

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSAN TEZİ

PORTATİF MİKRODALGA SİSTEM TASARIMI

Huseyn HUSEYNLİ

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2024**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PORTATİF MİKRODALGA SİSTEM TASARIMI

Huseyn HUSEYNLİ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Son zamanlarda yaşanan olaylar, afet bölgelerinde ve üretim alanlarında sağlıklı, hızlı ve minimum enerjiyle hazırlanabilen gıdalara olan ihtiyacı ortaya koymuştur. Geleneksel gıda işleme yöntemleri uzun süreler, yüksek enerji tüketimi ve atık sorunları yaratmaktadır. Bu nedenle, mikrodalga ısıtma gibi yenilikçi yöntemlere ihtiyaç artmaktadır. Mikrodalga ısıtma, kısa proses süreleri ve atık problemlerini ortadan kaldırma avantajı sunar.

Tez çalışması kapsamında, portatif bir mikrodalga sistem tasarımı gerçekleştirilmiş olup; bu sistem için kavite geometrisi ve magnetron konumu optimize edilmiştir. Temsili ürün matriksi olarak agar jeli, saf su ve %0.5 CMC çözeltileri kullanılarak tasarlanan sistemin küçük hacmi temelinde hızlı bir ısıtma işlemi gerçekleştirdiği konvansiyonel bir sistemle karşılaştırılarak gösterilmiştir. Bu kapsamda bir sistemin, güneş enerjisi ile şarj edilebilen pil teknolojisi geliştikçe, pilli bir sistem olarak üretilip kullanılabileceği ve afet bölgelerinde, kamplarda, askeri alanlarda ve lojistik hizmetlerinde verimli bir kullanıma sahip olabileceği düşünülmektedir.

Temmuz 2024, 64 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga, tasarım ve optimizasyon, portatif geometri

ABSTRACT

Master Thesis

PORTABLE MICROWAVE SYSTEM DESIGN

Huseyn HUSEYNLI

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Recent situations, specifically in natural disaster areas, have highlighted the requirement for nutritious food products that can be prepared fast and with the use of minimum energy. Conventional preparation approaches lead to longer times, higher energy consumption and waste problems in the area. Therefore, the need for innovative and efficient methods such as microwave heating has increased. Microwave heating offers the advantage of shorter processing times with energy efficiency and reduce the waste problems.

Within the scope of the thesis study, a portable microwave system was designed and manufacture. The cavity geometry and magnetron position were also optimized. Then, using agar gel, distilled water and 0.5% CMC solutions were used as a representative food product, and an efficient heating was demonstrated by comparing the results with a conventional system. This portable system is expected to improve its manufacturing style with the development in the chargeable batteries (e.g., chargeable batteries with sun energy). Such a system will be then used in an energy efficient and fast heating approach specially in the natural disaster areas, military camps and logistic services.

July 2024, 64 pages

Key Words: Microwave, design and optimization, portable geometry

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi yazarken bana destek olan, rehberlik eden ve katkı sağlayan herkese en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Öncelikle, danışmanım Prof. Dr. Ferruh Erdoğan'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı) sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresince göstermiş olduğu bilgi, tecrübe ve rehberlik benim için çok değerliydi. Kendisi, akademik gelişimime büyük katkılar sağladı ve bu süreçte bana ilham kaynağı oldu.

Ayrıca, araştırmalarım ve çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Ozan Karataş, Ozan Altın, Eda Coşkun, Hüseyin Topçam, Kübra Bulduk ve CFπ ekibinin diğer üyelerine teşekkürlerimi sunmak isterim. Özveriyle yardımları ve bilgi paylaşımı, tezimin daha nitelikli olmasını sağladı.

Bu süreçte bana her türlü desteği veren Hilal Sena Yıldırım, İlayda İşleyen, Başak Ener ve Dilara Ulu'ya da ayrıca minnettarım. Araştırma ve çalışma süreçlerimde birlikte çalışmaktan büyük keyif aldığım bu değerli arkadaşlarıma, sağladıkları moral ve motivasyon için teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca her daim yanımda olan sevgili annem Aynur Babayeva, babam Fuad Huseynov ve kız kardeşim Xuraman Huseynova'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların sevgisi, sabrı ve desteği olmadan bu başarıyı elde edemezdim. Bana inandıkları ve her zaman yanımda oldukları için onlara minnettarım.

Bu tez çalışması süresince bana destek olan tüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve aileme tekrar teşekkür ederim. Onların katkıları olmadan bu başarı mümkün olmazdı.

Bu tez çalışması, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen FBA-2024-3143 numaralı Genel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Huseyn HUSEYNLİ
Ankara, Temmuz 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	17
3.1 Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları	17
3.2 Konvansiyonel Sistemde Gerçekleştirilen DeneySEL Çalışmalar.....	19
3.3 Portatif Sistem Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları	23
3.4 Tasarlanan Portatif Sistemde Gerçekleştirilen DeneySEL Çalışmalar.....	23
3.5 Başlangıç ve Sınır koşulları	27
3.6 Matematiksel Modellerde Kullanılan Çözümleyiciler	29
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	30
4.1 Konvansiyonel Sistem Kullanılarak Gerçekleştirilen Matematiksel Model Çalışmaları	30
4.2 Portatif Sistem Optimizasyon Çalışmaları	35
4.2.1 Nelder ve Mead yöntemi	35
4.2.2 Monte Carlo yöntemi	35
4.3 Tasarlanan ve Üretimi Gerçekleştirilen Portatif Sistemde Gerçekleştirilen DeneySEL ve Matematiksel Model Doğrulama Çalışmaları	41
4.4 Konvansiyonel Sistemden Elde Edilen Sonuçlar ile Portatif Sistem Sonuçlarının Karşılaştırılması	52
5. SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	63

SİMGELER DİZİNİ

cm	Santimetre
°C	Santigrat Derece
dk.	Dakika
s	Saniye
ϵ'	Dielektrik Sabiti
ϵ''	Dielektrik Kayıp faktörü
ϵ_r	Permitivite
ϵ_0	Boşluğun geçirgenlik değeri (8.854×10^{-12} F/m)
μ_r	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluktaki manyetik geçirgenlik
f	Frekans (Hz)
f_c	Kesim frekansı (Hz)
c	Işık hızı (3×10^8 m/s)
d_p	Penetrasyon derinliği (cm)
Λ	Dalga boyu (cm)
$\tan \delta$	Tanjant kayıp faktörü
j	$\sqrt{-1}$ değeri
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{B}$	Manyetik akı şiddeti (Wb/m ²)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
$\vec{D}$	Elektrik akı yoğunluğu (C/m ²)
Q	Maddenin birim hacmi başına ısı üretim değeri (J/m ³ .s)
Hz	Hertz (1/s)
MHz	Mega Hertz
MPa	Mega Pascal
W	Watt (J/s)
kW	KiloWatt
K	Kelvin
rpm	Dakikada Devir
kg	Kilogram
C_p	Özgül ısısı (J/kg-K)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m-°C)
h	Isı transferi katsayısı (W/m ² -°C)
k	Dalga sayısı
h	Öz değeri
t	Zaman (s)

Kısaltmalar

MW	Mikrodalga
CMC	Karboksimetil selüloz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik-ısı transfer modeli akım şeması.....	13
Şekil 3.1 Konvansiyonel mikrodalga sistem.....	20
Şekil 3.2 Konvansiyonel sistem kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan polietilen kap.	20
Şekil 3.3 Konvansiyonel sistem içerisine yerleştirilmiş su örneği içerisinde sıcaklık ölçümü alınan noktaların yeri.....	21
Şekil 3.4 (a) sıcaklık veri toplama sistemi ve kullanılan fiber optik prob; (b) sıcaklık ölçümü sırasında problemleri sabitlemede kullanılan aparat.	22
Şekil 4.1 Konvansiyonel sistem kullanılarak gerçekleştirilen model çalışmaları kapsamında yapılan ağ bağımsızlık çalışmalarında kullanılan ağ yapıları. .	30
Şekil 4.2 Konvansiyonel sistem içerisine yerleştirilen su örneği hacimsel ortalama sıcaklık değişimine göre uygun ağ yapısına karar verilmesi (a) %100 ve (b) %50 güç opsiyonlarında elde edilen sıcaklık değişim değerleri.	31
Şekil 4.3 Konvansiyonel sistemde (%100 güç uygulamasında) gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması; (a) merkez ve (b) kenar nokta (Şekil 3.3).....	32
Şekil 4.4 Konvansiyonel sistemde (%50 güç uygulamasında) gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması; (a) merkez ve (b) kenar nokta (Şekil 3.3).....	33
Şekil 4.5 Konvansiyonel sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü).....	34
Şekil 4.6 Nelder ve Mead yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında elde edilen kavite geometrisinde ortaya çıkan elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü).....	37
Şekil 4.7 Monte Carlo yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında elde edilen kavite geometrisinde ortaya çıkan elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü).....	38
Şekil 4.8 Monte Carlo optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen optimum kavite boyutlarının (a) %20 ve (b)%10 kısaltılmasıyla elde edilen kavite geometrilerinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü).....	39
Şekil 4.9 (a) Kavite optimizasyonu yapılmış ve üretilmiş sistemin ölçüleri 24.5×22×15.5 cm) ve elektromanyetik alan dağılımının (b) önden ve (c) üstten görünümü.	40

Şekil 4.10 Tasarımına karar verilerek üretimi gerçekleştirilen sistem.	41
Şekil 4.11 Saf su kullanılarak, üretilen portatif sistemde elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırılması; (a) %100 ve (b) %50 güç uygulama koşulları.	43
Şekil 4.12 %0,5 CMC çözeltisi kullanılarak, üretilen portatif sistemde elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırılması; (a) %100 ve (b) %50 güç uygulama koşulları.....	44
Şekil 4.13 %2 Agar çözeltisi kullanılarak, üretilen portatif sistemde elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırılması; %100 güç uygulama koşulu.	45
Şekil 4.14 Saf su kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı ($t = 60s$).	46
Şekil 4.15 Saf su kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü- $t = 80s$).47	
Şekil 4.16 %0,5 CMC çözeltisi kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı ($t = 60s$).	48
Şekil 4.17 %0,5 CMC kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü- $t = 80s$).	49
Şekil 4.18 %2 agar çözeltisi kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı ($t = 40s$).	50
Şekil 4.19 %2 agar çözeltisi kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü- $t = 40s$).	51
Şekil 4.20 Saf su kullanılarak konvansiyonel sistemden elde edilen hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.21 %0,5 CMC çözeltisi kullanılarak konvansiyonel sistemden elde edilen hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.	54
Şekil 4.22 %2 Agar jeli kullanılarak konvansiyonel sistemden elde edilen hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması.....	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Mikrodalga ısıtma işlemde kullanılan saf su örneğinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.	19
Çizelge 3.2 Mikrodalga ısıtma işlemde kullanılan %0.5 CMC çözeltisi örneğinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.	25
Çizelge 3.3 Mikrodalga ısıtma işlemde kullanılan %2 agar örneğinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.	25
Çizelge 3.4 Mikrodalga ısıtma işlemde kullanılan %0.5 CMC çözeltisi örneğinin ısısal ve fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.	26
Çizelge 3.5 Mikrodalga ısıtma işlemde kullanılan %0.5 CMC çözeltisi örneğinin Power law temelinde kullanılan “M” ve “n” değerleri	26
Çizelge 3.6 Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan başlangıç koşulları.	27
Çizelge 3.7 Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan sınır koşulları.	28
Çizelge 4.1 Üç farklı optimizasyon yöntemi için kullanılan geometri parametreleri.	36
Çizelge 4.2 Konvansiyonel sistem ve portatif sistemde birim zamanda birim güç uygulaması ile elde edilen sıcaklık değişimi sonuçları $(q_{rate} \times 1000)$ ve hacimsel ortalama sıcaklık değeri temelinde 80 °C’ye ulaşmak için gerekli süre.	53

1. GİRİŞ

Son zamanlarda ülkemizde de olmak üzere dünyada meydana gelen doğal afetler insanların gıdaya doğru koşullarda ulaşımının önemini ortaya koymuştur. Gerek afet alanlarında gerekse üretim alanlarında minimum düzeyde enerji harcanarak gıdaların tüketime uygun hale getirilmesi önem arz etmektedir.

Dondurulmuş veya tüketime hazır gıdaların nihai tüketimden önce çözündürülmesi veya ısıtılmasının gerektiği durumlarda hem evlerde hem de işletmelerde geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler konvansiyonel ısıtma prensibine dayanmak olup tüplü ya da elektrikli ocak kullanımının bu bağlamda kullanılması zorunlu olan sistemlerdir. Bu sistemlerin afet bölgeleri gibi konumlarda kullanılması her ne kadar toplu tüketime yönelik olarak kolaylık sağlasa da farklı hijyenik sorunlar da büyük hacimli ürün hazırlanmasına bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Kişisel beslenmeyi sağlayacak optimal paketlerde hazırlanmış ürünlerin ise bu sistemlerde ısıtılarak tüketime hazır hale getirilmesi farklı ön hazırlık işlemlerine ihtiyaç duymaktadır. Örneğin küçük paketlerde hazırlanmış çorbaların ya da tabldot yemek gruplarının bu sistemlerde hazırlanması fiziksel olarak doğru olmayan bir sonuç ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda geleneksel yöntemlerin yerine, daha yüksek verimli ve yenilikçi teknolojilerin kullanılması gerekmektedir. Bu anlamda özellikle mikrodalga sistemler ile sağlanan yenilikçi ısıtma yöntemi yaygın olarak hem endüstriyel ortamda hem de günlük yaşamda sıklıkla kullanılabildiği gibi yukarıda tarif edilen özel durumlarda da kolaylıkla kullanılabilecektir. Ancak bu durumda da elektrik enerjisi ihtiyacı ve taşınabilir sistemin varlığı ortaya çıkması muhtemel durumlardır.

Mikrodalga uygulama, geleneksel proses yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Bunlardan en önemlileri, ısı transferi için ara ortama ihtiyaç duymaması, proses süresinin kısa olması ve atık oluşturmamasıdır. Geleneksel ısıtma işlem uygulamasına göre ürün içerisinde hacimsel olarak ısıtmaya olanak sağlayan mikrodalga sistemler kısa süre uygulaması ve buna bağlı olarak yüksek enerji verimliliği ile öne çıkan teknolojilerin başında gelmektedir. Yüksek avantajlara sahip mikrodalga sistemler birçok dezavantajı da bünyesinde barındırmaktadır. Bunlar arasında en dikkat çekici olan, mikrodalga sistem

içerisinde proses edilen gıda ürünlerinde tekdüze bir sıcaklık dağılımının elde edilememesi ve bazı lokal bölgelerde yanıkların oluşmasıdır. Ayrıca ısınmayan bölgelerin ürün içerisinde bulunması da kuvvetle muhtemel bir duruma işaret etmektedir. Literatürdeki çalışmalar (Shen vd., 2022; Topcam vd., 2020; Zhou vd., 2022; Radoiu ve Mello, 2022) incelendiğinde bu sorunun sistem içerisinde düzensiz bir şekilde oluşan elektromanyetik alandan kaynaklandığı açık ve net bir şekilde görülmektedir. Bu sorunun çözümü için yine literatürde birçok çalışma mevcuttur (Kadem vd., 2016; Yang ve Gunasekaran, 2004; Liu vd., 2005; Basak ve Kumaran, 2005; Chatterjee vd., 2007). Bu çalışmalarda mikrodalga sistemin kavite boyutlarında, mikrodalga enerjisini sağlayan magnetronların sistem içerisindeki yerleştirilmesinde, ürün kapasitesinde ve ürün konumlandırılmasında farklı optimizasyon çalışmaları yapılmıştır (Topcam ve Erdogdu, 2021). Ayrıca mikrodalga sistemlerin kavite ölçüleri ve kullanılan mikrodalga frekansı da doğrudan mikrodalga proses verimine etki etmektedir. Bu nedenle bu sistemlerin kullanım şekli, kullanım yeri ve ürün kapasitesine göre doğru bir frekans seçimi ve gerekli optimizasyon işlemlerinin yapılması gerekmektedir.

Ortaya çıkan acil durumlar göz önüne alındığında, hızlı bir şekilde gıdaların tekdüze bir şekilde hızlıca ısıtılması insanların acil beslenmesi için büyük bir önem arz etmektedir. Bu proje ile birlikte acil durumlarda kullanılmak üzere tamamen taşınabilir boyutlarda, bir insanın bir öğününü çok kısa bir sürede tüketime hazırlayabilecek bir mikrodalga sistemin prototip seviyesinde üretimi gerçekleştirilecektir. Bu prototip sistem, bu proje kapsamındaki üretimi ile, 220 V elektrik enerjisi ile çalışacaktır. Bu sistemin üretilmesi ile geliştirilen matematiksel model çalışmaları kapsamında farklı ürün grupları kullanılarak doğrulama çalışmaları da gerçekleştirilecektir. Şu anda THS 2 seviyesinde bulunan proje çalışma fikrinin, projenin tamamlanması ile THS 5 seviyesine çıkartılması hedeflenmektedir.

