına ve frekans değişimlerine neden olmaktadır [Dibben, 2001; Knutson ve Meissner, 1966]. Magnetrona meydana gelen frekans değişimleri dikkate alınmalıdır, özellikle düz boru konfigürasyonlu sistemde olduğu gibi uyumsuz yük içeren kaviteelerde frekans değişimleri çok yüksektir. Uyumlu yük durumunda meydana gelen küçük frekans değişimleri güç dağılımını çok daha az etkilemektedir. Frekansta meydana gelen küçük bir değişim aynı zamanda mikrodalga modunda da değişime ve beklenmeyen sıcaklık dağılımlarına neden olabilmektedir [Dibben, 2001]. COMSOL Multiphysics yazılımında elektromanyetik ısıtmanın modellenmesinde uygulanan bütün portların uyumlu yüklerle bağlantılı olması ve porta doğrudan yansıma olmadığı varsayımı sayısal benzetim ve deneysel sonuçlar arasında meydana gelen bu uyumsuzluğun en önemli nedeni olarak söylenebilir [COMSOL, 2012]. Yakovlev, (2001) yaptığı çalışmada, mikrodalga ısıtmanın sayısal olarak modellenmesinde kaviteye ulaşan enerjinin en az % 10'unun kaybolduğu (dielektrik yük tarafından absorbe edildiği) sistemlerin iyi tasarlanmış sistemler olarak düşünülebileceğini rapor etmiştir. Sayısal model sonucunda elde edilen değerlerin % 10'un altında olması durumunda yansımalar çok fazla olacağı için tasarlanan sistemin etkinliğinin az olduğunu göstermektedir. Tez kapsamında elde edilen sayısal benzetim sonuçlarında absorbe olan mikrodalga enerjinin düz boru konfigürasyonlu sistemde tüm akışkanlar için % 2-4 aralığında (Çizelge 4.17, 4.18, 4.19) olduğu görülmektedir. Bu bilgiden yola çıkarak doğru sayısal sonucu elde etmek için gerekli olan yeterli düzeyde mikrodalga enerji absorpsiyonunun yansımaların çok fazla olması nedeniyle gerçekleşmediğini ve düz boru konfigürasyonlu sistemin etkin tasarlanmadığını söyleyebiliriz.

Yük eşleşimi ile yansımaları azaltmak için ayarlama çıkıntısı (tuning stubs), sirkülatör gibi araçlar dalga kılavuzuna eklenebilir. Ayarlama çıkıntıları, yüksek güçlü endüstriyel mikrodalga sistemde yük uyumluluğunu sağlamak ve absorbe edilen mikrodalga gücünü yükseltmek için kullanılan iletim hatlarıdır. Çıkıntıların yeri ve uzunluğu değiştirilerek yük eşleşimi sağlanmaktadır [Thostenson ve Chou, 1999; Coronel, 2005; Bilik ve Bezek, 2010,]. Muley ve Boldor (2012), yaptıkları çalışmada yüksek kayıplı (su gibi) materyallerin ısıtılması için tasarlanmış bir sürekli

akış mikrodalga sistemde düşük kayıplı (yağ ve etanol karışımı) materyalin ısıtılması sırasında yük uyumsuzluğu meydana geldiğini belirtmişlerdir. Tuning stubs kullanarak yansımaları azaltmışlar ve bu uyumsuzluğu en aza indirdiklerini rapor etmişlerdir. COMSOL Multiphysics ile bu sistemi sayısal olarak modellemişler ve deneysel verilerle uyumlu sonuç elde etmişlerdir.

Sisteme sirkülatörlerin dahil edilmesi ile geri yansıyan mikrodalga enerjinin magnetrona zarar vermesi önlenmekte ve magnetronun kullanım süresi artırılabilir. Sirkülatörler, elektromanyetik enerjiyi iyi absorbe edemeyen materyallerin neden olduğu önemli derecedeki gücün mikrodalga kaynağına geri yansıyarak zarar vermesini önlemek için kullanılır. Üç portlu sirkülatörlerin bir portu mikrodalga kaynağına, bir portu aplikatöre ve diğeri yapay yüke (dummy load) bağlıdır. Sisteme yapılan bu ekleme ile magnetrona geri yansıyan enerji başka yöne çevrilir ve yapay yük (çoğunlukla su) tarafından absorbe edilir [Thostenson ve Chou, 1999]. Sirkülatör kullanımı ile mikrodalga enerjinin magnetrona geri yansımalarının önlenmesi ile istenmeyen frekans ve mod değişimlerinin de engellenilebileceği ve magnetron etkinliğinden emin olunabileceği düşünülmektedir. Ayarlama çıkıntıları ve sirkülatörün yanı sıra mikrodalga sistemde yansıyan mikrodalga enerjinin ölçümünü sağlayan yönlü bağlantı (directional coupler) kullanılması ile dielektrik materyal tarafından absorbe edilen mikrodalga enerji ölçülebilir. Tez kapsamında, özellikle düz boru konfigürasyonlu sürekli akış mikrodalga sistem ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sırasında yansıyan enerjinin ölçülmesi sayısal model ve deneysel sonuçların uyumsuzluğunun daha iyi açıklanmasına sağlayacaktır. Bu nedenlerle mikrodalga sistem tasarımının etkinliğinin artırılması için, bahsedilen mikrodalga bileşenlerinin kullanılması önem teşkil etmektedir [Püschner, 2005].

4.3.2.2. Hız profilleri

Hız değerlerinin teorik doğrulaması

Düz boruda Navier-Stokes denklemlerinin sayısal çözüm sonuçlarını teorik olarak doğrulamak için Palazoğlu vd. (2002)'nin yaptıkları çalışmada kullanılan Streeter,(1958) tarafından elde edilen eşitliklerden (Eşitlik 4.5 ve 4.6) yararlanılmıştır. Ortalama çizgisel hızı 0,0294 m/s, viskozitesi 0,05 Pa.s ve yoğunluğu 1000 kg/m³ olan akışkanın akışı bu amaçla modellenmiştir.