Mikrodalga fırınların içerisindeki hareketli dalga tüpü (traveling wave tube - TWT) veya klystron olarak adlandırılan ve ilgili frekansta (çoğunlukla 900 MHz veya 2.4 GHz'te) rezonans oluşturarak dalga yayılımı sağlayan bileşenler, anlık olarak çok yüksek akım çeken ve alternatif akım (Alternating Current - AC) ile çalışmakta olan elektromanyetik / mikrodalga devre elemanlarıdır. Günümüzdeki pil ve/veya batarya teknolojisi ise (gerek

şarj edilebilir, gerek şarj edilemez olan pil ve bataryalar) çoğunlukla nikel-kadmiyum (NiCd) veya lityum-iyon teknolojisine dayalı olup; doğru akım (Direct Current - DC) üreten elektrik kaynaklarıdır. Mevcut teknoloji ile pil ve/veya bataryaların hacimsel ve dolayısıyla elektriksel kapasiteleri artırıldığında; çoğunlukla toplam güç, yani kilowatt-saat cinsinden kapasitelerinin arttırılması mümkün olabilmektedir. Bu bilgiler ışığında, mevcut mikrodalga fırın ve ısıtma teknolojilerinin içerisindeki kritik bileşen olan hareketli dalga tüplerinin beslenmesi için ihtiyaç duyulan anlık yüksek güç değerlerine mevcut pil teknolojisi ile ulaşmak kolay olmasa da; ekonomik ve fiziksel olarak fizibilitesi çok düşük bir işlemdir. Hareketli dalga tüpünün ihtiyaç duyacağı anlık yüksek güç değerlerine ulaşabilecek piller çok büyük hacimli çok ağır ve çok pahalı olabilmekte olup; şarj edilebilir olmaları durumunda da şarj süreleri tolere edilemeyecek kadar yüksek olabilmektedir. Bunun yanı sıra pillerin DC ürettiği, hareketli dalga tüplerinin ise AC ile çalışıyor olmasından ötürü bu sistemlerin arasına yine yüksek maliyetli ve ağırlıklı DC-AC dönüştürücü devreler tasarlanması ve eklenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda halen üretimi olan sistemlerde de kullanım süresi fizibil değildir.

Sonuç olarak günümüz teknolojisi ile, "pille çalışan mikrodalga fırın" ekonomik ve fiziksel açıdan fizibilitesi düşük bir kavram olarak göze çarpmaktadır. Yakın geçmişte başlayan Rusya Ukrayna savaşı ve kıta Avrupa'sında yaşanmakta olan enerji krizi, OECD ülkeleri başta olmak üzere birçok ülkede enerji kaynakları ve özellikle batarya teknolojileri üzerindeki ArGe çalışmalarına ilişkin yeni yatırımlar yapılmasına neden olmuştur. Bu nedenle yakın gelecekte pil ve batarya teknolojilerinde devrimsel bir takım yenilikler olması; farklı teknolojik altyapılara dayalı, anlık güç kapasitesi çok yüksek ve çok daha hızlı şarj edilebilir yeni pil ve batarya teknolojilerinin geliştirilmesi söz konusu olacaktır. Dolayısıyla şu an itibarıyla ekonomik ve fiziksel anlamda fizibilitesi düşük olan "pille çalışan mikrodalga fırın kavramı"nın, yakın gelecekte pratikte uygulanabilir ve ticarileşebilir bir takım ürünler doğacak şekilde evrilebileceği tarafımızca değerlendirilmekte olup, proje kapsamında tasarım ve üretimi planlanan sistemin optimal kavite ölçülerinde enerji verimliliği yüksek olması bu bağlamda önemli bir aşama olacaktır. Taşınabilir mikrodalga tasarımının gerçekleştirilmesi ile mikrodalga endüstrisinde üçüncü bir alternatif sistemin ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Özellikle ev tipi mikrodalgaların amacından ödün vermeden geometrik anlamda

minimize edilmesi ile yeni bir taşınabilir sistem tasarımı ortaya çıkarılması planlanmaktadır. Kompakt mikrodalga tasarımı, magnetron, dalga kılavuzu ve kavite geometrisi bölümlerini içerecektir. Taşınabilir mikrodalga kavitede, ev tipi mikrodalgalarda kullanılan ve temini kolay olan 2450 MHz frekansa uygun magnetron ve dalga kılavuzu geometrisi kullanılacaktır. Tez çalışması kapsamında, ön çalışmalar ev tipi mikrodalgada tamamlanacak ve elde edilen deneysel veriler matematiksel modeller ile doğrulanacaktır. Doğrulan modelde daha sonra kavite boyutları, magnetron ve ürün için optimum konumlar belirlenecektir. Bu belirlemede elektromanyetik enerjinin ürüne en iyi şekilde odaklandığı optimum sistem boyutları dikkate alınacaktır. Tasarım ölçütleri modellerle belirlenecektir.

Bu sistemin avantajları ve potansiyel uygulamaları aşağıda sıralanmıştır:

Alandan tasarruf sağlayan tasarım: Kompakt mikrodalga sistemler, geleneksel mikrodalga fırınlardan daha küçük bir alana sahip olacak ve bu da onları sınırlı alana sahip ortamlarda hem taşınım hem de kullanım için ideal hale getirecektir. Bu sistemlerin, afet bölgeleri, kamp ve karavan hatta askeri anlamda uygulanabilir potansiyeli olması planlanmaktadır.

Verimli enerji: Bu sistemlerde, geleneksel mikrodalga fırınlara göre daha az güç kullanarak üst düzey ısıtma performansı hedeflenmektedir. Bu amaçla tasarlanan kavitelere ev tipi mikrodalgalarda görülen elektromanyetik alan kaçaklarının önüne geçilmesi planlanmaktadır. Özel olarak tasarlanan kavite geometrisi ve magnetron konumları sayesinde proses sırasında maksimum enerji verimi hedeflenmektedir.

Uygun maliyetli: Taşınabilir mikrodalga sistemlerin; geleneksel sistemlere kıyasla daha az malzeme ile üretimi hedeflenmektedir. İş bu kapsamda minimize edilmiş üretim maliyetleri beklenmektedir.

Bir mikrodalga sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan kavite ölçüleri ile ilişkili olup bu durum sistem uygulama ve proses verimini de etkilemektedir. Mikrodalga

sistemlerde, daha yüksek enerji elde etmek ve sistem içi elektromanyetik alan dağılımını tekdüze edebilmek amacıyla farklı sayıda magnetronlar kullanılırken; kişisel kullanımlarda kavite geometrisinin bu amaçla optimize edilmesi önmlü bir noktadır. Bu çalışmada da kompakt bir sistem geometrisi tasarımı ile maksimum verim ve mümkün olduğunca tekdüze bir elektrik alan dağılımının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda kişisel ihtiyaç amacıyla kullanılabilecek olan bu sistemde hızlı bir ürün ısıtma işlemi gerçekleştirilebilecektir. Projenin başarılı bir şekilde sonuçlanması ile her türlü acil durumlarda kullanılmaya hazır bir sistemin tasarımı gerçekleştirilmiş olacaktır. Buna göre bu sistemin enerji ihtiyacının farklı yenilenebilir kaynaklardan (rüzgar, güneş, vb.) elde edilmesinin de sağlanması durumunda afet bölgeleri gibi, farklı ihtiyaç gösteren durumlarda da kullanılabilecek bir sistemin üretimine katkı sağlanmış olacaktır.

Mikrodalga fırınların içerisindeki hareketli dalga tüpü (traveling wave tube - TWT) veya klystron olarak adlandırılan ve ilgili frekansta (çoğunlukla 900 MHz veya 2.4 GHz'te) rezonans oluşturarak dalga yayılımı sağlayan bileşenler, anlık olarak çok yüksek akım çeken ve alternatif akım (Alternating Current - AC) ile çalışmakta olan elektromanyetik / mikrodalga devre elemanlarıdır. Günümüzdeki pil ve/veya batarya teknolojisi ise (gerek şarj edilebilir, gerek şarj edilemez olan pil ve bataryalar) çoğunlukla nikel-kadmiyum (NiCd) veya lityum-iyon teknolojisine dayalı olup; doğru akım (Direct Current - DC) üreten elektrik kaynaklarıdır. Mevcut teknoloji ile pil ve/veya bataryaların hacimsel ve dolayısıyla elektriksel kapasiteleri artırıldığında; çoğunlukla toplam güç, yani kilowatt-saat cinsinden kapasitelerinin arttırılması mümkün olabilmektedir. Ancak anlık güç ve anlık akım kapasitelerinin arttırılması ise pek mümkün olamamaktadır. Bu bilgiler ışığında, mevcut mikrodalga fırın ve ısıtma teknolojilerinin içerisindeki kritik bileşen olan hareketli dalga tüplerinin beslenmesi için ihtiyaç duyulan anlık yüksek güç değerlerine mevcut pil teknolojisi ile ulaşmak tam anlamıyla imkansız olmasa da; ekonomik ve fiziksel olarak fizibilitesi çok düşük bir işlemdir. Hareketli dalga tüpünün ihtiyaç duyacağı anlık yüksek güç değerlerine ulaşabilecek piller çok büyük hacimli çok ağır ve çok pahalı olabilmekte olup; şarj edilebilir olmaları durumunda da şarj süreleri tolere edilemeyecek kadar yüksek olabilmektedir. Bunun yanı sıra pillerin DC ürettiyor, hareketli dalga tüplerinin ise AC ile çalışıyor olmasından ötürü bu sistemlerin arasına yine yüksek maliyet hacim ve ağırlıklı DC-AC dönüştürücü devreler tasarlanması ve

eklenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak günümüz teknolojisi ile, "pille çalışan mikrodalga fırın" ekonomik ve fiziksel açıdan fizibilitesi düşük bir kavram olarak göze çarpmaktadır. Yakın geçmişte başlayan Rusya Ukrayna savaşı ve kıta Avrupa'sında yaşanmakta olan enerji krizi, OECD ülkeleri başta olmak üzere birçok ülkede enerji kaynakları ve özellikle batarya teknolojileri üzerindeki ArGe çalışmalarına ilişkin yeni yatırımlar yapılmasına neden olmuştur. Bu nedenle yakın gelecekte pil ve batarya teknolojilerinde devrimsel bir takım yenilikler olması; farklı teknolojik altyapılara dayalı, anlık güç kapasitesi çok yüksek ve çok daha hızlı şarj edilebilir yeni pil ve batarya teknolojilerinin geliştirilmesi söz konusu olacaktır. Ancak, bu proje neticesinde elde edilecek bilgi birikimi daha sonraki projelerde aktif olarak kullanılacak olup devam edecek olan çalışmalar kapsamında, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilecek olan sistemin, güneş ya da rüzgar enerjisi ile kullanılabilmesi konusunda da proje planları yapılacaktır. Ayrıca, şu an itibarıyla ekonomik ve fiziksel anlamda fizibilitesi düşük olan "pille çalışan mikrodalga fırın kavramı"nın, yakın gelecekte pratikte uygulanabilir ve ticarileşebilir ürünler doğacak şekilde evrilebileceği de değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, kompakt mikrodalga sistemleri, geleneksel mikrodalga fırınlara göre yerden tasarruf sağlayan tasarım, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar. Gelişen teknoloji sayesinde kompakt mikrodalga sistemlerinin, yiyecekleri pişirmek ve ısıtmak için daha uygun ve verimli bir yol sağlayarak mikrodalga endüstrisinde devrim yaratmaya devam etmesi muhtemel olmakla birlikte afet alanlarında, orduda hatta lojistik hizmetlerinin kullanımında yer alması beklenmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilmesi planlanan portatif mikrodalga sistemde, mikrodalga sistem kavitesinin geometrik ölçüleri ve mikrodalga enerjinin üretildiği magnetronun sistemdeki konumu sistem tasarımı kapsamında kullanılacak ve optimum geometri ölçülerine bağlı olarak prototip seviyedeki sistemin üretimi ve elde edilen sonuçların konvansiyonel bir sistemden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması ile tez çalışması tamamlanacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Mikrodalga teknolojisi, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bandını (300 MHz - 300 GHz) kullanarak çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu teknoloji, iletişim, radar, tıbbi tedavi ve endüstriyel işlemler gibi geniş bir kullanım alanına sahip olup yüksek veri iletim hızları ve radar sistemlerinde hassas algılama gibi uygulamalarda kullanılır (Kizer, 2013). Mikrodalgalar, bir mikrodalga jeneratörü tarafından üretilmekte olup; bu jeneratörler, genellikle klystron, magnetron veya solid-state cihazlar gibi yüksek frekanslı osilatörler kullanır. Mikrodalgaların yayılımı, serbest uzayda veya dalga kılavuzları (waveguides) içinde gerçekleşir. Serbest uzayda yayılım, doğrusal bir yol izlerken, dalga kılavuzları içinde yayılım, iletim hattı boyunca gerçekleşir (Pozar, 2012). Mikrodalga devreleri, mikrodalga sinyallerini işlemek için kullanılan bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler arasında, filtreler, amplifikatörler, osilatörler ve mikrodalga antenleri bulunur. Bu elemanlar, mikrodalga sinyallerinin frekans seçimi, genlik kontrolü ve yönlendirilmesi gibi işlemleri gerçekleştirir. Örneğin, mikrodalga filtreleri, belirli frekans aralıklarını seçerek veya engelleyerek sinyal işleme işlemlerini optimize eder (Collin, 2001). Mikrodalga devreleri, mikrodalga sinyallerini işlemek için çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler arasında, filtreler, amplifikatörler, osilatörler ve antenler bulunur. Mikrodalga filtreleri, belirli frekans aralıklarını seçmek veya engellemek için kullanılır. Filtreler, istenmeyen sinyalleri engelleyerek veya istenen frekansları seçerek sinyal kalitesini artırır. Amplifikatörler, mikrodalga sinyallerini güçlendirir ve genellikle iletişim sistemlerinde kullanılır. Amplifikatörler, zayıf sinyalleri kuvvetlendirerek daha uzun mesafelerde iletim sağlar (Liao, 2016). Osilatörler, mikrodalga frekanslarında sürekli dalgalar üretir. Osilatörler, sabit bir frekansta sürekli bir mikrodalga sinyali üreterek, iletişim ve radar sistemlerinde kullanılmaktadır (Balanis, 2016).

Konvansiyonel kullanımda, mikrodalga fırınlar, modern mutfakların vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve yiyeceklerin hızlı ve verimli bir şekilde ısıtılmasını sağlamıştır. Mikrodalga fırınların tarihsel gelişimi, bilimsel buluşlardan ticari ürünlere kadar uzanan bir süreçtir. Mikrodalga fırınların tarihi, 1940'lı yıllara kadar uzanmaktadır. Mikrodalgaların ısıtma potansiyelinin keşfi, II. Dünya Savaşı sırasında radar

teknolojisinde çalışan Percy Spencer'in çalışmalarıyla başlamıştır. Spencer, radar ekipmanları üzerinde çalışırken, cebinde bulunan çikolatanın eridiğini fark etti. Bu olay, mikrodalgaların yiyecekleri ısıtma yeteneğini ortaya koymuştur (Osepchuk, 1984). Percy Spencer'in bu keşfi, mikrodalga fırınların gelişimine öncülük etmiş ve 1945 yılında, Raytheon şirketi ilk mikrodalga fırın prototipini geliştirmiştir. Bu ilk mikrodalga fırın, "Radarange" adıyla bilinmekte olup oldukça büyük ve pahalıydı. Radarange, ticari mutfaklarda ve askeri tesislerde kullanılırken ev kullanımı için uygun olarak değerlendirilmemiştir (Osepchuk, 1984).

Mikrodalga fırınların ev kullanımı için uygun hale gelmesi, 1960'lı yıllarda gerçekleşmiştir. Bu dönemde, teknolojik ilerlemeler ve üretim maliyetlerindeki düşüş, mikrodalga fırınların daha kompakt ve ekonomik hale gelmesini sağlamış; 1967 yılında, Amana şirketi ilk ev tipi mikrodalga fırını piyasaya sürmüştür. Bu fırın, daha küçük boyutları ve daha uygun fiyatıyla ev kullanıcıları arasında popülerlik kazanmıştır (Littman, 2005). 1970'li yıllar, mikrodalga fırınların hızla yaygınlaştığı bir dönem olmuştur. Ayrıca, mikrodalga fırınların pişirme sürelerini kısaltması ve enerji verimliliği, bu cihazların ev mutfaklarında tercih edilmesine katkıda bulunmuştur (Moran, 2014). 1980'li yıllarda ise mikrodalga fırınlar dünya genelinde yaygınlaşmaya başlamış; Japonya, Avrupa ve Amerika'da mikrodalga fırın kullanımı hızla artmıştır. Bu dönemde, mikrodalga fırın üreticileri, cihazların özelliklerini ve tasarımlarını geliştirerek, kullanıcıların farklı ihtiyaçlarına cevap veren modeller üretmişler ve mikrodalga fırınların dijital kontroller, otomatik pişirme programları ve güvenlik özellikleri gibi yeniliklerle donatılması, bu cihazların daha kullanışlı ve güvenilir hale gelmesini sağlamıştır (Nakayama, 1991).

Mikrodalga teknolojisi, gıda endüstrisinde çözülme, ısıtma, ağartma, pastörizasyon, sterilizasyon, pişirme, kurutma ve kızartma işlemlerinde kullanılmaktadır (Decareau, 1986; Venkatesh ve Raghavan, 2004). Geleneksel pişirme yöntemlerine kıyasla mikrodalgalar daha az kullanılsa da, yemek firmaları tarafından hazır gıdaları ısıtmak için tercih edilmektedir (Campanone ve Zaritzky, 2005).

Son yıllarda mikrodalga pişirme üzerine yapılan araştırmalar artmıştır. Mikrodalga pişirme, ısının gıdanın içinde hacimsel olarak oluşması, istenilen son sıcaklığa daha kısa sürede ulaşılması, daha üniform pişirme sağlaması ve enerji tasarrufu gibi avantajlar sunar (Yarmand, 2011). Jouquand ve diğerleri (2015) mikrodalga pişirme süreçlerini optimize ederek, geleneksel pişirmeye göre %56 daha az zaman harcarken daha düşük enerji tüketildiğini tespit etmişlerdir. Mikrodalga pişirmenin avantajlarının yanı sıra, gıdanın yeterince esmerleşememesi, ısıl üniformluk sağlamada eksiklikler, bazı besin değerlerinde kayıplar ve istenmeyen tekstür oluşumu gibi dezavantajları da vardır (İçöz ve diğerleri, 2004; Uzzan ve diğerleri, 2006; Mizrahi, 2012).