$$-\frac{\Delta P}{l} = -\frac{32\mu u_{ort}}{D^2} \quad (4.5)$$

$$\frac{u_{max}}{u_{ort}} = 2 \quad (4.6)$$

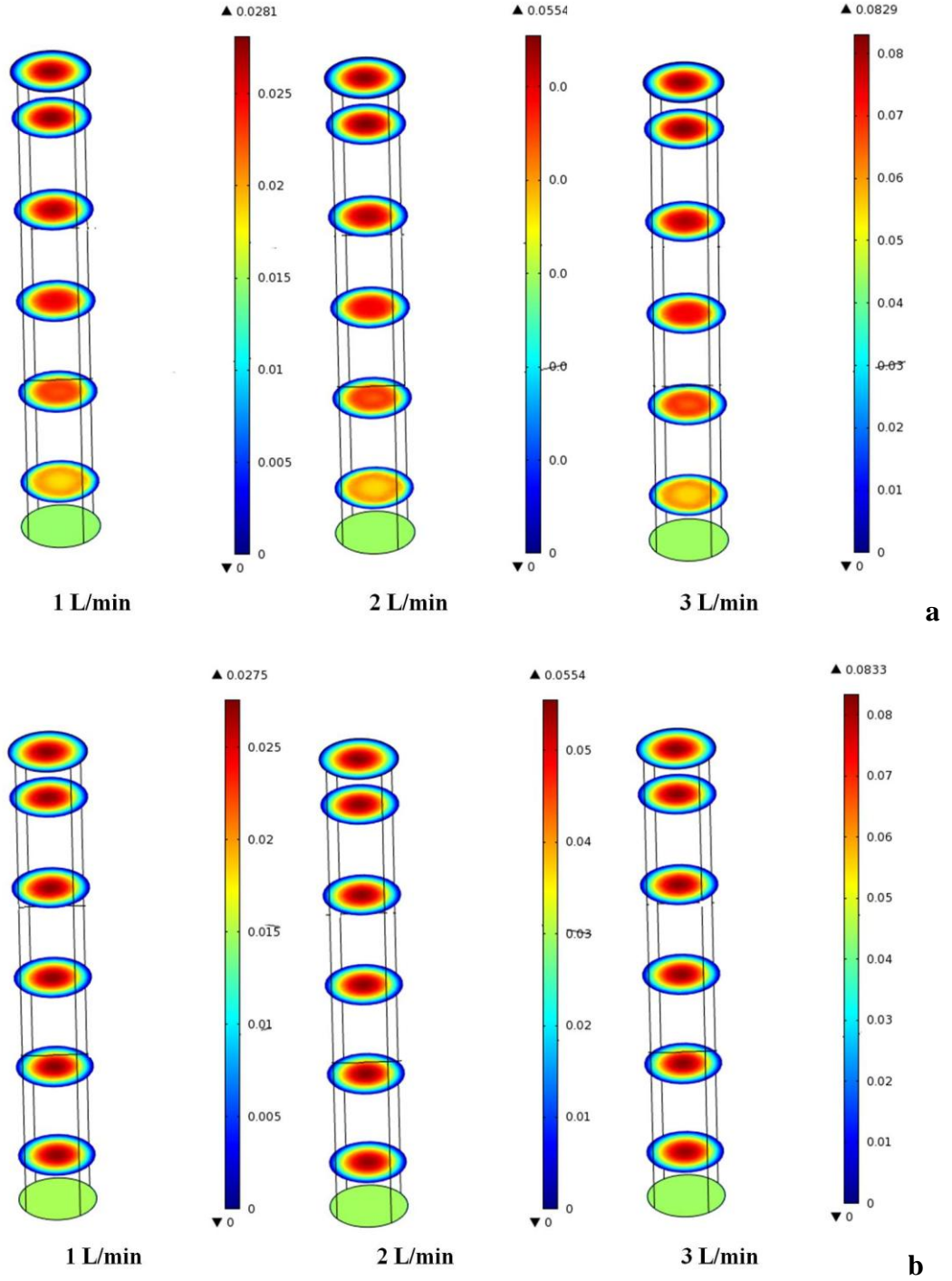
Yapılan teorik ve sayısal model hesaplamaları sonucunda elde edilen değerler arasındaki farkın çok düşük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.20). Bu sonuçlar doğrultusunda Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için, kullanılan sayısal ağ boyutu ve yapısının uygun olduğu söylenebilir.

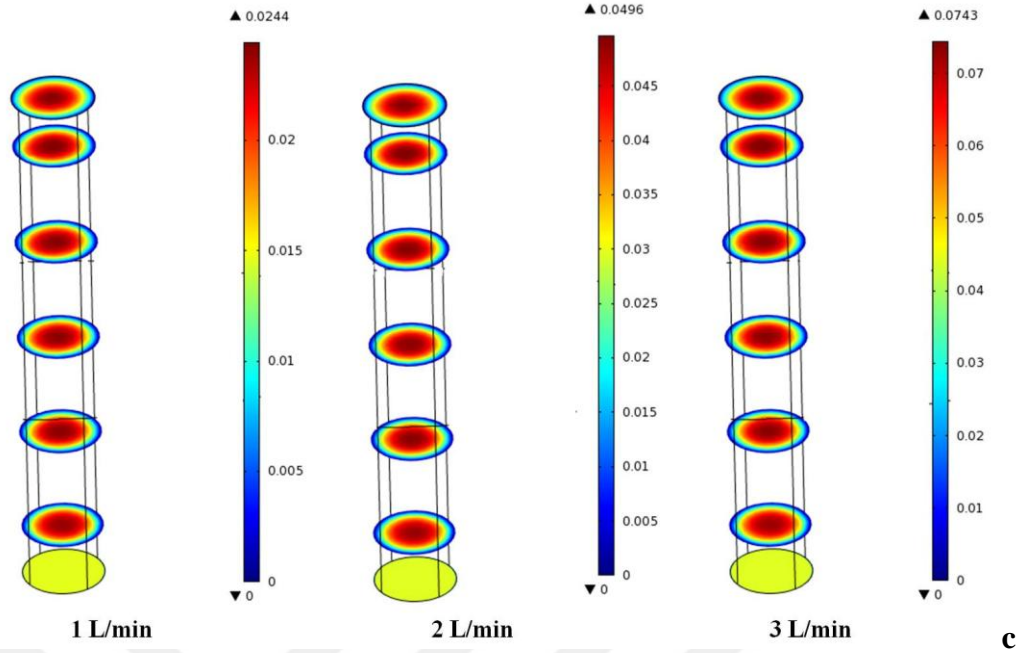
Çizelge 4.20. Düz boruda akış için hesaplanan teorik ve sayısal model sonuçları

	Teorik	Comsol	% Fark
u_{max} (m/s)	0,0588	0,0587	0,2
ΔP (Pa)	8,27	9,76	-18,1

Sayısal benzetim sonuçları

Şekil 4.26'da model akışkanların sayısal benzetim ile elde edilen boru boyunca hız profilleri görülmektedir. Boru içerisinde akış profilinin, hızın duvarda sıfır ve merkezde en yüksek değeri alacak şekilde parabolik hız profili olduğu görülmektedir.





Şekil 4.26. Sayısal benzetim sonucu elde edilen boru kesitindeki hız profilleri a) Saf su b) %0,5 CMC çözeltisi c) %1 CMC çözeltisi

Düz boruda sayısal benzetim ile hesaplanan en yüksek hız ve basınç kaybı değerleri Çizelge 4.21'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.21. Düz boruda sayısal benzetim ile elde edilen ΔP ve u_{max} değerleri

Akış hızı (L/min)	u_{ort} (m/s)	Saf Su		% 0,5 CMC		% 1 CMC	
		ΔP (Pa)	u_{max} (m/s)	ΔP (Pa)	u_{max} (m/s)	ΔP (Pa)	u_{max} (m/s)
1	0,0147	0,285	0,0281	44,7	0,0271	272,7	0,0245
2	0,0294	1,006	0,0554	79,9	0,0549	386,0	0,0496
3	0,0441	2,174	0,0829	112,9	0,0829	475,8	0,0743

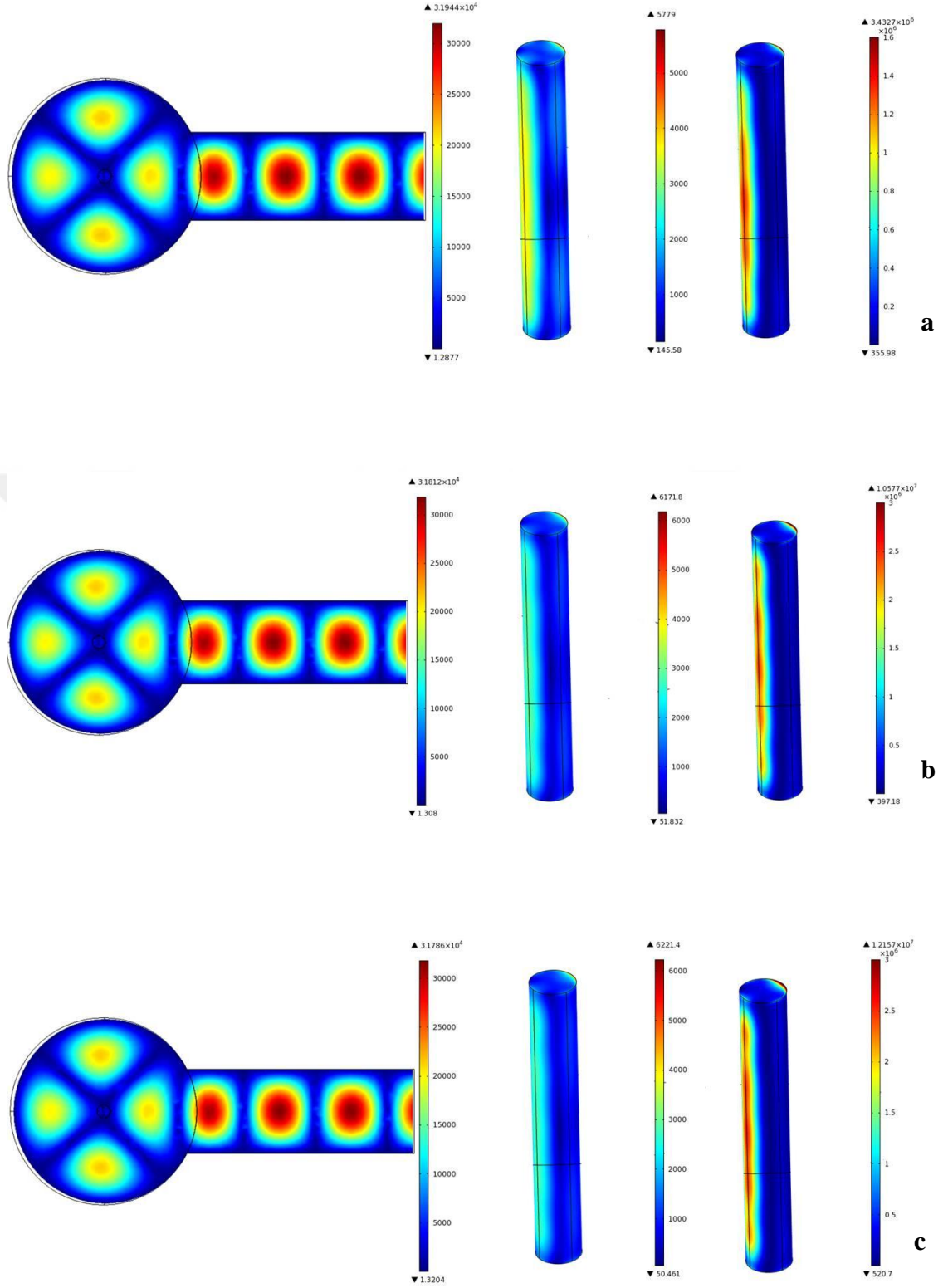
Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.21 karşılaştırıldığında helikal boruda basınç kaybının düz borudan çok yüksek değerde olduğu gözlemlenmektedir. Salvi vd. (2009)'nin yaptığı çalışmada % 0,5 CMC çözeltisinin 1 L/min akış hızında sürekli akış mikrodalga sistemde ısıtılması tez kapsamında kullanılan boru ile benzer çap ve boylarda (borunun iç çapı 0,0318 m, boyu 0,254 m) gerçekleştirilmiştir. Salvi vd. (2009)'un kullandıkları sistem ve tez kapsamında tasarlanan helikal konfigürasyonlu sistem ile % 0,5 CMC çözeltisinin ısıtılması ile elde edilen sıcaklık artışı değerlerinin çok farklı olmamasına rağmen basınç düşüşünün helikal konfigürasyonlu sistemde

daha fazla olduğu görülmektedir. Basınç kaybının fazla olması helikal konfigürasyonlu sistemde model akışkanı pompalamak için daha çok pompa gücüne ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Helikal borularda sürtünmenin düz boruya göre daha fazla olması, basınç kaybının daha fazla olmasına neden olmaktadır [Kubair & Varrier, 1961].

Helikal borularda merkezkaç kuvvetlerinin etkisi ile borunun dış duvarına yakın kısımlarda sürtünme kayıpları artarak basınç kaybında artışa neden olmaktadır. Akış hızının artışı, merkezkaç kuvvetlerin etkisini ve sürtünmeyi artırmaktadır. Bu durum akış yönündeki hız profilinin düz borudan farklı olmasına neden olmaktadır. Helikal borularda akış sırasında meydana gelen akış yönündeki basınç dağılımı, çoğu zaman akışkanların pompalanmasında sınırlayıcı faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Akış yönündeki hız profilinin düzleşmesi ile basınç kaybının artması gerekli pompa gücünün artmasına neden olmaktadır. Sistemin etkinliğini göstermek için sadece maksimum ve minimum hızların birbirine yaklaşması yeterli değildir basınç kaybındaki artış göz ardı edilmemelidir. Sistem etkinliği basınç kaybı ile ters orantılıdır [Palazoğlu vd., 2001]. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde meydana gelen basınç kaybının Salvi vd. (2009)'nin kullandığı sisteminkinden daha fazla olması, bu sistemde pompalama için harcanan enerjinin daha fazla olduğunu ve bu açıdan karşılaştırıldığında tasarlanan bu sistemin etkinliğinin daha az olduğunu göstermektedir. Salvi vd. (2009)'nin yaptığı çalışma ile karşılaştırıldığında elde edilen basınç kaybı ve dolayısıyla uygulanan pompa gücü helikal boru konfigürasyonlu sistemde daha fazladır, bu nedenle bu sistemde daha fazla enerji sarfiyatı meydana gelecektir. Tez kapsamında düz boru konfigürasyonlu sistemde basınç düşüşünün az olmasına rağmen istenilen sıcaklık artışı sağlanamadığı için de Salvi vd. (2009)'nin kullandıkları sistemin daha etkin tasarlandığı söylenebilir. Helikal boruda gözlemlenen hız profilleri ile saf suda ikincil akış etkisinin daha yüksek olduğu ve bu nedenle düz boruya göre daha fazla basınç düşüşü görüldüğü söylenebilir. Ancak düşük Dean sayısı değeri CMC çözeltilerinin hız profilinin ve basınç düşüşünün düz borudan çok farklı olmamasına neden olduğu söylenebilir.