Konvansiyonel mikrodalga sistemler; magnetron, dalga kılavuzu ve kavite olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Elektrik enerjisini elektromanyetik enerjiye dönüştüren magnetronlar, üretilen elektromanyetik dalgaları dalga kılavuzları ile kaviteye doğru iletir. Kavitenin geometrisi, boyutu ve ısıtılan gıda ürününün dielektrik özelliklerine bağlı olarak gıdalarda ısınma gerçekleşir (Cooper, 2009). Mikrodalgalar 300 MHz - 300 GHz frekans aralığında iyonize olmayan elektromanyetik alan oluştururlar (Marra vd. 2009). Ev tipi mikrodalga sistemlerinde 2450 MHz frekans, endüstriyel sistemlerde ise 915 MHz frekanslı dalga üreten magnetronlar kullanılmaktadır. Mikrodalga uygulamada ısı işlem, iyonik kondüksiyon ve dipolar rotasyon olmak üzere iki temel mekanizma ile gerçekleşmektedir. İyonik kondüksiyon, uygulanan elektrik alan şiddetinin bir sonucu olarak serbest iyonların harekete geçmesi ve oluşan sürtünmenin etkisi ile hacimsel ısınmanın sağlanması olarak açıklanır. Polar bileşiklerin (su molekülleri) elektromanyetik salınımda rotasyon hareketini gerçekleştirmesi dipolar rotasyon olarak adlandırılmaktadır. Yüksek frekanslı bir elektriksel alanda dönme hareketi frekansa bağlı olarak saniyede milyarlarca kez tekrarlanmakta ve sonuçta oluşan sürtünme sonucu ısınma gerçekleşmektedir (Mello vd. 2014). Mikrodalga fırın tasarımında en önemli unsurlardan biri, enerji verimliliğidir. Enerji verimliliğini artırmak için yapılan araştırmalar, mikrodalga jeneratörlerinin ve fırın iç yapısının optimize edilmesine odaklanmıştır. Örneğin, Wang ve arkadaşları (2019), mikrodalga fırınlarda kullanılan magnetronların verimliliğini artırmak için yeni tasarım yöntemleri geliştirmiştir. Bu yöntemler, magnetronların daha yüksek verimlilikle çalışmasını sağlayarak enerji tüketimini azaltmaktadır (Wang et al., 2019).

Kullanılan mikrodalga sistemler hızlı, enerji tasarrufu ve kullanım kolaylığı bakımından öne çıkmaktadır (Bhatnagar ve Patel, 2017). Ancak sistem içerisinde oluşan düzensiz elektromanyetik alan dağılımı ürünlerde tekdüze olmayan sıcaklık profilleri oluşturmakta ve bu da mikrodalga sistemlerin en büyük problemi olarak göze çarpmaktadır (Gupta ve Kumar, 2016). Mikrodalga uygulama geleneksel yöntemlere göre alternatif yeni bir yaklaşım olarak görülmektedir. Bunun en büyük sebebi ise mikrodalga proseslerin hacimsel ısıtmaya olanak sağlamasıdır. Ayrıca yapılan son çalışmalar incelendiğinde daha kısa sürede biten mikrodalga prosesler, çevreye daha az zarar vermekte ve daha çevreci bir proses olarak görülmektedir. Mikrodalga kavite geometrilerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu değişikliklerin proses etkinliğini artırdığı görülmüştür. (Basak ve Meenakshi, 2006; Karatas ve ark., 2022; Kumar ve ark., 2008; Nikdel ve ark., 1993; Salvi ve ark., 2011; Topcam ve Erdogdu, 2021; Topcam ve ark., 2020; Tuta ve Palazoglu, 2017; Yang ve ark., 2022; Zhou ve ark., 1995; Topcam ve ark., 2023). Bu bağlamda kavite geometrisinin etkisi de göz önüne alınması gerekli bir kriter olarak göze çarpmaktadır. Silindirik bir endüstriyel mikrodalga kavitesinde yapılan modelleme çalışmasında, silindir kavitenin çapındaki değişikliğin sistem içerisinde bulunan ürünlerin sıcaklık dağılımını iyileştirdiği görülmüştür (Zhu ve ark., 2007). Sürekli akışın olduğu bir mikrodalga sisteminde kullanılan eliptik kavite geometrileri de sistem içerisinde düzenli elektromanyetik alan oluşumuna katkı sağlamıştır (Coronel ve ark., 2008). Ayrıca kavite içerisinde bulunan gıda örneklerinin farklı hızlarda kendi eksenini etrafında döndürülmesi sonucunda ürünlerdeki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark azalmıştır ve ürünlerde daha tekdüze bir sıcaklık dağılımı görülmüştür (Topcam ve ark., 2020). Tüm bunlara karşın, gıda endüstrisinde halen dikdörtgenler prizması şeklindeki mikrodalga kaviteler en çok tercih edilen kavite türüdür. Ancak farklı çeşit mikrodalga kaviteler üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde eliptik geometriye sahip mikrodalga kavitelerin sistem içerisinde daha düzenli elektromanyetik alan oluşturduğu ve buna bağlı olarak ürünler üzerinde daha yüksek bir ısıtma sağladığı görülmüştür (Altın ve ark., 2022). Literatürdeki çalışmalar genel anlamda incelendiğinde, mikrodalga sistemlerin geleneksel yöntemlere göre oldukça avantajlı ve hızlı olduğu görülmektedir. Ancak bu sistemlerde tam bir kontrol sağlanmasının da oldukça zor olduğu görülmüştür. Matematiksel modelleme yönteminin kullanılması ile, mikrodalga sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alanın etkileri de daha kolay bir şekilde görülmektedir.

Mikrodalga ısıtmanın büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarını sınırlayan bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklardan biri düşük güç verimliliğidir. Çok modlu mikrodalga rezonatörlerde düşük güç verimliliği, yüksek yansıma katsayısının bir sonucudur. Rezonatördeki elektrik alan dağılımı, rezonatörün şekli ve boyutu, çalışma frekansı, işlenecek malzemenin şekli, boyutu ve dielektrik özellikleri, işlenecek malzemenin rezonatör içindeki konumu ve besleme kılavuzunun rezonatördeki konumu gibi faktörlere bağlıdır (Vadivambal et al., 2010). Mikrodalga ısıtma işleminde istenen hedeflerden biri, ısıtılacak malzeme üzerindeki ve rezonatördeki elektrik alan dağılımının düzgün olmasıdır, çünkü elde edilecek malzemenin kalitesi buna bağlıdır. Mikrodalga fırınların tasarımı ve optimizasyonu için rezonatör içindeki elektrik alan dağılımının bilinmesi önemlidir. Ancak hem tek modlu hem de çok modlu yüklü rezonatörler için elektrik alan dağılımının analitik olarak belirlenmesi oldukça zordur (Vadivambal et al., 2010). Prado et al. (2004), Perez et al. (2005), Molina et al. (2007a, 2007b) çalışmalarında, dalga kılavuzundaki yansıyan gücü azaltmak için malzemenin konulması gereken yeri belirlemek için farklı yöntemler kullanmışlardır. Yansıyan gücün az olması, hem magnetronun ömrünü hem de sistem verimini artırmaktadır. Bu nedenle, ısıtılacak malzemenin rezonatöre konulduğu yerin bilinmesi çok önemlidir. Dalga kılavuzunda minimum enerji yansıması sağlayan yükün uygun yerini bulmak için farklı optimizasyon yöntemleri uygulamışlardır. Gonzalez et al. (2004), Cabrera et al. (2004), Elsa et al. (2005), istenmeyen yansımaların ortaya çıkmasını önlemek ve çok modlu mikrodalga ısıtma fırınlarında daha yüksek verim elde etmek için ısıtılacak malzemenin etrafında çok katmanlı dielektrik materyalin tasarımını yapmışlardır. Ek dielektrik katman kullanılması, rezonatör içindeki yansıma katsayısını azaltmak ve ısıtılan malzemedeki yüksek güç soğurma oranını sağlamak için yapılmıştır. Farklı yöntemler kullanarak ısıtılacak malzemenin üzerine yerleştirilecek iki dielektrik katmanın değerlerini belirlemişlerdir. Ek katmanlar kullanarak yansıma katsayısının azaldığını ve rezonatör içindeki verimin artırılabilceğini göstermişlerdir. Pitarch et al. (2003), Balbastre et al. (2007), çok modlu mikrodalga rezonatördeki elektrik alan dağılımının üniform olmasında GA optimizasyonu kullanarak optimum dalga kılavuzu besleme konumlarını belirlemişlerdir. Chaum et al. (2009), dikdörtgen dalga kılavuzundaki dielektrik materyeli mikrodalga enerjisi ile ısıtmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, mikrodalga güç seviyesi, dielektrik malzeme türü, malzemenin boyutu ve kılavuzdaki

konumunun etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, malzemenin dalga kılavuzu içerisine farklı yerleştirilmesinin, malzeme içindeki sıcaklık ve emilen güç üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermişlerdir. Idris (2016) ise çok modlu mikrodalga rezonatörleri kullanarak malzemelerin boyutu, geometrisi ve özelliklerinin verim ve ısıtma düzgünlüğü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmalar, mikrodalga ısıtma sistemlerinin verimliliğini ve performansını artırmak için yapılan çeşitli araştırmaları ve uygulamaları içermektedir. Mikrodalga fırın tasarımı ve optimizasyonu için bu tür deneysel ve simülasyon çalışmalarının önemi büyüktür.

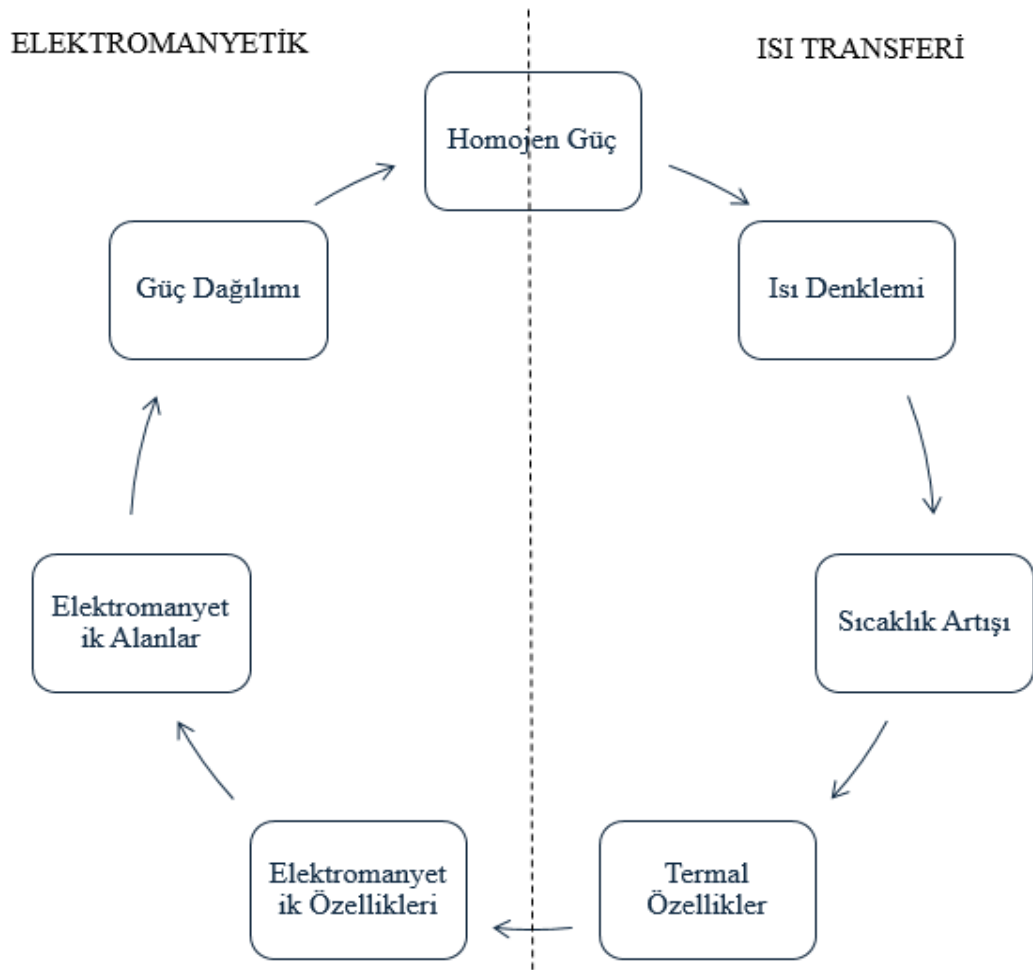
Verimliliğin artırılması ve elektrik alan dağılımının homojen hale getirilmesi için birçok deneysel ve simülasyon çalışması yapılmıştır. Geleneksel olarak, malzemenin rezonatör içinde hareket ettirilerek veya döndürülerek, mod karıştırıcılar kullanılarak, çoklu besleme sistemleri kullanılarak veya bu tekniklerin kombinasyonu uygulanarak üniform elektrik alan dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır (Mehrdad, 2009; Datta et al., 2001). Hong et al. (2017), mikrodalga fırınlarda sıcaklık dağılımının homojenliğini artırmak için çok malzemeli bir döner tabla yapısı önermişlerdir. Döner tabaklar ile mikrodalga fırında ısıtma işlemi için birleştirilmiş model sunmuş ve döner tabla bileşenlerinin ısıtma düzgünlüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Mikrodalga sistemlerde düzenli sıcaklık profilinin oluşturulması için mikrodalga kavite geometrisinin seçimi, kavite ölçüleri, kullanılan magnetronun konumu, sistem içerisine yerleştirilen ürünlerin konumu ve sistem içerisindeki hareketlerinin sistematik bir şekilde düzenlenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir. Ancak bu şekilde çok yüksek verimli mikrodalga prosesler meydana gelebilir. Bu tez çalışması kapsamında, yukarıda belirtilen sistem parametreleri matematiksel modelleme yöntemi ile optimize edilerek kompakt bir mikrodalga sistemin tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilecektir. Literatür çalışmaları kapsamında bu temelde bir matematiksel model çalışmasının ana bileşenleri Şekil 1.1.'de sunulmuştur.

Kullanım kolaylığı, mikrodalga fırın tasarımında dikkate alınan bir diğer faktördür. Mikrodalga fırınlar, genellikle hızlı ve pratik yemek pişirme için kullanıldığından, kullanıcı dostu bir tasarıma sahip olmaları önemlidir. Bu bağlamda yapılan araştırmalar,

mikrodalga fırınların kontrol panelleri, programlanabilir pişirme seçenekleri ve otomatik kapanma gibi özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Park ve Lee (2019), mikrodalga fırın kontrol panellerinin kullanıcı arayüzlerini daha sezgisel hale getirmek için bir dizi tasarım önerisi sunmuştur (Park & Lee, 2019).

Pişirme ve ısıtıl işlem performansı, mikrodalga fırın tasarımının bir diğer kritik bileşenidir. Mikrodalga fırınların, yiyecekleri eşit şekilde ısıtması ve pişirmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan araştırmalar, mikrodalga dağılımını optimize etmek için iç yapı tasarımlarını incelemektedir. Örneğin, Martinez ve arkadaşları (2021), mikrodalga fırın içindeki dalga dağılımını kullanarak fırın iç yapısını optimize etmiştir (Martinez et al., 2021).



Şekil 2.1 Elektromanyetik-ısı transfer modeli akım şeması

Mikrodalga fırın tasarımı üzerine yapılan araştırmalar, bu cihazların enerji verimliliği, güvenliği, kullanım kolaylığı ve pişirme performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Mikrodalga fırınların verimliliğini artırmak, güvenliği sağlamak, kullanıcı dostu tasarımlar geliştirmek ve pişirme performansını optimize etmek için yapılan çalışmalar, bu cihazların günlük yaşamda daha etkin ve güvenli bir şekilde kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, mikrodalga fırınların daha da geliştirilmesi ve yeni teknolojilerin entegrasyonu ile bu cihazların performansını ve kullanıcı deneyimini daha da artıracaktır.

Mikrodalgaların malzemelerle etkileşimi, malzemenin türüne göre üç şekilde gerçekleşir: iletim, soğurma ve geçirim. İletken malzemeler (rneğin metaller) mikrodalgaları yansıtarak ısınmaz. Yüksek yalıtkan özellik gösteren malzemeler, mikrodalgaları geçirir ve ısınmaz. Mikrodalgaları soğuran malzemeler (su, şeker, yağ) ise elektromanyetik alana maruz kaldıklarında ısınır. Ayrıca, mikrodalga soğuran zelttiler de soğurma derecesine bağlı olarak ısınır. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel bağları, mikrodalga soğurma derecelerini etkiler. Buna ek olarak mikrodalga uygulamada sistem performansını etkilen faktörler aşağıda sıralanmıştır:

Frekans: Frekans, bir malzemenin mikrodalga enerjisine maruz kaldığında ne kadar derine nüfuz edeceğini büyük ölçüde etkiler. Mikrodalga ısıtma sistemlerinde kullanılan frekanslar, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından belirlenen endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) bantlardır. Ev ve endüstri uygulamalarında genellikle 915 MHz ve 2450 MHz frekansları kullanılır. Benzer dielektrik özelliklere sahip malzemelerde, 915 MHz frekansındaki mikrodalgalar 2450 MHz frekansındaki mikrodalgalara göre yaklaşık 2.5 kat daha derin nüfuz eder. Penetrasyon derinliği frekans ile ters orantılı olarak değişir. Malzemenin dengeli bir şekilde ısıtılabilmesi için uygun frekansın seçimi oldukça önemlidir. Ayrıca, dielektrik kayıp faktörü frekansa bağlı olarak değiştiğinden, frekans malzemenin ısınma performansını doğrudan etkiler.

Dielektrik özellikler: Malzemenin mikrodalga enerjisini nasıl absorbe ettiğini, ilettiğini ve yansıttığını belirleyen dielektrik özellikleri, ısınma performansını etkileyen önemli bir faktördür. Dielektrik sabiti, malzemenin enerjiyi depolayabilme kapasitesini gösterir. Kayıp tanjantı ($\tan\delta$), malzemede depolanan enerjinin ne kadarının ısıya dönüştürüldüğünü ifade eder. Kayıp faktörü yüksek olan malzemeler, mikrodalga enerjisiyle daha hızlı ısınır.