4.3.2.3. Elektromanyetik alan dağılımı çözümü

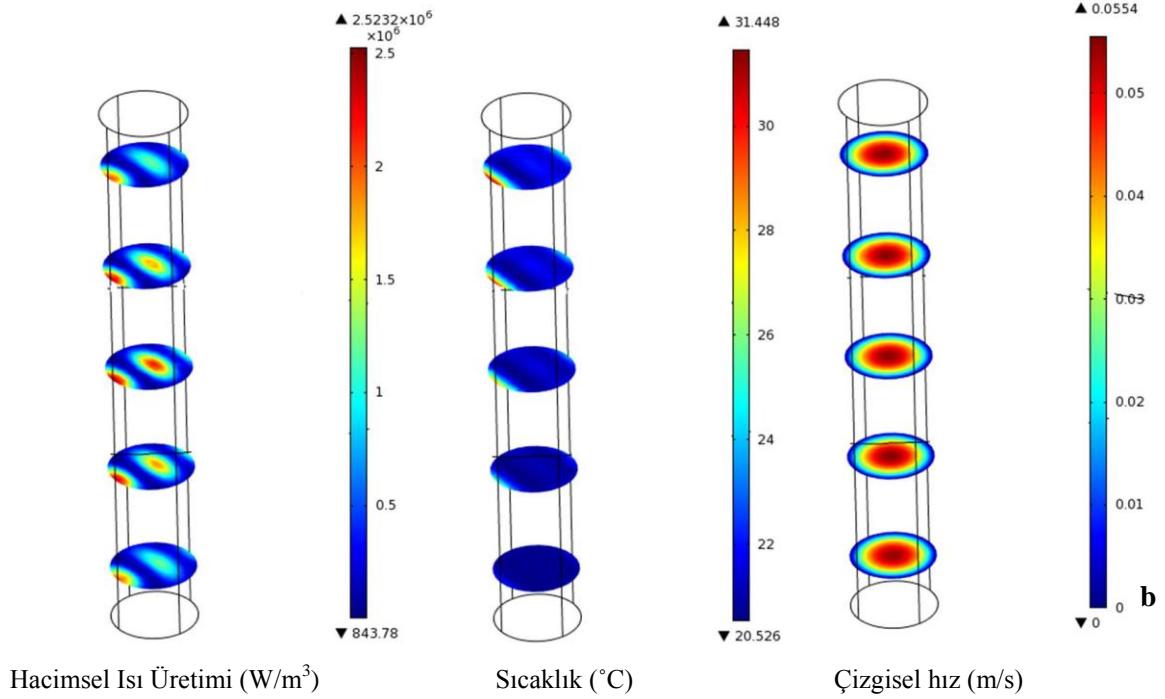
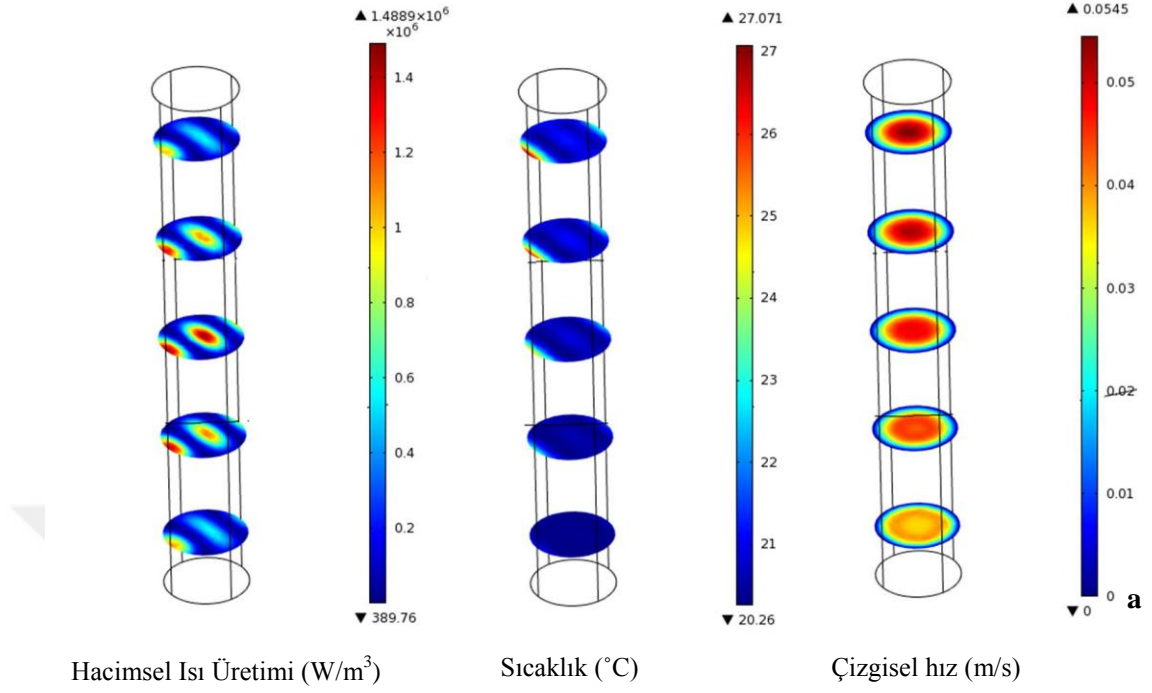
Mikrodalga sistem içerisinde ve helikal boru yüzeyinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Mikrodalga sistem içerisinde elektromanyetik alan şiddeti saf su için 1,3 - 31.944 V/m, % 0,5 CMC çözeltisi için 1,3 - 31.812 V/m, % 1 CMC çözeltisi için 1,3 - 31.786 V/m olarak hesaplanmıştır. Boru yüzeyi boyunca elektromanyetik alan şiddeti saf su, % 0,5 CMC ve % 1 CMC çözeltisi için sırasıyla 145,6 - 5.779 V/m, 51,8 - 6.171,8 V/m ve 50,5- 6.221,4 V/m değerleri arasında değişmektedir. Hesaplanan elektromanyetik alan değerlerinin üç model akışkan için benzer ve helikal konfigürasyonlu sistemde hesaplanan değerlere göre çok düşük olduğu gözlemlenmektedir. Boru yüzeyi boyunca model akışkanların elektromanyetik ısı üretimi değerleri; saf suda 355,98 - 1.373.700 W/m³ , % 0,5 CMC çözeltisinde 397,2 - 2.530.000 W/m³ , % 1 CMC çözeltisinde 520,7 - 2.531.300 W/m³ değerleri arasındadır. Bu değerler en yüksek ısı üretiminin % 1 CMC çözeltisinde ve en düşük saf suda olduğunu göstermektedir.

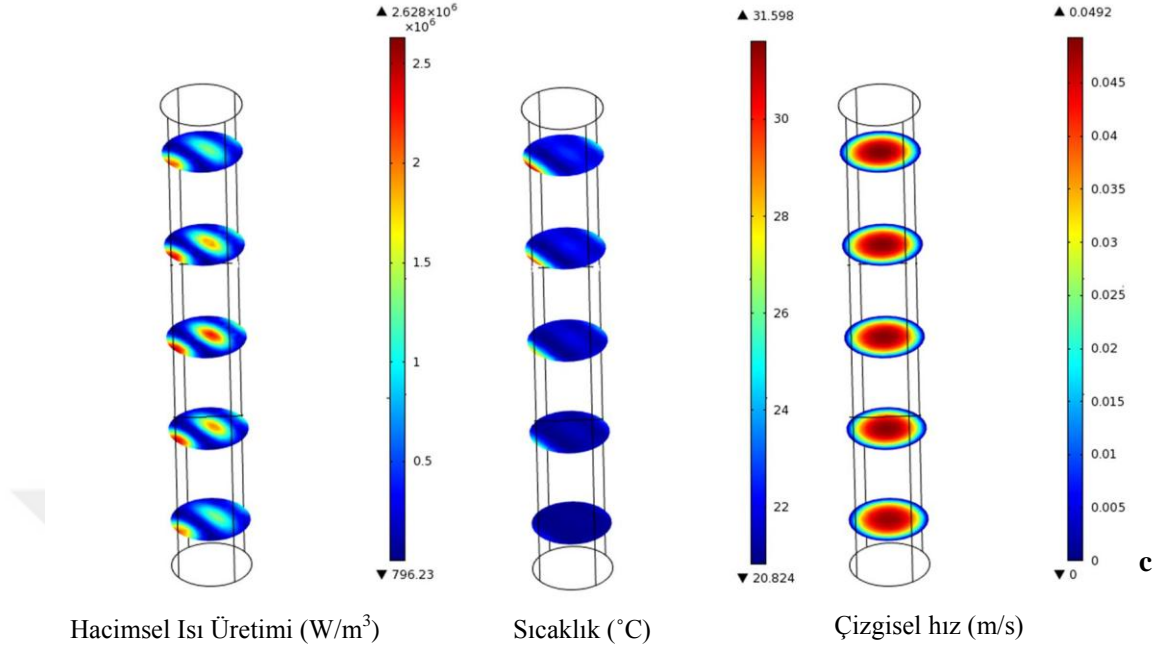


Şekil 4.27. Tüm sistem elektromanyetik alan dağılımı, V/m (sol), düz boru yüzeyi boyunca ısı üretimi, W/m^3 (orta) ve elektromanyetik alan dağılımı, V/m (sağ)
a) Saf su, b) % 0,5 CMC çözeltisi, c) % 1 CMC çözeltisi

Düz borunun iç kısmında meydana gelen ısı üretim ve aynı kesitlerdeki sıcaklık-akış hızı profilleri model akışkanlar için 2 L/min akış hızında Şekil 4.28'de gösterildiği gibidir. Model akışkanların borunun iç kısmında en düşük ve en yüksek ısı üretim değerleri 1, 2, 3 L/min akış hızlarında saf su için 383,6 - 1.414.200 W/m³, 189,8 - 1.488.900 W/m³, 388,2 - 1.509.700 W/m³ ; % 0,5 CMC çözeltisi için 844,2 - 2.578.300W/m³ , 843,8 - 2.523.200 W/m³ , 843,2 - 2.500.800 W/m³ ; % 1 CMC çözeltisi için 795,8 - 2.664.800 W/m³ , 796,2 - 2.628.000 W/m³ , 794,7 - 2.607.400 W/m³tür. En düşük ısı üretim değeri ve dolayısıyla ortalama çıkış sıcaklığı değeri saf suda (Çizelge 4.17), en yüksek ise % 1 CMC çözeltisinde hesaplanmıştır (Çizelge 4.19).

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi model akışkanların hacimsel ısı üretim değeri boru boyunca değişmekte, borunun ortasında merkeze yakın bölgede en yüksek değeri almakta ve çıkışa doğru yaklaştıkça düşüş göstermektedir. Mikrodalga enerjinin geldiği yönün aksi tarafında ısı üretim değeri boru merkezine göre yüksek değerdedir ve boru çıkışına doğru azalmaktadır. Akış hızının en düşük olduğu boru duvarında ısı üretim değerinin yüksek olması bu bölgenin diğer yerlere göre daha fazla ısınmasına neden olmuştur.





Şekil 4.28. Düz boru konfigürasyonlu sistemde ısı üretim, sıcaklık ve akış hızının boru boyunca değişimi a) Saf su b) % 0,5 CMC çözeltisi c) % 1 CMC çözeltisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mikrodalga ile yapılan ısıtma işlemi hızlı ve hacimsel olarak gerçekleşmekte ancak homojen olmayan sıcaklık dağılımı önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle sürekli akış mikrodalga sistem tasarımları bu dezavantajı engelleyecek şekilde gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, sürekli akış mikrodalga sistemler ile homojen ısınmanın düşük viskoziteli akışkan gıdalar için başarılı şekilde gerçekleştirildiği ancak yüksek viskoziteli gıdalarda homojen ısınmanın sağlanamadığı görülmüştür. Gıda kalitesi ve besin değeri açısından sorun teşkil eden bu durumu ortadan kaldırmak amacıyla tez kapsamında viskozitesi yüksek akışkan gıdaların homojen ısıtılmasını sağlayan sürekli akış mikrodalga sistem tasarlanmıştır. Bu amaçla, ürünün mikrodalga kavite içerisinde farklı elektrik alan bölgelerinden geçmesini sağlayacak helikal boru konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu sistemde deneysel ve COMSOL Multiphysics yazılımı ile sayısal olarak Newtonumsu (saf su) ve Newtonumsu olmayan (%0,5 ve %1 w/w CMC çözeltisi) model akışkanlar farklı akış hızlarında (1, 2, 3 L/min) 4 kW güç uygulanarak ısıtılmış ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Isıtma denemeleri ve modelleme çalışmaları aynı koşullarda düz boru konfigürasyonu ile tekrarlanmış ve sonuçlar helikal boru konfigürasyonu ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Helikal boru konfigürasyonlu sisteme 20 ± 1 °C sıcaklıkta giriş yapan model akışkanların ortalama çıkış sıcaklıkları ve standart sapma değerleri 1, 2, 3 L/min akış hızlarında sırasıyla, saf su için $52,32 \pm 3,77$; $37,00 \pm 2,17$; $31,83 \pm 1,78$ °C, % 0,5 CMC çözeltisi için $61,40 \pm 7,50$; $42,43 \pm 2,67$; $34,56 \pm 2,63$ °C ve % 1 CMC çözeltisi için $65,26 \pm 6,86$; $47,33 \pm 4,72$; $37,39 \pm 3,25$ °C olarak belirlenmiştir. Düz boru konfigürasyonlu sistemde model akışkanların ortalama çıkış sıcaklıkları ve standart sapma değerleri 1, 2, 3 L/min akış hızlarında sırasıyla, saf su için $27,05 \pm 0,80$; $24,49 \pm 0,87$; $23,38 \pm 0,62$ °C % 0,5 CMC çözeltisi için $30,21 \pm 3,69$; $26,52 \pm 2,57$; $24,06 \pm 2,03$ °C, % 1 CMC çözeltisi için $32,42 \pm 4,69$; $27,50 \pm 3,23$; $24,71 \pm 2,57$ °C olduğu gözlemlenmiştir.

Helikal konfigürasyonlu boru ile CMC çözeltilerinde sıcaklık artışının saf sudan yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak saf suda ısınmanın CMC çözeltilerine

göre daha homojen gerçekleştiği görülmüştür. Akış hızının artması model akışkanların sıcaklık dağılımının homojenliğinde artışa neden olmuştur.

Absorbe edilen mikrodalga enerjinin helikal boru konfigürasyonunda düz boruya göre daha fazla olduğu saptanmıştır. Bunun bir sonucu olarak düz boruda, helikal boruya göre daha düşük sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Düz boru uzunluğunun helikal borudan daha az olması ve absorbe edilen mikrodalga enerjinin düşük seviyede olduğu kavitenin merkezine yerleştirilmesi ısınmanın helikal boruya oranla daha az gerçekleşmesine neden olmuştur.

Viskozitesi yüksek CMC çözeltilerinin helikal boru içerisindeki akış profilinin, Dean sayısının çok düşük olması nedeni ile düz boru içerisindeki akış profiline benzer olduğu ve etkin bir karışma sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Helikal boru konfigürasyonunda akışkan kavitenin farklı noktalarından geçerek farklı elektromanyetik enerjiye maruz kalmaktadır. Helikal boru ile ikincil akışın etkin şekilde oluşmamasına rağmen bu etki sayesinde literatürdeki mevcut sistemlerden daha homojen ısınma sağlanmıştır. CMC çözeltileri için akış hızı ve/veya kavis oranının (d/D , curvature ratio) artırılması ile Dean sayısı artırılarak ikincil akış oluşumu ve etkin karıştırma sağlanabileceği düşünülmektedir. Yüksek Dean sayısı saf suda ikincil akış etkisinin görülmesine ve radyal yönde karışma sağlanmasına neden olmuştur. Bu nedenle saf su ile ısıtma işleminde CMC çözeltilerinden daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Aynı zamanda elektromanyetik enerjinin daha etkin ve verimli kullanılabilmesi amacıyla helikal borunun sarmal sayısının artırılması önerilmektedir.

Sayısal model çözümünde helikal boru konfigürasyonlu sistemde sayısal ağ sayısı tüm sistem için 530.739; helikal boru için 336.739'dur. Düz boru konfigürasyonlu sistemde sayısal ağ sayısı tüm sistem için 144.383; boru için 53.138'dir. Helikal boru konfigürasyonlu sistem için serbestlik derecesi elektromanyetik alan çözümünde 2.677.671; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği çözümünde 318.220'dir. Düz boru için serbestlik derecesi elektromanyetik alan çözümünde 939.619; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği çözümünde 55.270'dir.

Sayısal benzetim sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumluluğunu belirlemek için karekök ortalama hata (KOH) değerleri hesaplanmıştır. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde model akışkanların 1, 2, 3 L/min akış hızlarında KOH değerleri sırasıyla saf su için 9,09; 3,91; 2,67°C, % 0,5 CMC çözeltisi için 13,75; 3,19; 2,16°C, % 1 CMC çözeltisi için 12,53; 3,47; 3,48°C olarak bulunmuştur. Düz boru konfigürasyonlu sistemde ise model akışkanların 1, 2, 3 L/min akış hızlarında KOH değerleri sırasıyla saf su için 4,61; 3,60; 2,32°C, % 0,5 CMC çözeltisi için 7,895; 5,20; 3,67°C, % 1 CMC çözeltisi için 12,85; 5,97; 4,19°C olarak hesaplanmıştır.

Helikal boru konfigürasyonlu sistemde akış hızı arttıkça KOH değerlerinin azaldığı yani deneysel ve sayısal model sonuçları arasındaki uyumun arttığı görülmüştür. Deneysel ve sayısal benzetim sonucunda elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımlarında sıcak ve soğuk bölgelerde farklılıklar görülmüştür. Sayısal benzetimde magnetron frekansının sabit bir değer olması ancak gerçekte deney sırasında salınım göstermesinin bu farklılığa neden olmuş olabileceği düşünülmektedir.