Ürünün sistem içerisindeki konumu ve fiziksel özellikleri: Mikrodalga ısıtma işlemi sırasında, malzemenin fırın içindeki konumu büyük önem taşır. En iyi mikrodalga performansını elde etmek için, malzemenin fırın içinde en uygun yere yerleştirilmesi gerekir. Malzemenin rezonatördeki konumu değiştirildiğinde, elektrik alan dağılımı da değişir. Bu değişim, sistemin verimliliği ve performansını etkiler. Bu çalışmada, malzemenin yerinin optimizasyonu önemli bir rol oynamaktadır. Mikrodalga fırınlarda ısıtılan malzemelerin boyutu ve şekli, mikrodalga performansını büyük ölçüde etkiler. Isıtılacak malzemenin boyutu dalga boyuna göre fazla ise ısıtma üniform olmayacaktır. Boyutun penetrasyon derinliğine daha yakın olduğu durumlarda ise ısıtma daha üniform olur. Düzenli şekilli yapılarda ısıtma daha homojen gerçekleşir. Keskin kenarların ve köşelerin olması durumunda aşırı ısınma meydana gelebilir, bu nedenle mikrodalga ısıtma için en ideal geometri küredir.

Sistem geometrisi: Malzeme geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak mikrodalga fırının geometrisi ve boyutu ayarlanmalıdır. Aksi takdirde, fırın içinde homojen olmayan bir ısı transferi gerçekleşebilir. Birçok uygulamada, rezonatör boyutu ürün boyutu ve mevcut fabrika konveyör sistemleriyle uyumlu olmalıdır. Yüksüz koşullarda yapılan çalışmalarla, ürün boyutu ve oran duyarlılığı sorunları dikkate alınarak fırının minimum boyutu belirlenir.

Uygulama gücü: Mikrodalga giriş gücünün seviyesi, ısıtılacak malzeme içinde üretilebilecek ısı miktarını belirler. Mikrodalga ısıtma için gerekli güç, genellikle önerilen işlemin ilk değerlendirmesine göre hesaplanır ve fırının yapısı, düzeni ve boyutu oluşturulduktan sonra gerçek testler ile doğrulanır. Bu doğrulamada, ısıtma oranı, sıcaklık bütünlüğü ve işlem verimi gibi parametreler değerlendirilir.

Dalga kılavuzunun konumu: Mikrodalga fırınlarda, mikrodalga enerjisi dalga kılavuzları aracılığıyla rezonatöre iletilir. Elektriksel ve manyetik rezonans modlarını uyarmada dalga kılavuzlarının konumu kritik öneme sahiptir. Birden fazla dalga kılavuzu ile ısıtma veya kurutma yapılacaksa, düşük kublaj sağlamak için dalga kılavuzlarının doğru yerleştirilmesi gereklidir. Aksi takdirde, mikrodalga ısıtmanın performansı düşer.

Günümüzde mikrodalga sistemlerin kullanımı incelendiğinde, daha çok ev-tipi sistemlerin günlük hayatımızda kullanıldığı görülmektedir. Endüstriyel ölçekte mikrodalga sistemler ise gıda endüstrisinde yerini almaya başlamıştır. Bu sistemlerin taşınabilir boyutlarda üretilmesi ile acil durum bölgelerinde, ordularda ve lojistik alanlarda da başarılı ve hızlı bir şekilde hizmet vermesi hedeflenmektedir. Böylelikle gıdaların güvenilir bir şekilde tüketime hazırlanması için yenilikçi bir yöntem de geliştirilmiş olacaktır.

Projenin ilk aşamasında, taşınabilir boyutlardaki mikrodalga sistemin tasarlanması ve elektrik enerjili bir şekilde üretilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde, üretilen ve kavite ölçüleri optimize edilen mikrodalga sistemin çalışma kapasitesi de analiz edilebilecektir. Planlanan proje genel olarak incelendiğinde, etkin ve verimli bir sistemin tasarlanması ve üretilmesi hedeflenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle konvansiyonel bir sistem kullanılarak deneysel ve model geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneysel veriler kullanılarak doğrulanan model parametreleri kullanılarak daha küçük hacimde portatif kabul edilebilecek hacimde bir sistem tasarlanmış, bu sistemin üretimi gerçekleştirilmiş ve bu sistem kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ve model çalışmaları kapsamında konvansiyonel sistem ile ürün sıcaklık değişimi temelinde karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır.

3.1 Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

Mikrodalga uygulama sırasında kullanılan sistem içerisinde oluşan elektromagnetik alan dağılımının ve bu bağlamda ürün içi sıcaklık değişimlerinin ve sıvı ürünlerde ayrıca akış profil oluşumunun belirlenmesi amacıyla sonlu eleman temelinde bir yazılım olan Comsol çoklu fizik program kullanılmıştır (V6.0; Comsol AB, Stockholm, İsveç):

Sistem içerisinde oluşan elektromagnetik alan dağılımının belirlenmesi amacıyla Maxwell denklikleri 2450 MHz frekans değerinde çözülmüştür:

$$\begin{aligned} \text{Maxwell – Ampere's law : } \quad \nabla \times \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \text{Faraday's law : } \quad \nabla \times \mathbf{E} &= \frac{\partial (\mu \mathbf{H})}{\partial t} \\ \text{Gauss's law : } \quad \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) &= 0 \\ \text{Gauss's magnetic law : } \quad \nabla \cdot (\mu \mathbf{H}) &= 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Bu denkliklerde $\mathbf{E}$ değeri zamana bağlı harmonik elektrik alan gücünü (V/m), $\mathbf{H}$ değeri bağlı harmonik manyetik alan gücünü (A/m) göstermektedir. Elektrik alan ve manyetik alan

$$\begin{aligned} (\mathbf{E} : [\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_0(x, y, z) e^{-i\omega t}]) \\ ([\mathbf{H} : \mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}_0(x, y, z) e^{-i\omega t}]) \end{aligned}$$

yoğunluk değişimleri zamana bağlı harmonic fonksiyonlar olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda harmonic Maxwell denklemleri Helmholtz denkliğine indirilebilmekte olup, tez kapsamında da sistem içi elektromanyetik alan dağılımının belirlenmesi amacıyla Helmholtz denklemi çözülmüştür:

$$\nabla \times \mu^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) + (i\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_r) \mathbf{E} = 0 \quad (3.2)$$

Bu denklikte ε_r bağıl permitivite değerini, μ bağıl geçirgenlik değerini, ω açısal dalga frekansı değerini ($2\pi f$, rad/s) ve σ elektriksel iletkenlik katsayısı değerini göstermektedir (S/m). Kompleks permitivite değeri $\varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon''$ formülü ile verilmekte olup, burada ε' dielektrik sabiti ve ε'' ise dielektrik kayıp faktörü değerini göstermektedir (Topcam vd., 2020).

Ürün içi sıcaklık dağılımının hesaplanmasında enerji denkliği kullanılmıştır:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3.3)$$

Bu denklikte ρ ürün yoğunluğunu (kg/m^3), c_p ürün özgül ısı değerini (J/kg-K), k ısı iletkenlik katsayısını (W/m-K), T sıcaklığı (K), $\mathbf{u}$ hız vektörünü (m/s), ve Q mikrodalga enerji absorpsiyonuna bağlı hacimsel ısı oluşum (W/m^3) değerini göstermektedir.

Ürün içerisindeki mikrodalga absorpsiyonuna bağlı ısı üretim değeri Denklik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \mathbf{E}^2 \quad (3.4)$$

ε_0 serbest uzay permitivite değeri ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)'ni göstermektedir.

Ürün içi hız profile değişiminin belirlenmesi için Navier–Stokes ve süreklilik denklemleri çözülmüştür:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] \quad (3.5)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (3.6)$$

Deneysel materyal olarak kullanılan suyun dielektrik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiş olup (Topçam, 2018) diğer ısısal ve fiziksel özellikleri kullanılan yazılımın kütüphanesinden elde edilmiştir. Model çalışmaları kapsamında ağ bağımsızlık çalışmaları da ayrıca gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 Mikrodalga ısıtma işlemde kullanılan saf su örneğinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Sıcaklık (°C)	Dielektrik sabiti - ϵ'	Dielektrik kayıp faktörü - ϵ''
5	85,05	17,93
20	79,31	10,84
40	72,57	6,19
60	66,39	3,78
65	64,9	3,41
80	60,44	2,33
90	57,46	1,61

3.2 Konvansiyonel Sistemde Gerçekleştirilen Deneysel Çalışmalar

Konvansiyonel sistem olarak ev tipi bir konvansiyonel mikrodalga fırın kullanılmıştır (Şekil 3.1). Bu sistem 1150 W maksimum çıkış gücüne sahip olup 2450 MHz frekansta çalışmakta olup sistem iç hacmi 12.27 L'dir. Bu sistemde saf su kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 8 cm yüksekliğinde ve 9,3 cm çapında olan polietilen bir kap kullanılmış (Şekil 3.2), sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla sistem üst yüzeyinden bir delik açılmış ve fiber optik probler bu delikten geçirilerek su örneği içerisine yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümünde kullanılan probun sabitlemek (mikrodalga uygulama sırasında örnek içerisinde hareket etmelerini önlemek amacıyla) için tasarlanmış düzenek de Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu bağlamda probun sabitlenmesi için Crealty CR 6 SE model bir 3 boyutlu yazıcı kullanılarak özel bir düzenek tasarlanmış ve üretilmiştir. Sıcaklık değişimi ise Fiso-UMI sistem kullanılarak kaydedilmiştir. Şekil 3.3. konvansiyonel sistem içerisine yerleştirilmiş su örneği içerisinde sıcaklık ölçümü alınan noktaların yerini göstermektedir. Deneysel çalışmalar %100 ve %50 güç seçeneklerinde yapılmış olup; %100 güç seçeneğinde sistem tarafından sürekli bir mikrodalga uygulaması gerçekleşirken, %50 uygulamada eş zamanlı dur-kal

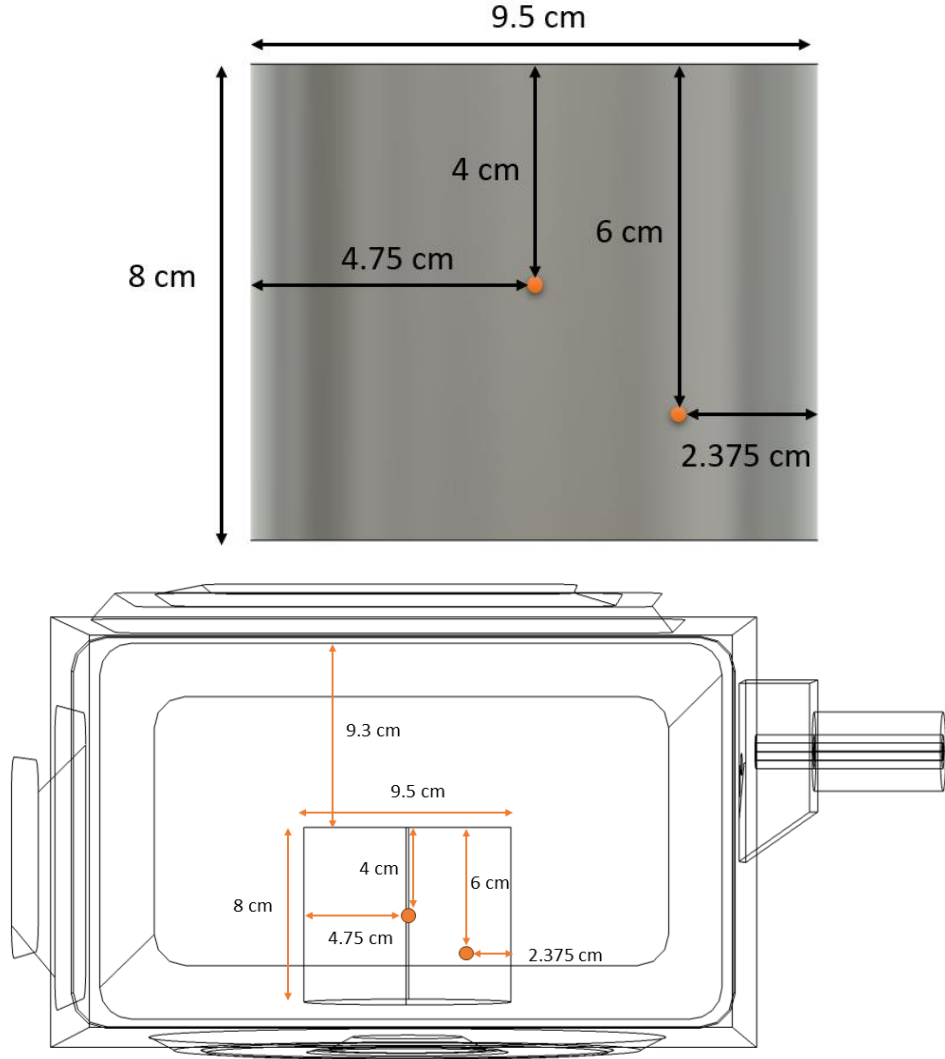
döngüleri ile ısıtım işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçları bir sonraki aşamada model doğrulama amacıyla kullanılmış ve doğrulanan model temelinde de portatif sistem tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir



Şekil 3.1 Konvansiyonel mikrodalga sistem



Şekil 3.2 Konvansiyonel sistem kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan polietilen kap



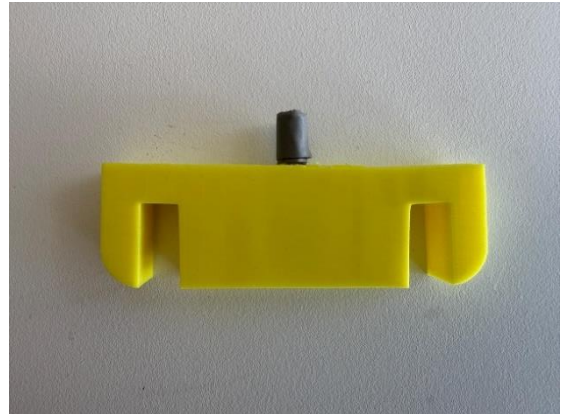
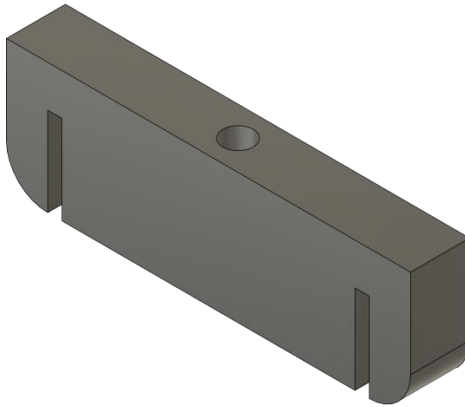
Şekil 3.3 Konvansiyonel sistem içerisine yerleştirilmiş su örneği içerisinde sıcaklık ölçümü alınan noktaların yeri

Portatif mikrodalga fırında gerçekleştirilen deneylerde saf su, karboksimetil selüloz (CMC) çözeltisi ve agar çözeltisi kullanılmıştır. Bu materyaller polipropilen silindir kaplar içerisinde ısıtılmıştır. Polipropilen kaplar, yüksekliği 7 cm, iç çapı 4.9 cm ve dış çapı 5 cm olan ve her bir deneyde yaklaşık 60 mL hacminde numuneler içerecek şekilde seçilmiştir. Deneylerde sıcaklık ölçümleri fiber optik prob kullanılarak gerçekleştirilmiş ve veriler Fiso-UMI sıcaklık veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Fiber optik prob, numunenin merkez noktasına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Şekil 3.4a sıcaklık veri

toplama sistemi ve kullanılan fiber optik probu gösterirken probu sabitlemede kullanılan aparat Şekil 3.4b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.4 (a) sıcaklık veri toplama sistemi ve kullanılan fiber optik prob; (b) sıcaklık ölçümü sırasında probu sabitlemede kullanılan aparat

Matematiksel model sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla root mean square error (RMSE) değeri kullanılacaktır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (T - T_{model})^2} \quad (3.7)$$

Bu denklikte N deneysel veri sayısını, T ve T_{model} ise deneysel sıcaklık ölçümü ile matematiksel model çalışmasından elde edilen sıcaklık değerini göstermektedir.

3.3 Portatif Sistem Tasarım ve Optimizasyon Çalışmaları

Portatif mikrodalga kavite geometrisinin tasarımı ve optimizasyonu amacıyla Comsol yazılımında Nelder ve Mead yöntemi ile Monte Carlo ve parametrik optimizasyon yöntemleri kullanılmış ve sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan değişiminin tekdüze edilebilmesi amacıyla optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistem geometrisinin oluşturulması ve geometrik parametrelerin optimizasyonu amacıyla temel parametreler genişlik, uzunluk ve yükseklik olarak belirlenmiş ve belirli bir başlangıç değeri, alt sınır ve üst sınıra sahip bu parametrelerin etkilerini gözlemlemek için 10, 5, 0.5 ve 0.1 ölçek değerleri test edilmiştir. Bu bağlamda sistem içi elektromanyetik alan dağılımının tekdüze olarak elde edilmesi amacıyla karar verilen sistemin daha sonra üretimi gerçekleştirilmiş ve bu sistem kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sistem içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımının tekdüzeliği optimizasyon çalışmaları için hedef fonksiyon olarak belirlenmiş ve bu bağlamda denklik 3.9'da verilen tekdüzelik indeks değişimi kullanılmıştır:

$$E_{MUI} = \frac{\frac{1}{A_{rel}} \int_{A_{wel}} \sqrt{(E - E_{av})^2} dA_{sur}}{E_{av} - E_{Initial}} \quad (3.8)$$

3.4 Tasarlanan Portatif Sistemde Gerçekleştirilen Deneysel Çalışmalar

Tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistem 3 farklı deneysel çalışma gerçekleştirilmiş olup bu bağlamda saf su, %0,5 konsantrasyonda CMC çözeltisi ve %2'lik agar örnekleri kullanılmıştır. Saf su, düşük viskoziteli Newtonumsu sıvı örnekleri temsilen kullanılırken, %0,5 CMC çözeltisi yüksek viskoziteli Newtonumsu olmayan sıvı örnekleri temsilen ve agar örneği de katı örnekleri temsilen kullanılmıştır.