Düz boru konfigürasyonlu sistemde boru çıkışında sayısal olarak hesaplanan sıcaklık dağılımlarının ve absorbe edilen mikrodalga enerjinin deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı görülmüştür. Bu sistemde borunun kavite içerisinde bulunduğu konum nedeni ile mikrodalga enerji etkin kullanılamamakta, bu nedenle absorbe edilen mikrodalga enerji az ve yansımalar fazla olmaktadır. Mikrodalga sistem ile uyumsuz yükün (mismatched load) ısıtılması, frekans değişimine ve magnetron tarafından sağlanan modun değişimine neden olabilmektedir. Sayısal benzetim ile deneysel sonuçların uyumsuzluğunun bu değişimden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Helikal boru konfigürasyonlu sistemde akışkan hacminin yüksek olması bu uyumsuzluğu ortadan kaldırmış veya azaltmış olabilir. Bunun, helikal boru konfigürasyonlu sistemin sayısal model ile deneysel sonuçlarının (özellikle yüksek akış hızlarında) daha uyumlu olmasının sebebi olduğu söylenebilir.

Sisteme ayarlama çıkıntısı (tuning stubs) eklenmesi ile yansımaların en aza indirilebileceği ve sayısal model ile daha uyumlu sonuçların elde edilebileceği

düşünülmektedir. Aynı zamanda sirkülatör kullanımı ile mikrodalga enerjinin magnetrona geri yansımalarının önlenmesi ile istenmeyen frekans ve mod değişimlerinin de engellenilebileceği ve magnetron etkinliğinden emin olunabileceği düşünülmektedir. Ayarlama çıkıntısı ve sirkülatörün yanı sıra mikrodalga sistemde yansıyan mikrodalga enerjinin ölçümünü sağlayan yönlü bağlantı (directional coupler) kullanılması ile dielektrik materyal tarafından absorbe edilen mikrodalga enerjinin ölçülmesi önerilmektedir. Bu mikrodalga sistem bileşenlerinin kullanılması ile mikrodalga sistem tasarımında sabit proses sonuçlarının alındığından emin olunabilecektir.

Sayısal benzetim ile hesaplanan basınç kaybı değerleri helikal boruda düz boruya göre daha yüksek değerlerdedir. Literatürde mevcut sürekli akış mikrodalga sistemlerde düz boru kullanıldığı ve bu sistemlerde tez kapsamında kullanılan helikal boru ile yaklaşık sıcaklık artışı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Düz boruda akışkanları pompalamak için enerji sarfiyatı helikal borudan daha azdır, bu literatürde mevcut sistemlerde akışkanı pompalamak için harcanan gücün daha az olacağını göstermektedir. Bu etkiler göz önüne alınarak endüstriyel olarak sürekli akış mikrodalga sistemlerde helikal boru konfigürasyonunun kullanımında maliyet analizi yapılması gerektiği düşünülmektedir. Ancak helikal konfigürasyonlu sistemlerde daha homojen sıcaklık dağılımının, yüksek kaliteli ve besin içeriğine sahip gıdaların üretilmesine olanak sağlamasının önemli bir avantaj olarak göz önünde tutulması gereklidir.

KAYNAKLAR

- Abbasnezhad, B., Hamdami, N., Shahedi, M., Vatankhah, H., "Thermophysical and rheological properties of liquid egg white and yolk during thermal pasteurization of intact eggs", *Food Measure*, 8:259–269, (2014).
- Abdelrahim, K. A., Ramaswamy, H. S., " High temperature/pressure rheology of carboxymethyl cellulose (CMC)" *Food Research International*, Vol. 28, No. 3, pp. 285-290, (1995).
- Acar, J., "Mikroorganizmaların Öldürülmesi", *Gıda Mikrobiyolojisi*, 3. Baskı, (Editör: Ünlütürk, A., Turantaş, F.), Meta Basım, 227-253, (2003).
- Austin, L. R., Seader, J. D., "Fully developed viscous flow in coiled circular pipes" *AIChE Journal*, 19(1): 85-94, (1973).
- Barbosa-Canovas, G. V., Medina-Meza, I., Candoğan, K., Bermudez-Aguirre, D., "Advanced retorting, microwave assisted thermal sterilization (MATS), and pressure assisted thermal sterilization (PATS) to process meat products" 98:420-434, (2014).
- Benlloch-Tinoco, M., Igual, M., Rodrigo, D., Martinez-Navarrete, N., " Superiority of microwaves over conventional heating to preserve shelf-life and quality of kiwifruit puree", 50:620-629, (2015).
- Bilik, V., Bezek, J., "High power limits of waveguide stub tuners" *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 44 (4): 178-186. (2010).
- Buffler, C: R. "Microwave Cooking and Processing", *avi*, New York, s.56-77, (1993).
- Castelain, C., Legentilhomme, P., " Residence time distribution of a purely viscous non-Newtonian fluid in helically coiled or spatially chaotic flows", *Chemical Engineering Journal*, 120:181–19, (2006).

- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T., "Microwave food processing-A review", *Food Research International*, 52(1):243-261, (2013).
- Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V., Varadan, V. K., "Microwave electronics: Measurement and material characterization" Wiley, England, (2004).
- Cherbański, R., Rudniak, L., "Modelling of microwave heating of water in a monomode applicator - Influence of operating conditions", *International Journal of Thermal Sciences*, 74:214-229, (2013).
- Cinquanta, L., Albanese, D., Cuccurollo, G., Di Matteo, M., " Effect of orange juice of batch pasteurization in an improved pilot-scale microwave oven" *Journal of Food Science*, 75(1):46-50, (2010).
- Clare, D. A., Bang, W. S., Cartwright, G., Drake, M. A., Coronel, P., Simunovic, J., "Comparison of sensory, microbiological, and biochemical parameters of microwave versus indirect UHT fluid skim milk during storage" *Journal of Dairy Science*, 88(12):4172-82, (2005).
- COMSOL Multiphysics, RF Module Users Guide Release 4.3, COMSOL Inc., USA, <http://www.comsol.com>, (2012).
- Coronel, P., "Pressure Drop and Heat Transfer Coefficients in Helical Heat Exchangers" *Yüksek Lisans Tezi*, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, (2001).
- Coronel, P., "Continuous Flow Processing Of Foods Using Cylindrical Applicator Microwave Systems Operating At 915 MHz" *Doktora Tezi*, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, (2005).
- Coronel, P., Truong, V., Simunovic, J., Sandeep, K. P., Cartwright, G. D., "Aseptic processing of sweetpotato purees using a continuous flow microwave system", *Journal of Food Science*, 70 (9): 531-536, (2005).

- Coronel, P., Simunovic, J., Sandeep, K. P., Cartwright, G. D., Kumar, P., "Sterilization solutions for aseptic processing using a continuous flow microwave system" *Journal of Food Engineering* 85 : 528–536, (2008).
- Cuccurollo, G., Giordano, L., Viccione, G., "An analytical approximation for continuous flow microwave heating of liquids" *Advances in Mechanical Engineering*, Article ID 929236, (2013)
- Cuccurollo, G., Giordano, L., Viccione, G., "Quantitative IR Thermography for continuous flow microwave heating" *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 9: 234-242, (2014).
- Deng, J., "Modeling microwave heating of apple cylinders using hybrid mixture theory based transport equations coupled with Maxwell's laws of electromagnetism", Graduate College of University of Illinois, Yüksek Lisans Tezi, 12 s., (2014).
- Dev, S. R. S., Raghavan, G. S. V., Garipey, Y., "Dielectric properties of egg components and microwave heating for in-shell pasteurization of eggs", *Journal of Food Engineering*, 86:207–214, (2008).
- Dev, S. R. S., Orsat, V., Garipey, Y., Raghavan, G. S. V., Ruiz-Feria, C., "Selected post-heating properties of microwave or hot water heated egg white for in-shell pasteurization" , *International Journal of Food Properties*, 13:778–788, (2010).
- Dibben, D., "Electromagnetics: Fundamental aspects and numerical modeling" *Microwave Technology for Food Applications* (Editör: Datta, A. K., Anantheswaran, R. C.), Marcel Dekker Inc., New York, 1-28, (2001).
- Engin T., Öz H. R., Küçük, H., Çeşmeci, Ş. (Çeviri Editörleri), "Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları" Güven Bilimsel, İzmir, (2008). [Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications" 1st ed. (2002)]

- Erdoğdu, F., "Fundamentals of heat transfer in food processing", *Mathematical Modeling of Food Processing*, (Editör: Farid, M. M.) CRC Press, eBook-PDF, 69-78, (2010).
- Fellows, P. J. "Food Processing Technology", Ellis Horwood Limited, England, 348s., (1990).
- Geankoplis, C. J., *Transport Processes and Unit Operations* Third ed., Prentice-Hall International, (1993).
- Geedipalli, S. S. R., Rakesh, V., Datta, A. K., "Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens", *Journal of Food Engineering*, 82: 359-368, (2007).
- Gentry, T. S., Roberts, J. S., "Design and evaluation of a continuous flow microwave pasteurization system for apple cider" *LWT* 38: 227–238, (2005).
- Guan, D., Cheng, M., Wang, Y., Tang, J. "Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes", *Food Engineering and Physical Properties*, 69: 30-37, (2004).
- Hossan, M. R., Byun, D., Dutta, P., "Analysis of microwave heating for cylindrical shaped objects", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 5129–5138, (2010).
- Isaksson, S., "Tubular microwave heating" Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Chalmers University of Technology, İsveç, (2002).
- Kalb, C. E., Seader, J. D., " Heat and mass transfer phenomena for viscous flow in curved circular tubes", *Journal of Heat and Mass Transfer*, 15: 801-817, (1972).
- Komarov, V. V., Tang, J., "Dielectric permittivity and loss factor of tap water at 915 MHz" *Microwave And Optical Technology Letters*, 42 (5) : 419-420, (2004).

- Knoerzer, K., Regier, M., Schubert, H., "A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications", *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9:374–384, (2008).
- Koskiniemi, C. B., Truong, V., Simunovic, J., Mcfeeters, R. F., "Improvement of heating uniformity in packaged acidified vegetables pasteurized with a 915 MHz continuous microwave system", *Journal of Food Engineering* 105:149–160, (2011).
- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., Saravacos, G. D., "Rheological Properties of Fluid Fruit and Vegetable Puree Products: Compilation of Literature Data" *International Journal Of Food Properties*, 4(2):179–200, (2001).
- Kubair, V., Varrier, C. B. S., "Pressure Drop for Liquid Flow in Helical Coils" *Transactions: I. I. Ch. E.*, 16: 93-97, (1962).
- Kumar, P., Coronel, P., Truong, V. D., Simunovic, J., Swartzel, K. R., Sandeep, K. P., Cartwright, "Overcoming issues associated with the scale-up of a continuous flow microwave system for aseptic processing of vegetable purees", *Food Research International* 41:454–461, (2008).
- Knutson, L. R., Meissner, G. W., "Oven protective device", US3281567 A, Patent, 25.10.1966.
- Kumar, V., Saini, S., Sharma, M., Nigam, K. D. P., "Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger", *Chemical Engineering Science* 61 : 4403 – 4416, (2006).
- Lau, M. H., Tang, J., "Pasteurization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves", *Journal of Food Engineering*, 51(4): 283-290, (2002).
- Meda, V., Orsat, V., Raghavan, V., "Microwave heating and the dielectric properties of foods", *The Microwave Processing of Foods*, 1st ed. (Editör: Schubert, H., Regier, M.), WoodHead Publishing, 61-73, (2005).

Meredith, A. C., Metaxas, R. J., "Industrial Microwave Heating" Peter Peregrinus Ltd., London, (1993).

Muley, P. D., Boldor, D., "Multiphysics numerical modeling of the continuous flow microwave-assisted transesterification process", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 46 (3): 139-162, (2012).

Masliyah, J. H., "On laminar flow in curved semicircular ducts", *Journal of Fluid Mechanics*, 99(3):469-479, (1980).

Nikdel, S., MacKellar, D. G., " A microwave system for continuous pasteurization of orange juice" *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 105:108-110, (1992).

Nikdel, S., Chen, C. S., Parish, M. E., MacKellar, D. G., & Friedrich, L. M. "Pasteurization of citrus juice with microwave energy in a continuous-flow unit", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41: 2116–2119, (1993).

Nordqvist, S., "Microwave heating of butter cream mixture, investigation of process conditions, product quality and production efficiency" *Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, İsveç*, (2011).

Palazoğlu, T. K., "Effect of holding tube configuration and curvature ratio on the residence time distribution of multiple particles in helical tube flow", *Doktora Tezi, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh*, (2001).

Palazoğlu, T. K., Sandeep, K. P., " Computational fluid dynamics modeling of fluid flow in helical tubes", *Journal of Food Process Engineering* 25:141-158, (2002).

Palazoğlu, T. K., Sandeep, K. P., " Effect of tube curvature ratio on the residence time distribution of multiple particles in helical tubes", *Lebensm.-Wiss. u.- Technol.* 37: 387–39, (2004).

- Peyre, F., Datta, A., Seyler, C., Influence of the dielectric property on microwave oven heating patterns: Application to food Materials", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 32 (1): 3-15, (1997).
- Pitchai, K., Birla, S. L., Subbiah, J., Jones, D., Thippareddi, H. " Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens" *Journal of Food Engineering*, 112:100-111. (2012).
- Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., Gonzalez, R., Jones, D., Subbiah, J., " 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, (2014).
- Prabhanjan, D. G., Raghavan, G. S. V., Rennie, T. J., "Comparison of heat transfer rates between straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 29(2): 185-191, (2002).
- Prosetya, H., Datta, A., "Batch microwave heating of liquids: an experimental study", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 26(4): 215-226, (1991).
- Püschner, P., "Improving microwave process control", *The Microwave Processing of Foods*, 1st ed. (Editör: Schubert, H., Regier, M.), WoodHead Publishing, 264-291, (2005).
- Raaholt, B. W., Janestad, H., Isaksson, S., "Continuous microwave heating of pumpable foods: examples of two potential applications" *AMPERE Bildiri Kitabı*, Toulouse, 298-301, (2011).
- Rakesh, V., Seo, Y., Datta, A. K., McCarthy, K. L., McCarthy, M. J., "Heat Transfer during microwave combination heating: Computational Modeling and MRI experiments", *American Institute of Chemical Engineers*, 56(9): 2468-2478, (2010).

- Ramaswamy, H. S., Singh, R. P., "Sterilization process engineering" Handbook of Food Practice Engineering (Editör: Valentas, K. J., Rotstein, E., Singh, R. P.), CRC Press, New York, 46-78, (1997).
- Rennie, T. J., "Numerical and Experimental Studies of a Double-Pipe Helical Pipe Heat Exchanger" Doktora Tezi, Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal, (2004).
- Sabliov, C. M., Salvi, D. A., Boldor, D. "High frequency electromagnetism, heat transfer and fluid flow coupling in ANSYS multiphysics", International Microwave Power Institute, 41-4: 5-17, (2007).
- Sabliov, C. M., Boldor, D., Coronel P., Sanders, T. H. "Continuous microwave processing of peanut beverages" Journal of Food Processing and Preservation 32: 935–945, (2008).
- Salazar-Gonzalez, C., San Martin-Gonzalez, M. F., Lopez-Malo, A., Sosa-Morales, M. E., "Recent studies related to Microwave Processing" Food and Bioprocess Technology, 5 (1): 31-46, (2012).
- Salvi, D., Ortego, J., Arauz, C., Sabliov, C. M., Boldor, D., "Experimental study of the effect of dielectric and physical properties on temperature distribution in fluids during continuous flow microwave heating", Journal of Food Engineering, 93: 149–157, (2009).
- Salvi, D., Boldor, D., Ortego, J., Aita, G. M., Sabliov, C. M., "Numerical Modeling of Continuous Flow Microwave Heating: A Critical Comparison of COMSOL and ANSYS", Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 44 (4): 187-197, (2010).
- Salvi, D., Boldor, D., Aita, G. M., Sabliov, C. M., "COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids", Journal of Food Engineering, 104: 422–429, (2011).