%0,5 CMC çözeltisi, 100 mL çözelti için 0.5 gram CMC tartılarak saf su ile oda sıcaklığında karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. CMC çözeltisinin homojen bir şekilde karışmasını sağlamak amacıyla karışım oda sıcaklığında bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Homojenleşme sağlandıktan sonra içinde oluşabilecek hava kabarcıklarının deney ve model sonuçlarını etkilememesi için çözeltinin 24-48 saat buzdolabında bekletilmesi

gerekmektedir. Bu süre sonunda hava kabarcıklarından arınmış olan çözelti deneylerde kullanıma hazır hale gelmiştir. Agar çözeltisi ise %2 konsantrasyonda hazırlanmıştır. 100 mL çözelti için 2 gram agar tartılmış ve saf su ile birlikte ısıtmalı manyetik karıştırıcıda kaynayana kadar karıştırılmıştır. Agar tamamen çözündüğünde ve çözelti homojen hale geldiğinde polietilen kaplara dökülerek oda sıcaklığında soğutulmuş ve sonrasında buzdolabında saklanmıştır.

Üretimi gerçekleştirilen portatif sistemde %100 ve %50 güç (30 s'lik dur kalk döngüleri) uygulama koşullarında deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen sıcaklık değişim değerleri bir sonraki aşamada matematiksel model doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Saf su ve CMC çözeltileri polipropilen silindir kaplar içerisinde ısıtılmıştır. Polipropilen kaplar, yüksekliği 7 cm, iç çapı 4.9 cm ve dış çapı 5 cm olan ve her bir deneyde yaklaşık 60 mL hacminde numuneler içerecek şekilde seçilmiştir.

Deneylerde sıcaklık ölçümleri fiber optik prob kullanılarak gerçekleştirilmiş ve veriler Fiso-UMI sıcaklık veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Fiber optik prob, örneklerin merkez noktasına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Proben sabitlenmesi için Creality CR 6 SE model bir 3 boyutlu yazıcı kullanılarak özel bir düzenek tasarlanmış ve üretilmiştir. Bütün deneysel çalışmalar 3 tekerrür olarak gerçekleştirilmiştir. Saf su örneklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişen dielektrik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiş olup diğer ısısal ve fiziksel (ısıl iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı değişimleri ile viskozite değişimi) Comsol yazılımı kütüphanesinden alınmıştır. %0,5 CMC dielektrik özellik değişimleri Çizelge 3.2'de %2 agar dielektrik özellik değişimleri ise Çizelge 3.3'de gösterilmiştir. %2 agar ısısal ve fiziksel özelliklerinin (ısıl iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı değişimleri) su ile aynı olduğu varsayımı yapılmış olup %0,5 CMC çözeltisi değerleri ise Çizelge 3.4'de verilmiştir. %0,5 CMC çözeltisi Newtonumsu olmayan bir örnek olduğundan viskozite değişimi Power kanunu (denklik 7) ile açıklanmış ve bu bağlamda kullanılan “M” ve “n” değerlerinin değişimi de Çizelge 3.5'de verilmiştir.

$$\eta = M(\gamma)^{n-1} \quad (3.9)$$

Çizelge 3.2 Mikrodalga ısıtılma işlemde kullanılan %0.5 CMC çözeltisi örneğinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Sıcaklık (°C)	Dielektrik sabiti - ϵ'	Dielektrik kayıp faktörü - ϵ''
5	81,19	9,28
20	77,80	8,91
40	72,86	9,53
60	67,47	11,43
65	66,04	12,11
80	61,60	14,62
90	58,49	16,69

Çizelge 3.3 Mikrodalga ısıtılma işlemde kullanılan %2 agar örneğinin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Sıcaklık (°C)	Dielektrik sabiti - ϵ'	Dielektrik kayıp faktörü - ϵ''
10	75,62 ± 1,36	19,77 ± 1,37
25	73,45 ± 0,65	12,22 ± 1,49
50	71,49 ± 0,69	8,83 ± 0,20
60	66,68 ± 0,25	3,77 ± 0,05
10	75,62 ± 1,36	19,77 ± 1,37

Çizelge 3.4 Mikrodalga ısıtıl işlemde kullanılan %0.5 CMC çözeltisi örneğinin ısısal ve fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Sıcaklık (°C)	Isıl iletkenlik katsayısı - k (W/m.K)	Yoğunluk - ρ (kg/m ³)	Özgül ısı kapasitesi - c_p (J/kg.K)
20	0,602	997,6	4170,3
35	0,623	994,5	4174,8
50	0,641	989,8	4181,9
65	0,656	983,4	4191,4
80	0,668	975,2	4203,3
90	0,674	968,8	4212,7

Çizelge 3.5 Mikrodalga ısıtıl işlemde kullanılan %0.5 CMC çözeltisi örneğinin Power law temelinde kullanılan “M” ve “n” değerleri

Sıcaklık (°C)	M (kg/m.s)	n
20	0,639	0,791
35	0,409	0,844
50	0,246	0,86
65	0,148	0,865
80	0,0096	0,906
90	0,062	0,974

3.5 Başlangıç ve Sınır koşulları

Başlangıç koşulları: Belirtilen 2 siste için gerçekteştirilen çözümlerde kullanılan başlangıç ve sınır koşulları Çizelge 3.6. ve Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir. Konvektif ısı transferi katsayısı (h) değeri $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ olarak kullanılmış ve ortam sıcaklığı $20 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 3.6. Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan başlangıç koşulları

Kullanılan sistem	Model çalışması	Isı transferi modülü	Akışkanlar dinamiği modülü	Elektromanyetik dalga modülü
Konvansiyonel Sistem	Noktasal doğrulama	$T_i=25 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	$P_0 = 1150 \text{ W}$
	Noktasal doğrulama	$T_i=25 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	$P_0 = 1150 \text{ W}$
Portatif Sistem	Noktasal doğrulama	$T_i=25 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	$P_0 = 700 \text{ W}$
	Noktasal doğrulama	$T_i=25 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	$P_0 = 700 \text{ W}$

Çizelge 3.7. Çözümler sırasında farklı sistemler ve farklı çalışmalarda kullanılan sınır koşulları

Kullanılan sistem	Model çalışması	Isı transferi modülü	Akışkanlar dinamiği modülü	Elektromanyetik dalga modülü
Konvansiyonel Sistem	Noktasal doğrulama	$h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $T_0=20 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	Empedans Sınır Durumu N $= \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r - j\sigma/\omega}}$
	Noktasal doğrulama	$h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $T_0=20 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	Empedans Sınır Durumu N $= \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r - j\sigma/\omega}}$
Portatif Sistem	Noktasal doğrulama	$h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $T_0=20 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	Empedans Sınır Durumu N $= \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r - j\sigma/\omega}}$
	Noktasal doğrulama	$h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ $T_0=20 \text{ degC}$	$u_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $v_0 = 0 \text{ (m/s)}$ $w_0 = 0 \text{ (m/s)}$	Empedans Sınır Durumu N $= \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r - j\sigma/\omega}}$

3.6 Matematiksel Modellerde Kullanılan Çözümleyiciler

Geliştirilen matematiksel modelleme çalışmalarında laboratuvar ölçekli sistemde zamana bağlı (transient) çözüm yapılmıştır. COMSOL yazılımı, sonlu element problemlerinde ortaya çıkan lineer denklemlerin çözümünde direkt ve yinelemeli yöntemler olarak adlandırılan 2 farklı algoritma kullanılmıştır. Direkt yöntemler LU ayrıştırması (Cholesky yöntemi) yöntemine dayanmakta olup PARDISO (Parallel Sparse Direct Solver), MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver) ve SPOOLES (Sparse Object Oriented Linear Equations Solver) olmak üzere 3 farklı çözüm yaklaşımından oluşmaktadır. Bu çalışmada alan çözümü için MUMPS, ısı ve momentum transferi içinse PARDISO yöntemi kullanılmıştır.

Ağ yapısının problem fiziğine göre oluşturulması ve çözüm yöntemlerinin iyi kurgulanması durumunda kullanılacak yöntemler arasında önemli bir fark oluşması beklenmese de belirtilen üç yöntem arasındaki temel fark bilgisayar donanımına yaptığı yük ve çalışma hızı noktasındadır. PARDISO çözüm yöntemi direk çözümler arasında en hızlı yöntem ve SPOOLES çözüm yöntemi ise en yavaş olanıdır. Aynı zamanda SPOOLES direkt çözümler arasında en az RAM ihtiyacı duyan çözüm yöntemi iken bütün direkt çözüm yöntemleri fazla RAM ihtiyacı göstermektedir. Ancak, MUMPS ve PARDISO yöntemleri gerektiği zaman çözümün bir kısmını çekirdek dışına yükleyebilmekte ve çözüm sırasında ihtiyaç duyulması halinde sistem hard diskini de kullanabilmektedir (<https://www.comsol.com> 2018). Bu kapsamda, gerçekleştirilen farklı ön simülasyon çalışmalarına da bağlı olarak yukarıda belirtilen yöntemlerin kullanımına karar verilmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları HP Z4 G5 model 160 GB RAM ve 3.10 GHz işlemci hızına sahip iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı modeller için gerekli RAM ihtiyacı, model içeriğine göre değişmekle birlikte genel olarak maksimum 46 GB RAM kullanımı ile laboratuvar ölçekli sistemde gerçekleştirilen yatışkın olmayan simülasyon çalışmaları yaklaşık 12 saatte tamamlanmıştır.

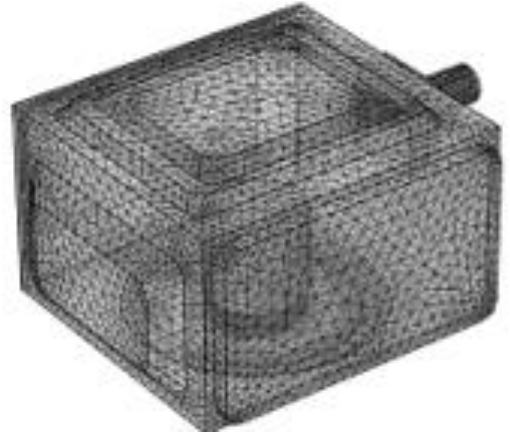
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Konvansiyonel Sistem Kullanılarak Gerçekleştirilen Matematiksel Model Çalışmaları

Konvansiyonel sistem (Şekil 3.1) kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel model çalışmalarında öncelikle ağ bağımsızlık çalışmaları yapılarak sistem için kullanılacak ağ parametrelerine karar verilmiştir. Bu amaçla Şekil 4.1’de gösterilen ağ yapıları kullanılmış ve sistem içerisine yerleştirilen su örneği hacimsel ortalama sıcaklık değişimine göre uygun ağ yapısına karar verilmiştir (Şekil 4.2). Bu bağlamda hem %100 hem de %50 güç uygulama opsiyonları uygulanmıştır.



(a) coarse- 80k



(b) normal- 165k

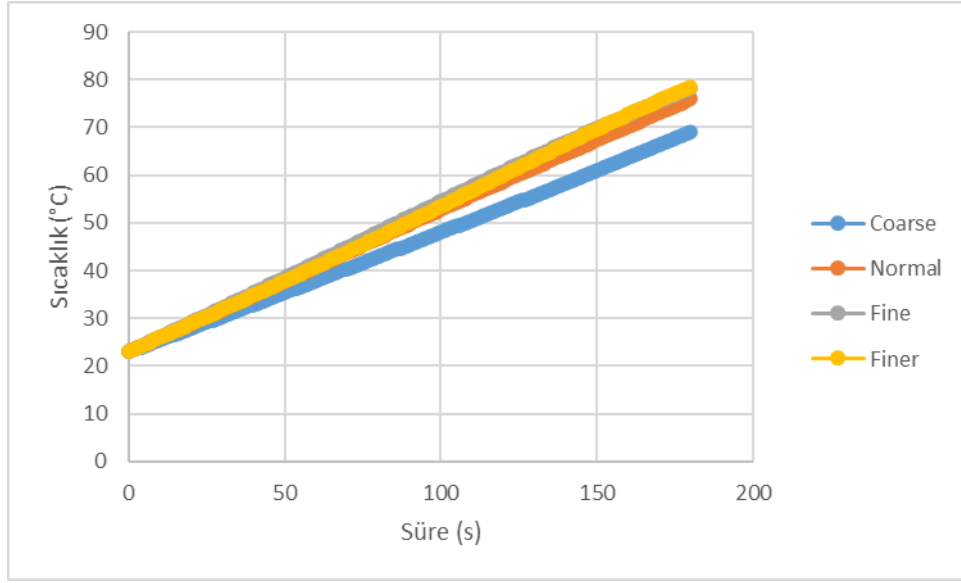


(c) fine-360k

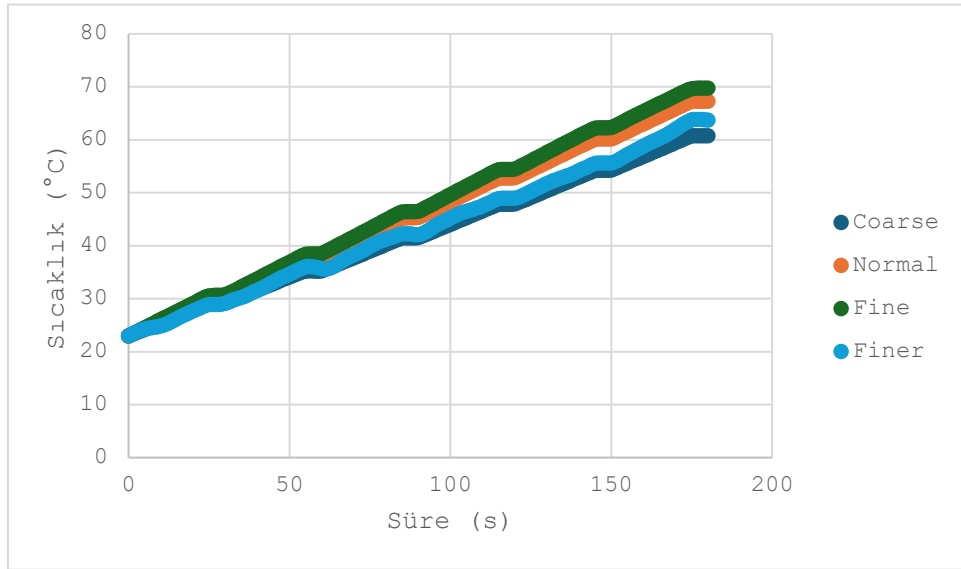


(d) finer- 1m

Şekil 4.1 Konvansiyonel sistem kullanılarak gerçekleştirilen model çalışmaları kapsamında yapılan ağ bağımsızlık çalışmalarında kullanılan ağ yapıları

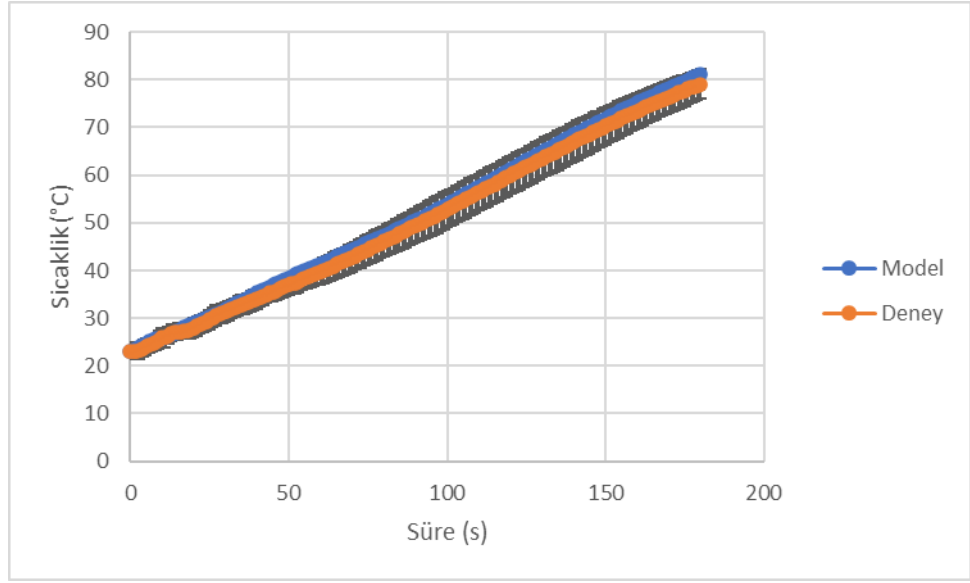


(a)

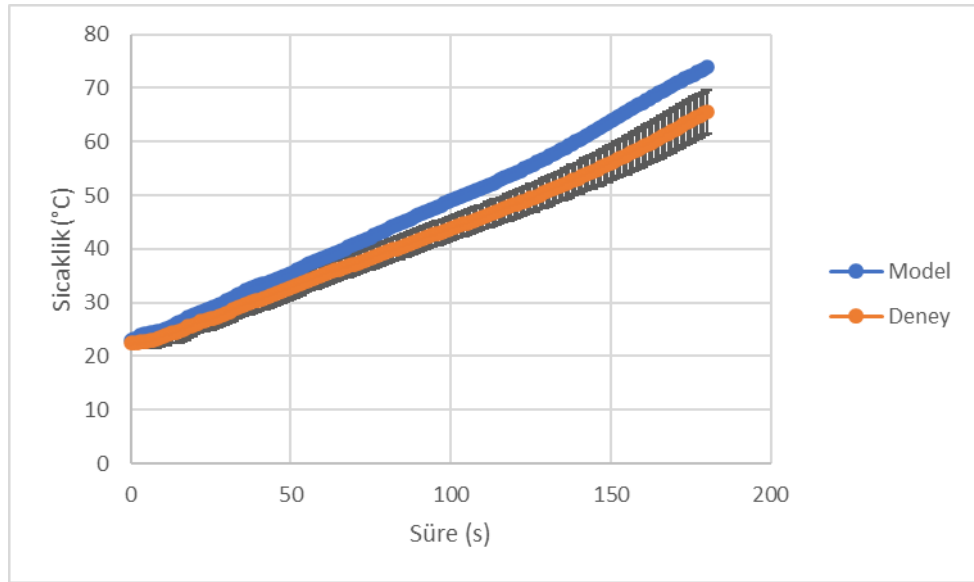


(b)

Şekil 4.2 Konvansiyonel sistem içerisine yerleştirilen su örneği hacimsel ortalama sıcaklık değişimine göre uygun ağ yapısına karar verilmesi (a) %100 ve (b) %50 güç opsiyonlarında elde edilen sıcaklık değişim değerleri.

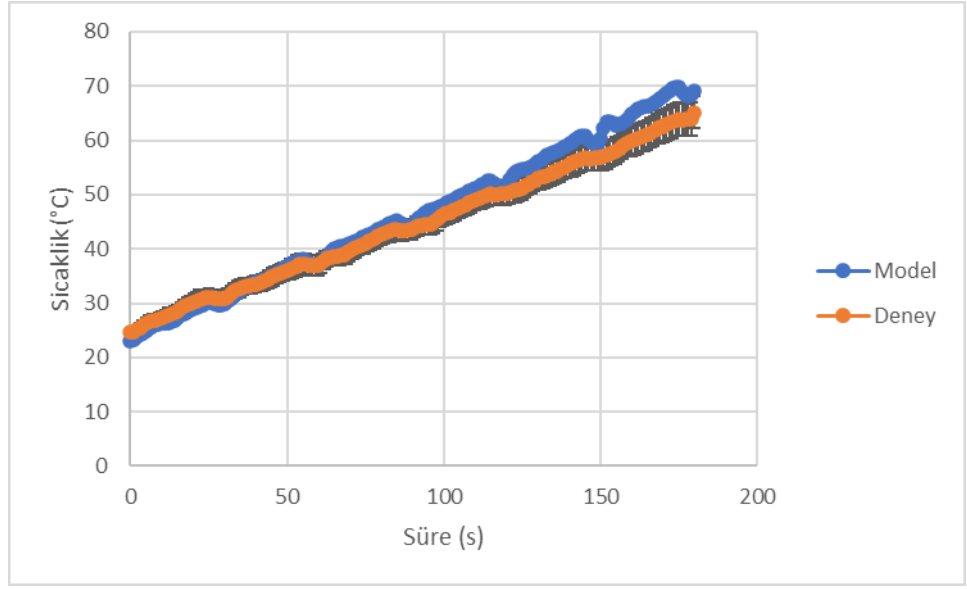


(a)

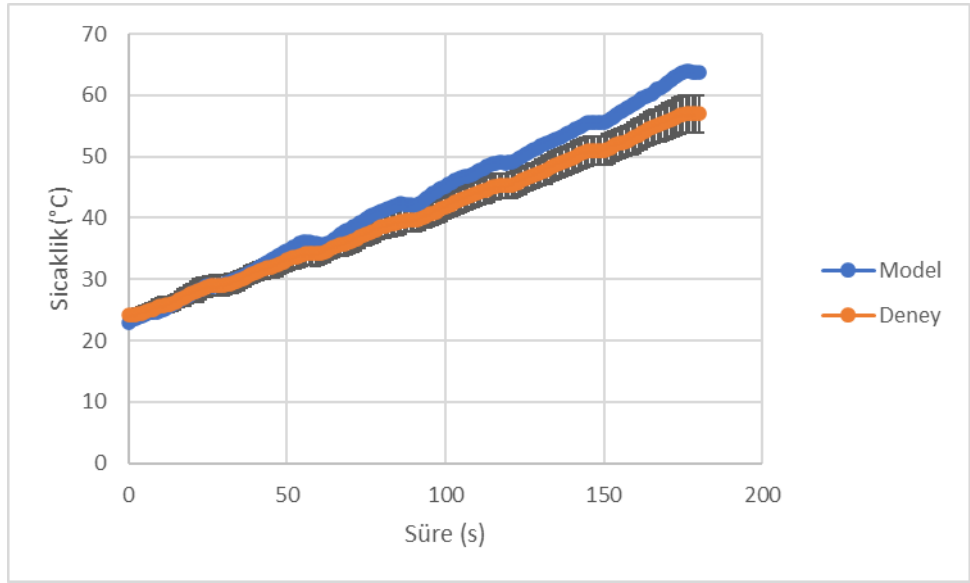


(b)

Şekil 4.3 Konvansiyonel sistemde (%100 güç uygulamasında) gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması; (a) merkez ve (b) kenar nokta (Şekil 3.3)

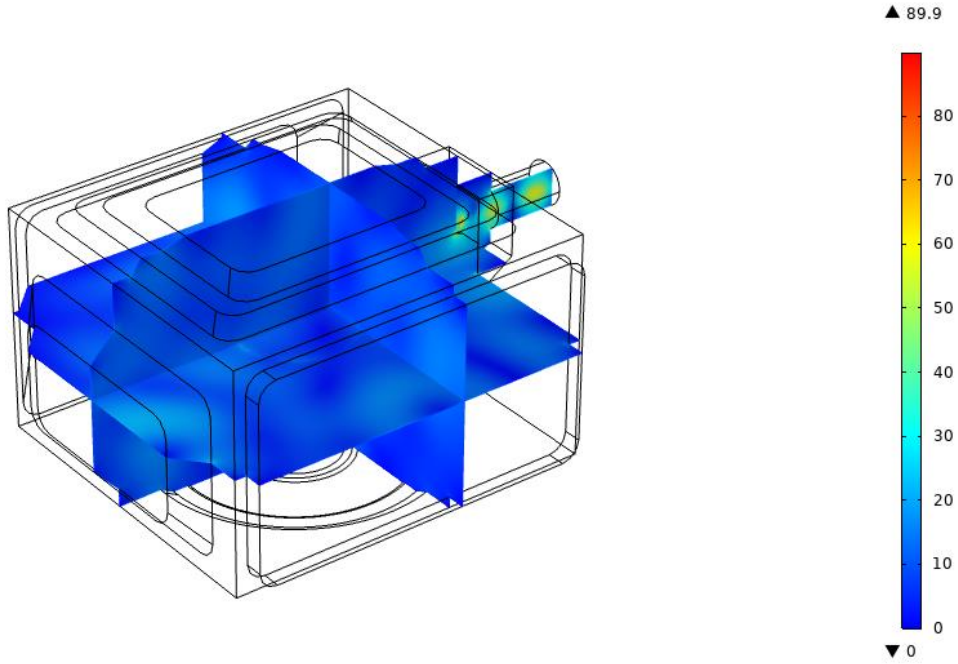


(a)



(b)

Şekil 4.4 Konvansiyonel sistemde (%50 güç uygulamasında) gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılması; (a) merkez ve (b) kenar nokta (Şekil 3.3)



(b)

Şekil 4.5 Konvansiyonel sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü)

Şekil 4.2’de gözlendiği üzere “fine” ve “finer” seviyeki ağ yapıları kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark meydana gelmemiştir. Ancak, konvansiyonel sistem ve daha sonra tasarımı gerçekleştirilen portatif sistemde kullanılan sıvı örneklerde meydana gelecek sıcaklık ve akış profil değişimleri göz önüne alınarak “finer” düzeyde ağ yapıları kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4 konvansiyonel sistemde (%100 ve %50 güç uygulamalarında) gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile matematiksel model sonuçlarının karşılaştırılmasını gösterirken Şekil 4.5 konvansiyonel sistem içerisinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımını göstermektedir. Matematiksel model sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması kapsamında RMSE (denklik 3.7) değerleri %100 güç modu için merkez ve kenar noktalarda 1,31 ve 5,30 °C (Şekil 4.3a-b) olarak belirlenirken; %50 güç modu için merkez ve kenar noktalarda 2,78 ve 3,48 °C (Şekil 4.3a-b) olarak hesaplanmıştır. Bu düşük değerler deneysel sıcaklık değişimi verileri ile model sonuçları arasında bir uyum olduğunu göstermektedir.

4.2 Portatif Sistem Optimizasyon Çalışmaları

4.2.1 Nelder ve Mead yöntemi

Nelder ve Mead optimizasyon yöntemi kullanılarak, 10 cm ölçekte optimize edilen boyutlar 28,15 cm (genişlik), 23,15 cm (uzunluk) ve 17 cm (yükseklik) olup sistem hacmi 11 L olarak belirlenmiştir. 5 cm ölçek uygulamada ise sistem hacmi 11,7 L ve 0.1 cm ölçekte sistem hacmi 8 L olarak hesaplanmıştır. 0,1 ve 0,5 cm ölçek uygulamada bir fark ortaya çıkmamıştır (Çizelge 4.1). Bu bağlamda düşük hacimli bir kavite geometrisi elde etme konusunda 8,22 L hacim önemli bir avantaj göstermiş olsa da sistem içerisinde elde edilen elektromanyetik alan dağılımı gıda ürün prosesi için olumlu olarak değerlendirilmemiştir. Özellikle, kavite merkezine konularak ısıtılması düşünülen bir ürün için sistem içerisinde odaklı bir dağılımın olmayacağı bu bağlamda düşünülmüştür. Şekil 4.6 sistem içerisinde elde edilen elektromanyetik alan dağılımını göstermektedir. İstenilen kapsamda bir tasarım gerçekleşmediğinden farklı bir optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

4.2.2 Monte Carlo yöntemi

Nelder ve Mead yöntemi ile düşük ölçek uygulamasında optimum sonuçlar elde edildiğinden Monte Carlo optimizasyon yaklaşımı direkt olarak 0,1 cm ölçek uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. 0,1 cm ölçekte optimize edilen sistem boyutlarında tekdüze bir elektromanyetik alan dağılımı elde edilebilmiş (Şekil 4.7); ancak sistem boyutları 23,8 cm (genişlik), 29 cm (uzunluk) ve 18,9 cm (yükseklik) olup, sistem hacmi 13 L olarak ortaya çıkmıştır.

Oldukça tekdüze bir elektromanyetik alan dağılımı elde edilen bu sistemin hacmi parametrik olarak küçültülmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda manuel optimizasyon uygulaması çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Monte Carlo optimizasyon algoritması ile elde edilen sistem boyutları %20 küçültülmüştür. Bu durumda sistem hacmi 6,7 L'ye düşmüş ve istenilen hacimde bir kavite elde edilmiştir. Ancak, kavite

içerisinde elde edilen elektromanyetik alan dağılımı özellikle, kavite merkezi yerine, kavite kenarlarında yoğunlaşmıştır (Şekil 4.8a). Optimal boyutların %10 azaltılması durumunda ise kavite hacmi 9,6 L olarak ortaya çıkarken elektromanyetik alan dağılımında %20 azaltmaya göre önemli bir değişim meydana gelmemiştir (Şekil 4.8b). Bu noktada istenilen kavite hacmi ve elektromanyetik alan dağılımını elde edebilmek amacıyla deneme yanılma çalışmaları gerçekleştirilmiş ve optimum kavite boyutları 24,5, 22,0 ve 15,5 cm olarak belirlenmiştir. Özellikle kavite merkezinde yoğunlaşan bir elektromanyetik alan dağılımının gerçekleşmesi bu boyutların kullanılmasına neden olmuştur (Şekil 4.9). Bu geometrik ölçülerde üretilen mikrodalga sistemi Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Üç farklı optimizasyon yöntemi için kullanılan geometri parametreleri

Optimizasyon Yöntemi	Ölçek	Genişlik (cm)	Uzunluk (cm)	Yükseklik (cm)	Hacim (L)	Tekdüzelik indeks ($E_M UI$)
Nelder ve Mead	10	28,15	23,15	17	11	0,29
	5	29,7	23,2	17	11,7	0,28
	0.1	26,5	20,7	15	8,22	0,32
	0.5	26,5	20,7	15	8,22	0,32
Monte Carlo	0.1	29	23,8	18,9	13	0,25
Parametrik optimizasyon	%20	23,2	19,04	15,2	6,7	0.50
	%10	26,1	21,42	17,1	9,6	0,48
	-	24,5	22	15,5	8,35	0.49

Scale 0.1

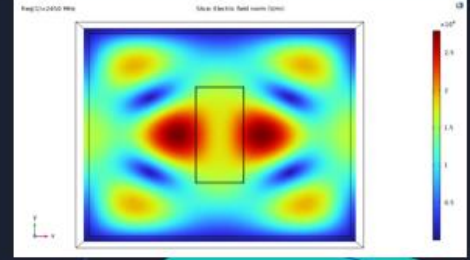
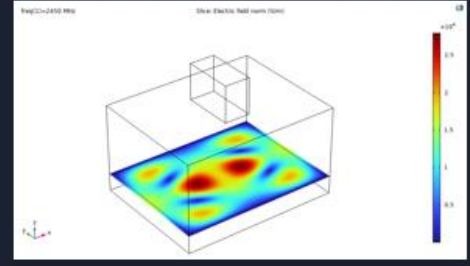
a1x (m)	a1y (m)	a1z (m)	Objective
0.26805	0.20785	0.15056	0.32073
0.26816	0.20778	0.15054	0.32052
0.26831	0.20763	0.15023	0.32018
0.26819	0.20773	0.15021	0.32056
0.26506	0.20785	0.15000	0.32209
0.26520	0.20771	0.15000	0.32289
0.26520	0.20785	0.15044	0.32416
0.26518	0.20783	0.15007	0.32300
0.26517	0.20782	0.15003	0.32250
0.26509	0.20787	0.15002	0.32559
0.26517	0.20778	0.15001	0.32189
0.26507	0.20778	0.15003	0.32255
0.26517	0.20783	0.15001	0.32224
0.26515	0.20782	0.15002	0.32227
0.26514	0.20782	0.15001	0.32213
0.26508	0.20780	0.15001	0.32675
0.26515	0.20783	0.15001	0.32716
0.26511	0.20781	0.15001	0.32784
0.26508	0.20780	0.15001	0.32582
0.26513	0.20782	0.15001	0.32389
0.26504	0.20781	0.15001	0.32281
0.26511	0.20774	0.15001	0.32258
0.26511	0.20781	0.15007	0.32297
0.26511	0.20781	0.15001	0.32184

Nelder-Mead Method

26.5 cm (width)
20.7cm (length)
15 cm (height)

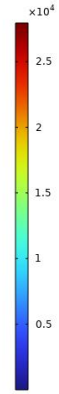
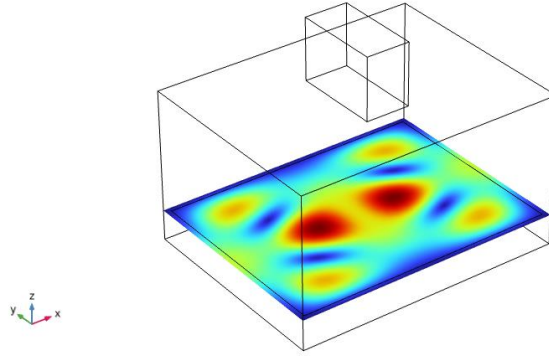
Volume =
8.22825 L

Parameter name	Initial value	Scale	Lower bound	Upper bound
a1x	20[cm]	0.1[cm]	25[cm]	35[cm]
a1y	21[cm]	0.1[cm]	20[cm]	30[cm]
a1z	16[cm]	0.1[cm]	15[cm]	20[cm]



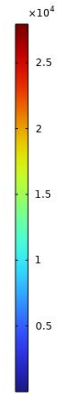
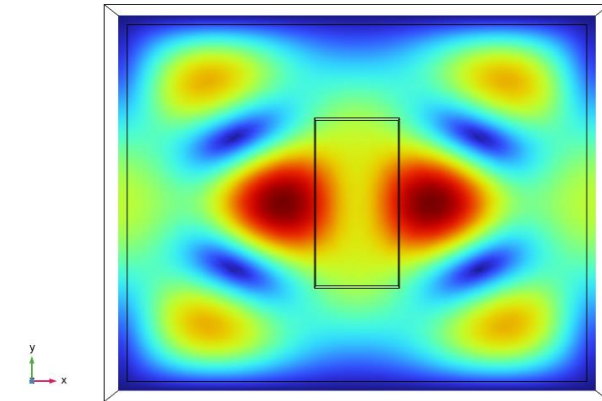
freq(1)=2450 MHz

Slice: Electric field norm (V/m)

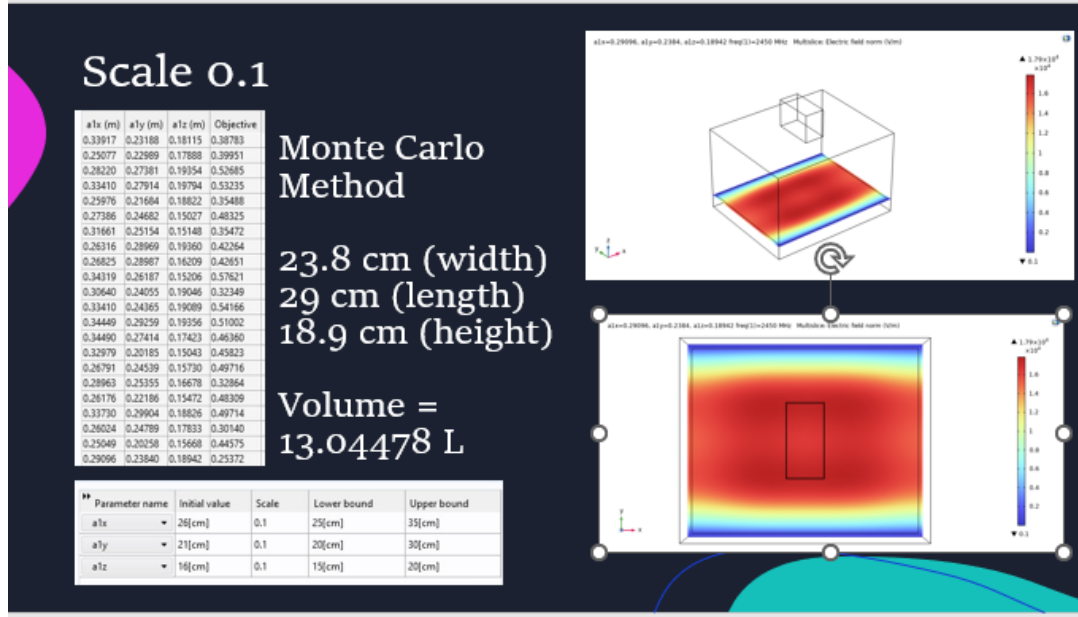


freq(1)=2450 MHz

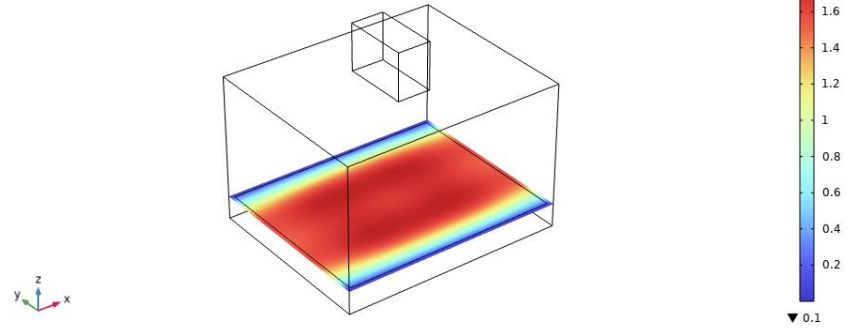
Slice: Electric field norm (V/m)