- Santos, T., Costa, L. C., Valente, M., Monteiro, J., Sousa, J., "3D electromagnetic field simulation in microwave ovens: a tool to control thermal runaway", COMSOL Conference, Paris, (2010).
- Saxena, A. K., Nigam, K. D. P., "On RTD for laminar flow in helical coils" Chemical Engineering Science, 34:425-426, (1979).
- Saxena, A. K., Nigam, K. D. P., "Coiled configuration for flow inversion and its effect on residence time distribution", AIChE Journal, 30(3):363-368, (1984).
- Schubert, H., Regier, M., "Introducing microwave processing of food: principles and technologies", The Microwave Processing of Foods, (Editör: Schubert, H., Regier, M.), CRC Press, North America, 3-22, (2005).
- Sierra, I., Vidal-Valverde, C., Olano, A. "The effects of continuous flow microwave treatment and conventional heating on the nutritional value of milk as shown by influence on vitamin b1 retention", Eur Food Res Technol, 209 :352–354, (1999).
- Soltysiak, M., Erle, U., Celuch, M., "Influence of the magnetron operating frequency on the results of microwave heating", Microwave Symposium Digest, 1436-1439, Anaheim, (2010).
- Steed, L. E., Truong, V. D., Simunovic, J., Sandeep, K. P., Kumar, P., Cartwright, G. D., Swartzel, K. R., "Continuous flow microwave-assisted processing and aseptic packaging of purple-fleshed sweetpotato purees" Journal of Food Science, 73(9):455-462, (2008).
- Steffe, J., "Rheological Methods in Food Process Engineering" Second Edition Freeman Press, USA, (1992).
- Schubert, H., Regier, M., "Introducing microwave processing of food: principles and Technologies" The microwave processing of foods, 1st ed. (Editör: Schubert, H., Regier, M.), CRC Press LLC , North America, 4-21, (2005).

- Sundberg, M., " Analysis of industrial microwave ovens" Doktora Tezi, Department of Microwave Technology, Chalmers University of Technology and The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Göteborg, (1998).
- Tajchakavit, S., Ramaswamy, H. S., "Continuous-flow microwave heating of orange juice: evidence of nonthermal effects" *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 30(3):141-148, (1995).
- Tajchakavit, S., Ramaswamy, H. S., Fustier, P. "Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating", *Food Research International*, 31(10): 713-722, (1998).
- Thostenson, E. T., Chou, T. W. "Microwave Processing: Fundamentals and Applications" *Composites: Part A* 30:1055–1071. (1999).
- Toledo, R. T., "Fundamentals of Food Process Engineering" Second Edition, An Aspen Publication, Aspen Publishers, Inc., Maryland, (1999).
- Vadivambal, R., Jayas, D. S., "Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—a review" *Food Bioprocess Technology*, 3:161–171, (2010).
- Vais, A. E., Palazoglu, T.K., Sandeep, K.P., Daubert, C. R., "Rheological characterization of carboxymethylcellulose solution under aseptic processing conditions" *Journal of Food Process Engineering* 25: 41-61, (2001).
- Valero, E., Villamiel, M., Sanz, J., Martinez-Castro, I. "Chemical and sensorial changes in milk pasteurised by microwave and conventional systems during cold storage", *Food Chemistry*, 70: 77-81, (2000).
- Villamiel M, Lopez Fandiño R, Corzo N, Martinez-Castro I, Olano A. "Effects of continuous flow microwave treatment on chemical and microbiological characteristics of milk", *Lebensm Untersuch Forsch* 202:15–8. (1996).

YAMCO " Producers of the highest quality aseptic processed sweet potato puree"
http://www.yamco.net/index.php?option=com_content&view=article&id=49
(26.03.2014).

Yakovlev, V. V., "Examination of contemporary electromagnetic software capable of modeling problems of microwave heating", 8th AMPERE Conference on Microwave and RF Heating, Bayreuth, 19-20, (2001).

Zhang, Q., Jackson, T. H., Ugan, A., "Numerical modeling of microwave induces natural convection" International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 (12): 2141-2154, (2000).

Zhang, H., Datta, A. K., "Electromagnetics of microwave heating: Magnitude and uniformity of energy absorbtion in an oven" Microwave Technology for Food Applications (Editör: Datta, A. K., Anantheswaran, R. C.), Marcel Dekker Inc., New York, 33-67, (2001).

Zhang, H., Datta, A. K., "Heating concentrations of microwaves in spherical and cylindrical foods Part One: in plane waves", Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing, 83(C1): 6–13, (2005a).

Zhang, H., Datta, A. K., "Heating concentrations of microwaves in spherical and cylindrical foods Part Two: in a Cavity", Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing, 83(C1): 14-21, (2005b).

Zhong, Q., Sandeep, K. P., Swartzel, K. R., "Continuous flow radio frequency heating of water and carboxymethylcellulose solutions" Journal of Food Science, 68(1):217-223, (2003).

Zhu, J., Kuznetsov, A. V., Sandeep, K. P., "Numerical simulation of forced convection in a duct subjected to microwave heating", Heat Mass Transfer 43: 255–264, (2007a).

Zhu, J., Kuznetsov, A. V., Sandeep, K. P., "Mathematical modeling of continuous flow microwave heating of liquids (effects of dielectric properties and design parameters)", *International Journal of Thermal Sciences*, 46:328-341, (2007b).

White, C. M., "Streamline flow through curved pipes", *Proceedings of the Royal Society of London*, 123(792): 645-663, (1929).

Wu, Z., Wang, L., Sundén, B., "Pressure drop and convective heat transfer of water and nanofluids in a double-pipe helical heat exchanger" *Applied Thermal Engineering*, 60:266-274, (2013).



ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: SEZİN TUTA

Doğum Tarihi: 22/09/1984

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	-	AYRANCI LİSESİ	1998-2002
Lisans	GIDA MÜHENDİSLİĞİ	MERSİN ÜNİVERSİTESİ	2002-2006
Yüksek Lisans	GIDA MÜHENDİSLİĞİ ABD	MERSİN ÜNİVERSİTESİ	2006-2009
Doktora	GIDA MÜHENDİSLİĞİ ABD	MERSİN ÜNİVERSİTESİ	2009-2015

(Varsa) Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
ARŞ. GÖR.	MERSİN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAK. GIDA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ	2006-2015

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Palazoğlu, T. K., Coşkun, Y., Tuta, S., Mogol, B.A., Gökmen, V. (2015), "Effect of Conventional-Vacuum Combined Baking of Cookies on Acrylamide Content, Texture And Color" European Food Research and Technology, 240:243–249.
2. Tuta, S., Palazoğlu, T. K., Gökmen, V. (2010), "Effect of Microwave Pre-Thawing of Frozen Potato Strips on Acrylamide Level and Quality of French Fries" Journal of Food Engineering, 97:261-266.
3. Tuta, S., Palazoğlu, T. K., "Continuous Flow Microwave Heating of Hard-to-Heat Fluid Food Products", 26-29 Mayıs 2014, Novel Approaches in Food Industry, İzmir (*Sözlü Sunum*).
4. Tuta, S., Palazoğlu T. K., Gökmen V., "Effect of Microwave Blanching on Acrylamide Content and Quality Attributes of French Fries", 22-26 Mayıs 2011, 11th International Congress on Engineering and Food, Atina (*Poster sunum*).
5. Tuta, S., Palazoğlu T. K., "Quality Attributes of Potato Chips Cooked by Two Different Methods: Baking and Frying", 26-29 Mayıs 2011, Novel Approaches in Food Industry, İzmir (*Poster sunum*).
6. Tuta, S., Palazoğlu T. K., "Muz Püresinin Pastörizasyon Sıcaklıklarındaki Reolojik Özellikleri", 9-10 Aralık 2010, 2. Gıda Güvenliği Kongresi, İstanbul (*Poster sunum*).

7. Tuta, S., Palazoğlu, T. K., Gökmen, V., "Dondurulmuş Patates Dilimlerine Uygulanan Mikrodalga ile Ön-Çözdürme İşleminin Parmak Patatesin Akrilamid İçeriği Ve Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi", 6-8 Kasım, Gıda Kongresi 2009, Antalya (*Poster sunum*).
8. Tuta, S., Erdoğan, F., Palazoğlu, T. K., "Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi Amacıyla Lumped Sistem Metodunun Uygulanması" , 8-10 Kasım, Gıda Kongresi 2007, Ankara (*Poster sunum*).