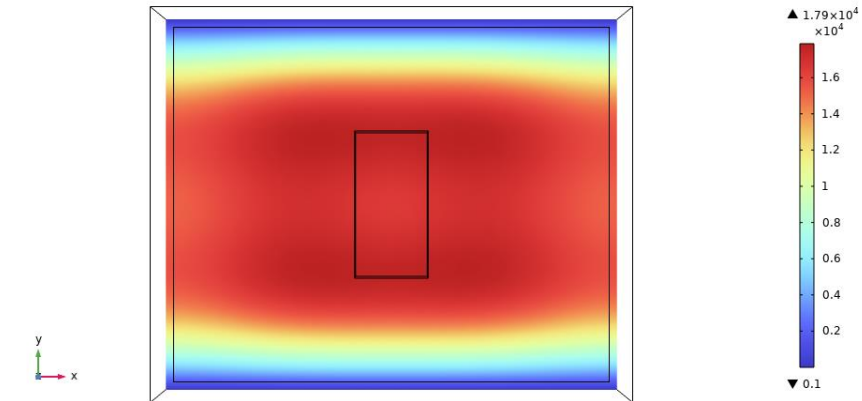
Şekil 4.6 Nelder ve Mead yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında elde edilen kavite geometrisinde ortaya çıkan elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü)



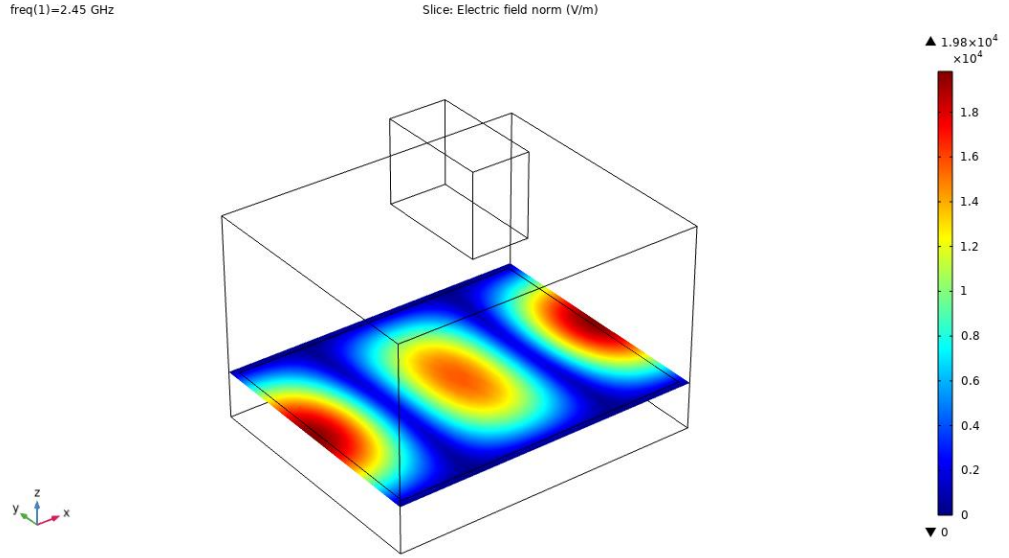
a1x=0.29096, a1y=0.2384, a1z=0.18942 freq(1)=2450 MHz Multislice: Electric field norm (V/m)



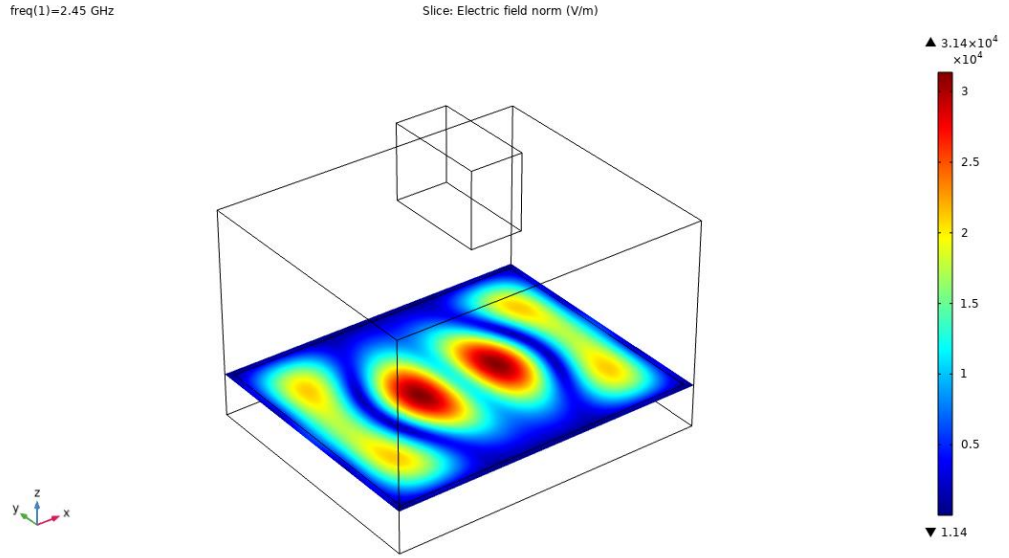
a1x=0.29096, a1y=0.2384, a1z=0.18942 freq(1)=2450 MHz Multislice: Electric field norm (V/m)



Şekil 4.7 Monte Carlo yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında elde edilen kavite geometrisinde ortaya çıkan elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü)

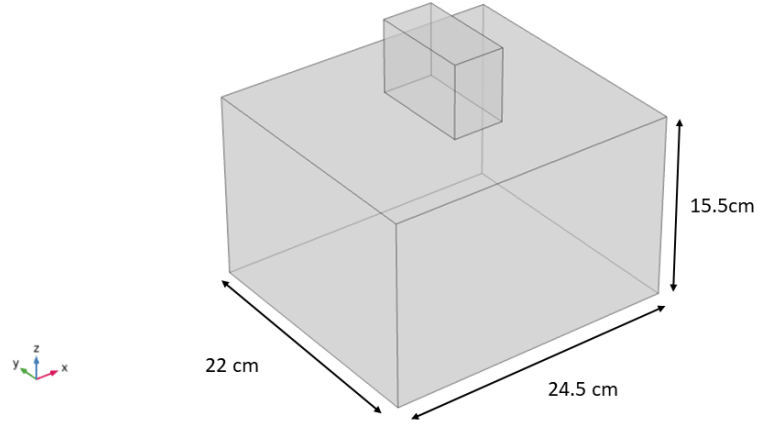


(a)



(b)

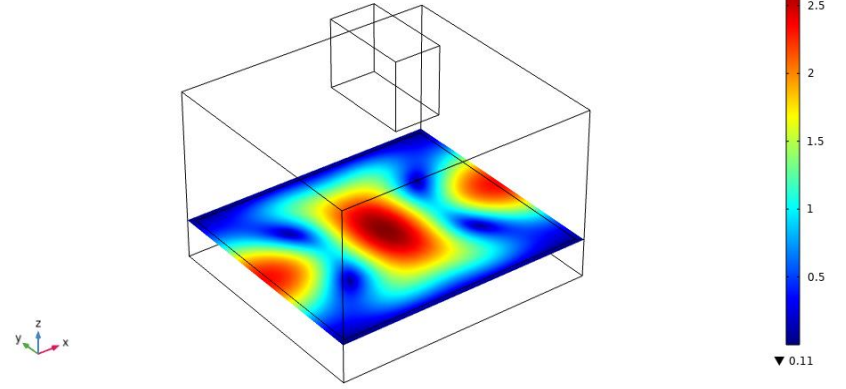
Şekil 4.8 Monte Carlo optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen optimum kavita boyutlarının (a) %20 ve (b)%10 kısaltılmasıyla elde edilen kavita geometrilerinde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü)



(a)

freq(1)=2.45 GHz

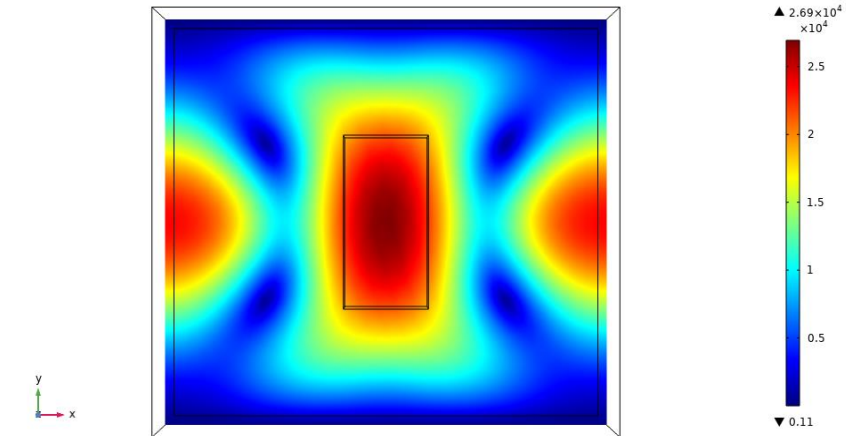
Slice: Electric field norm (V/m)



(b)

freq(1)=2.45 GHz

Slice: Electric field norm (V/m)



(c)

Şekil 4.9 (a) Kavite optimizasyonu yapılmış ve üretilmiş sistemin ölçüleri 24.5×22×15.5 cm) ve elektromanyetik alan dağılımının (b) önden ve (c) üstten görünümü (elektrik alan gücü)



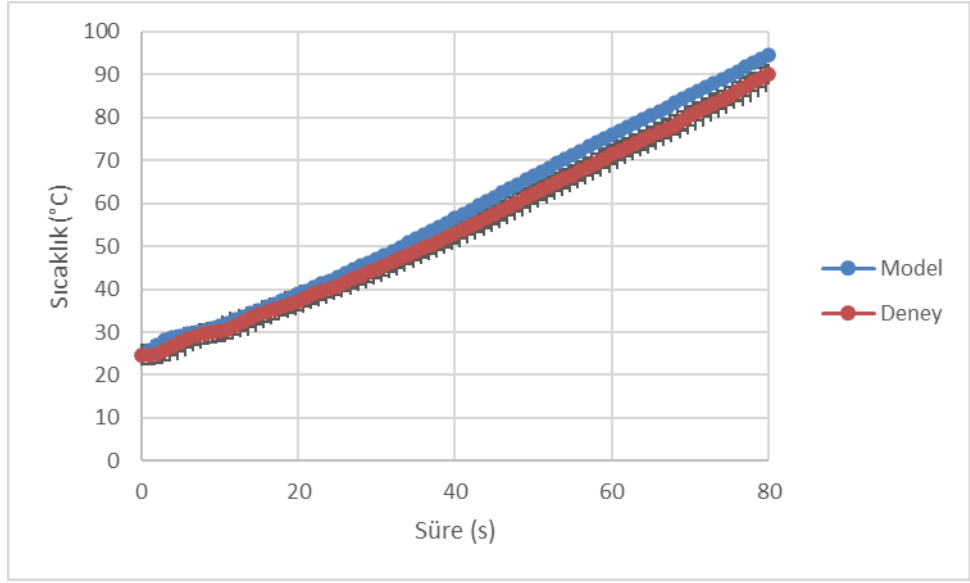
Şekil 4.10 Tasarımına karar verilerek üretimi gerçekleştirilen sistem

4.3 Tasarlanan ve Üretimi Gerçekleştirilen Portatif Sistemde Gerçekleştirilen Deneysel ve Matematiksel Model Doğrulama Çalışmaları

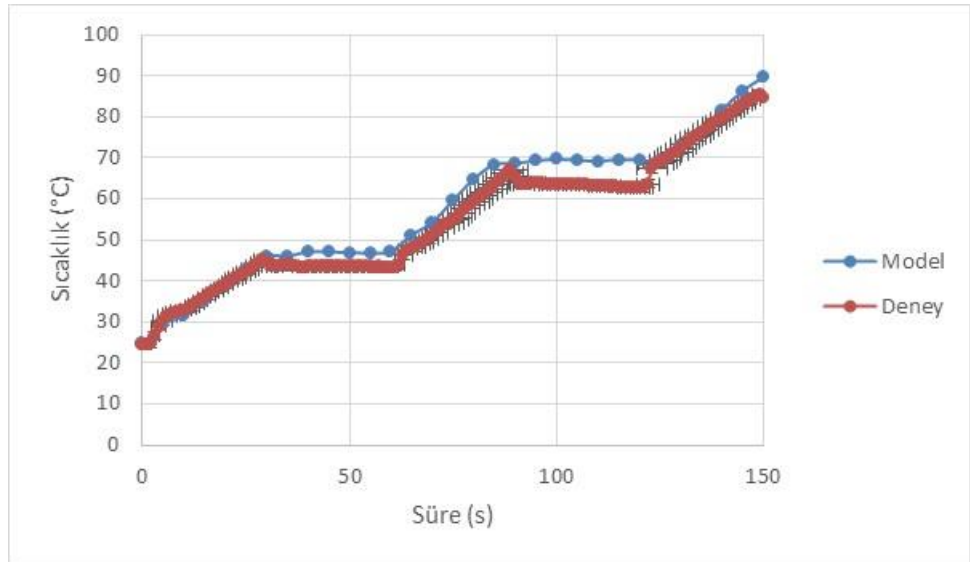
Tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen portatif sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda saf su, %0,5 konsantrasyonunda CMC ve %2'lik agar çözeltileri kullanılmış ve elde edilen sıcaklık değişim verileri matematiksel model doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Bu kapsamda %50 ve %100 güç değerleri kullanılmış ve her durum için deneyler 3 tekerrür olarak planlanmıştır. Şekil 4.11 saf su, Şekil 4.12 %0,5 CMC ve Şekil 4.13 %2 agar çözeltisi kullanılarak elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırmasını göstermektedir.

Bu bağlamda RMSE değerleri %100 ve %50 güç uygulama modlarında saf su (Şekil 4.11) için 1,47 ve 6,29 °C olarak belirlenirken; %0,5 CMC çözeltisi için (Şekil 4.12) 1,84 ve 5,25 °C olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda %2 agar çözeltisi için ise (Şekil 4.13) %100 güç uygulama modunda RMSE değeri 3,38 olarak bulunmuştur. Bu şekillerde gözlendiği ve RMSE değerlerinden de anlaşıldığı üzere deneysel sıcaklık değişimleri ile model sonuçları arasında bir uyum söz konusu olduğu kabul edilmiştir.

Saf su içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı (60. s) ve elektromanyetik alan dağılımı (80. s) Şekil 4.14 ve 4.15’de; %0,5 CMC çözeltisi içerisinde meydana gelen sıcaklık (60. s) ve elektromanyetik alan dağılımı (80. s) Şekil 4.16 ve 4.17’de ve %2 agar için ise sıcaklık (40. s) ve elektromanyetik alan dağılımı (40. s) Şekil 4.18 ve 4.19’da verilmiştir.

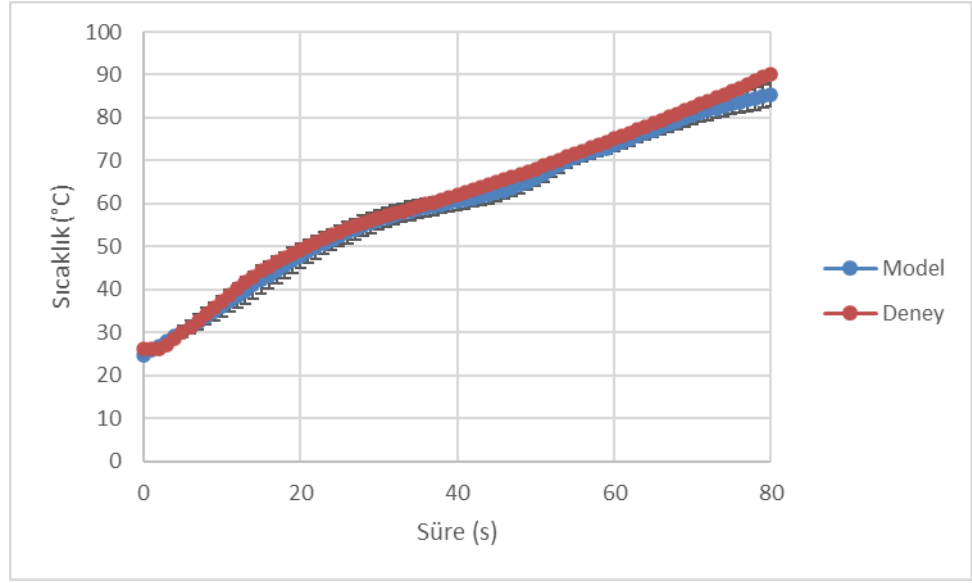


(a)

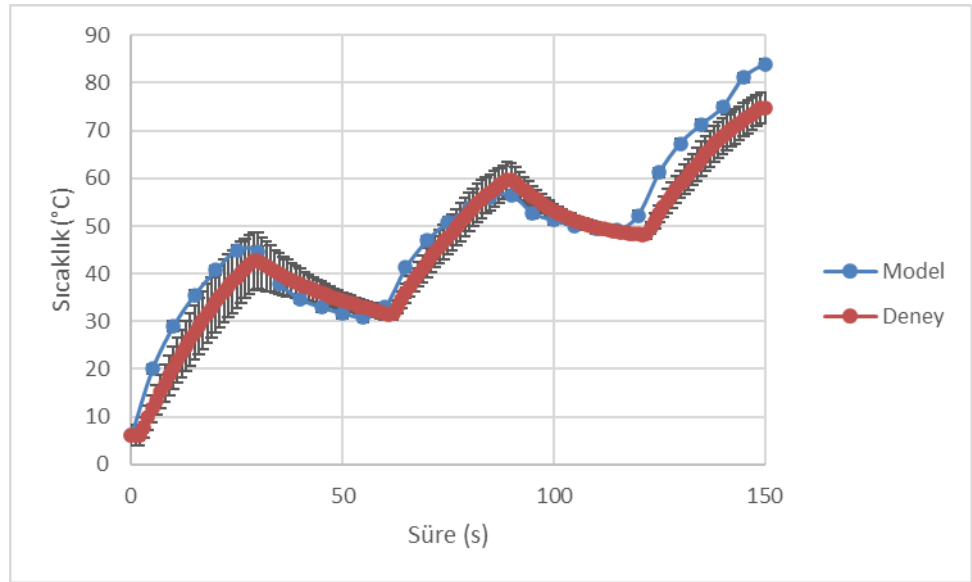


(b)

Şekil 4.11 Saf su kullanılarak, üretilen portatif sistemde elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırılması; (a) %100 ve (b) %50 güç uygulama koşulları

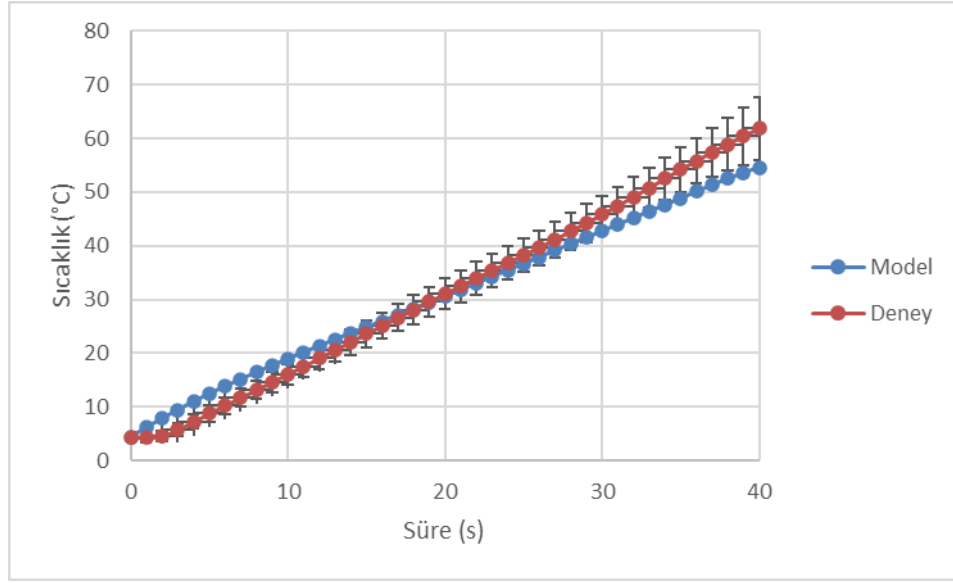


(a)

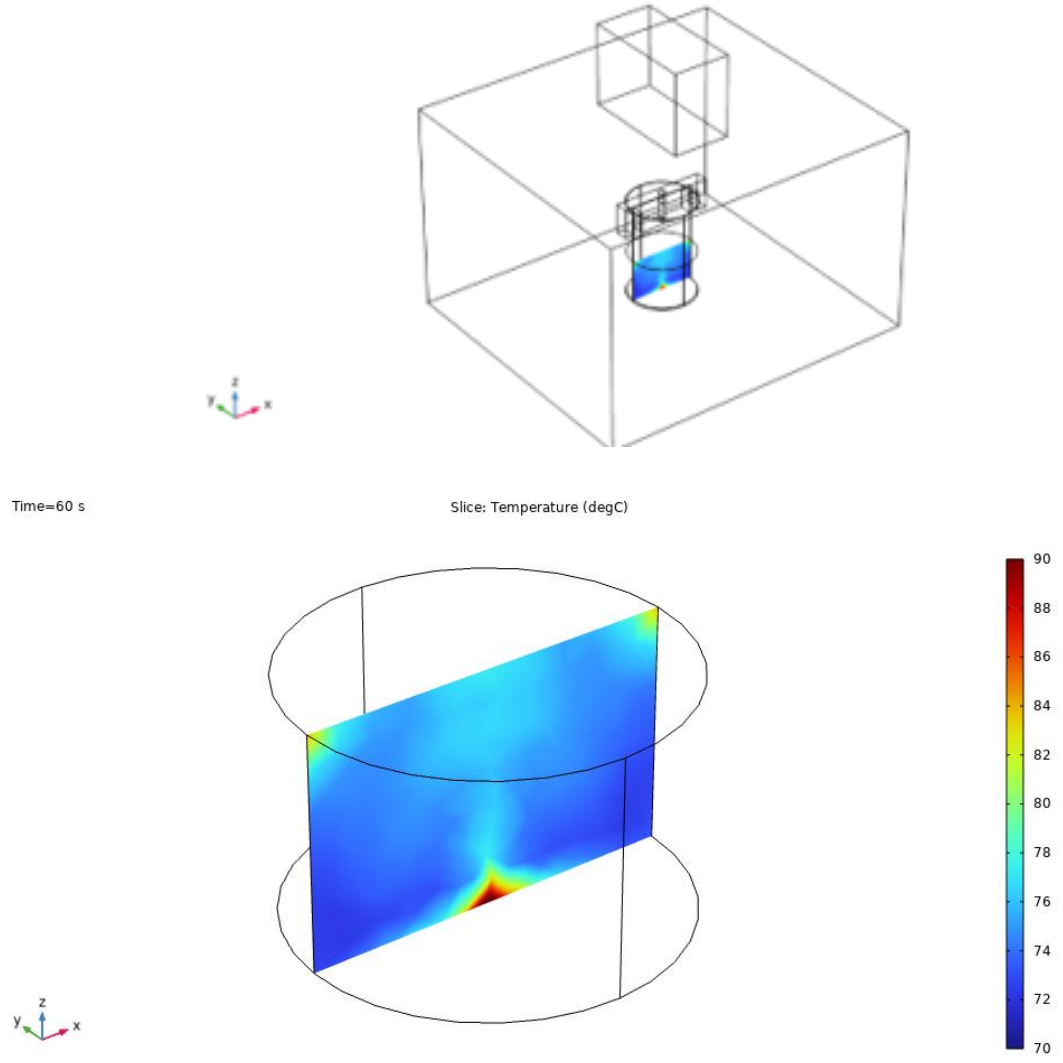


(b)

Şekil 4.12 %0,5 CMC çözeltisi kullanılarak, üretilen portatif sistemde elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırılması; (a) %100 ve (b) %50 güç uygulama koşulları



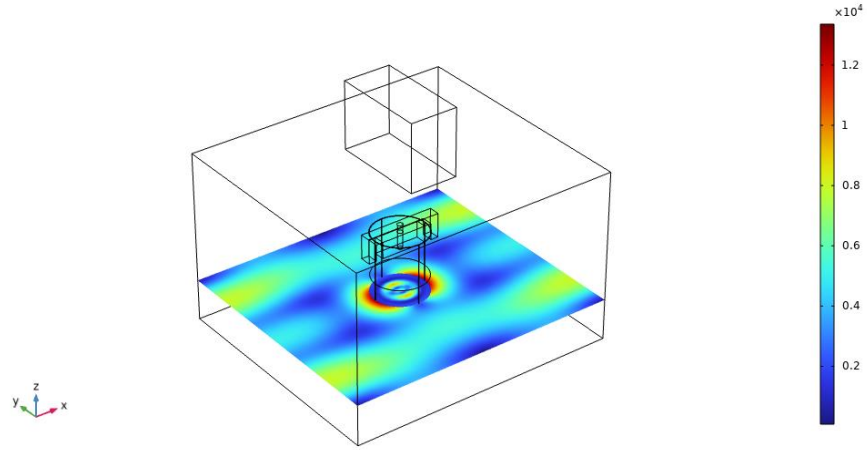
Şekil 4.13 %2 Agar çözeltisi kullanılarak, üretilen portatif sistemde elde edilen deneysel sıcaklık değişiminin model sonuçları ile karşılaştırılması; %100 güç uygulama koşulu



Şekil 4.14 Saf su kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı ($t= 60s$)

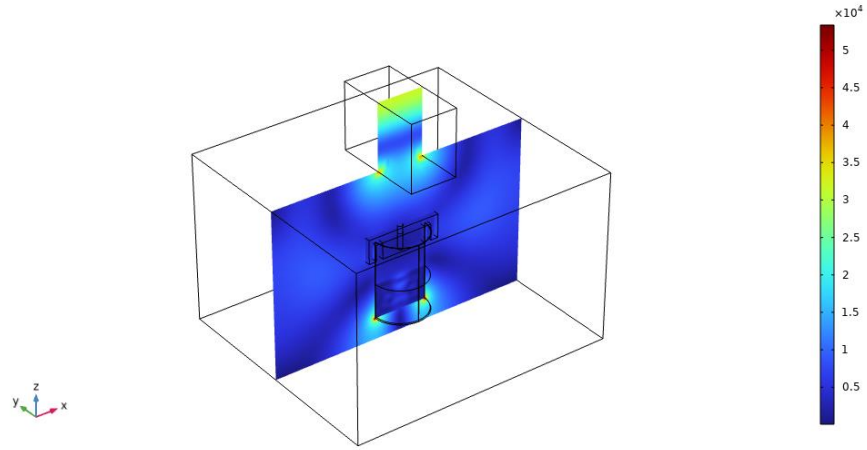
Time=80 s

Slice: Electric field norm (V/m)



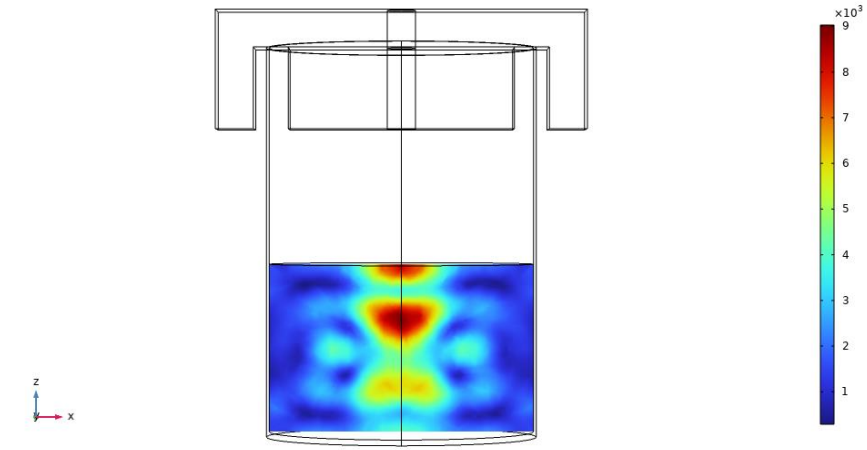
Time=80 s

Slice: Electric field norm (V/m)

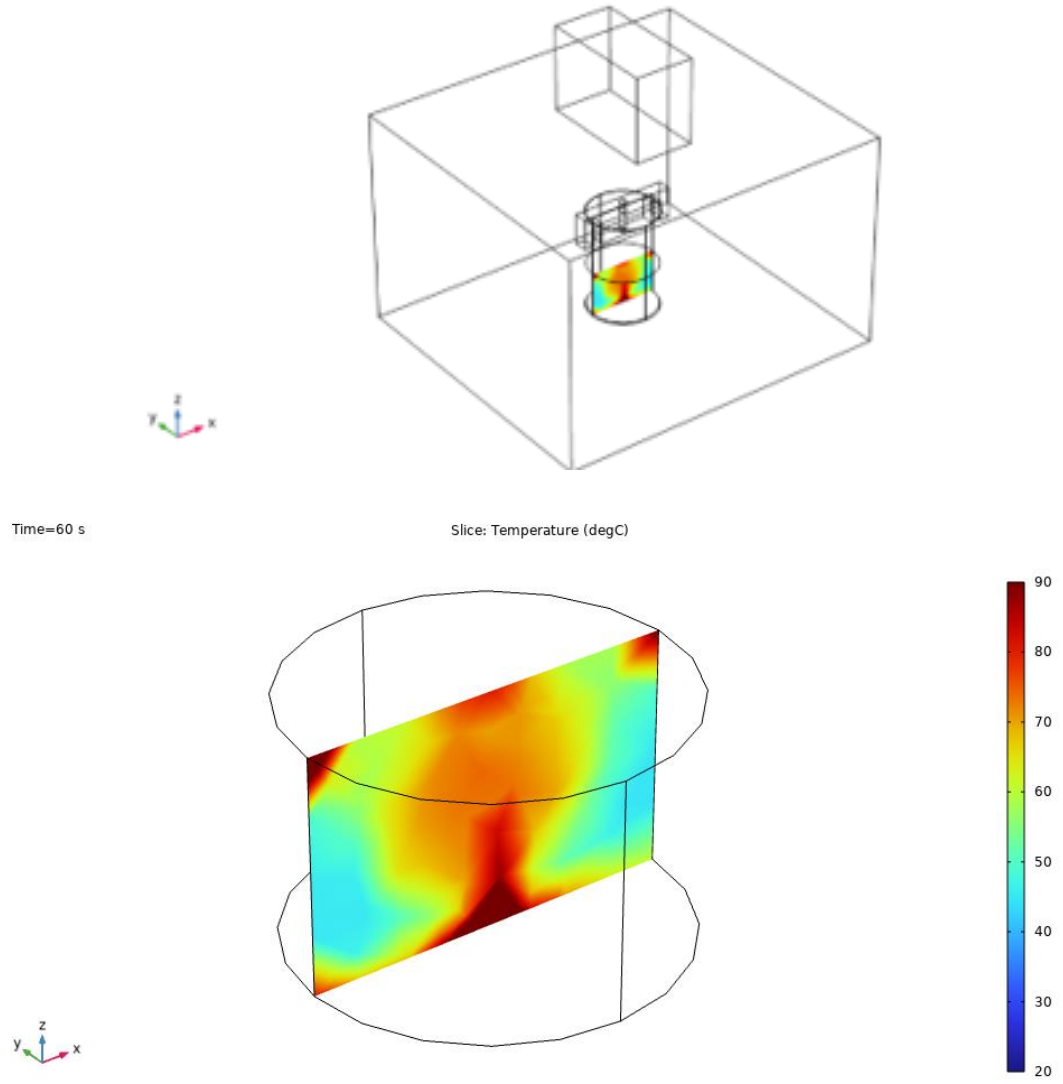


Time=80 s

Slice: Electric field norm (V/m)



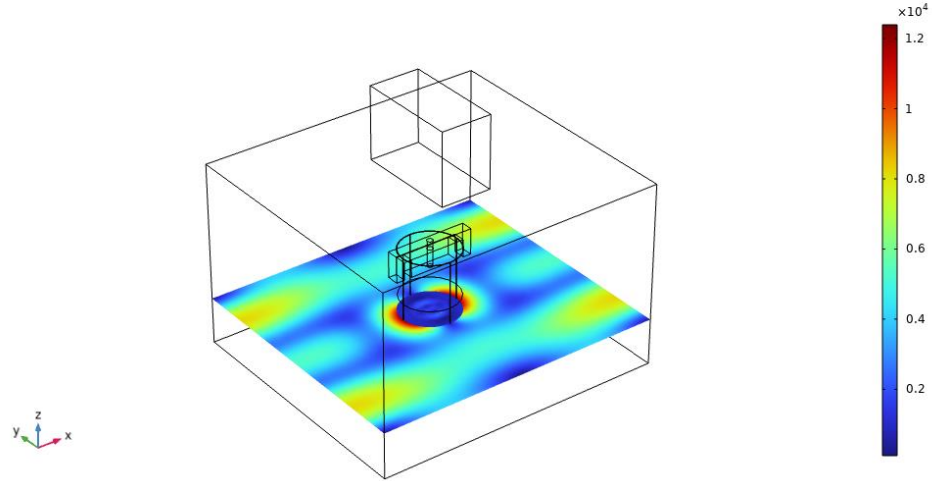
Şekil 4.15 Saf su kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü-t=80s)



Şekil 4.16 %0,5 CMC çözeltisi kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı (t= 60s)

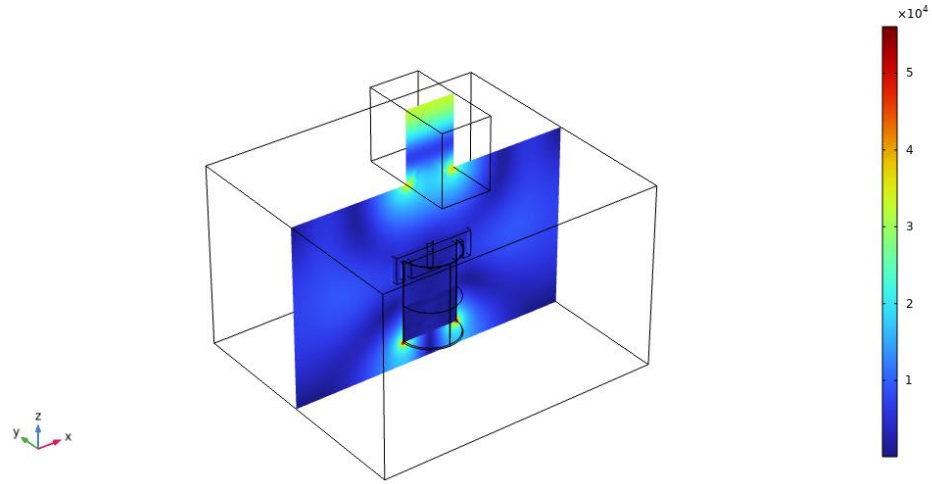
Time=80 s

Slice: Electric field norm (V/m)



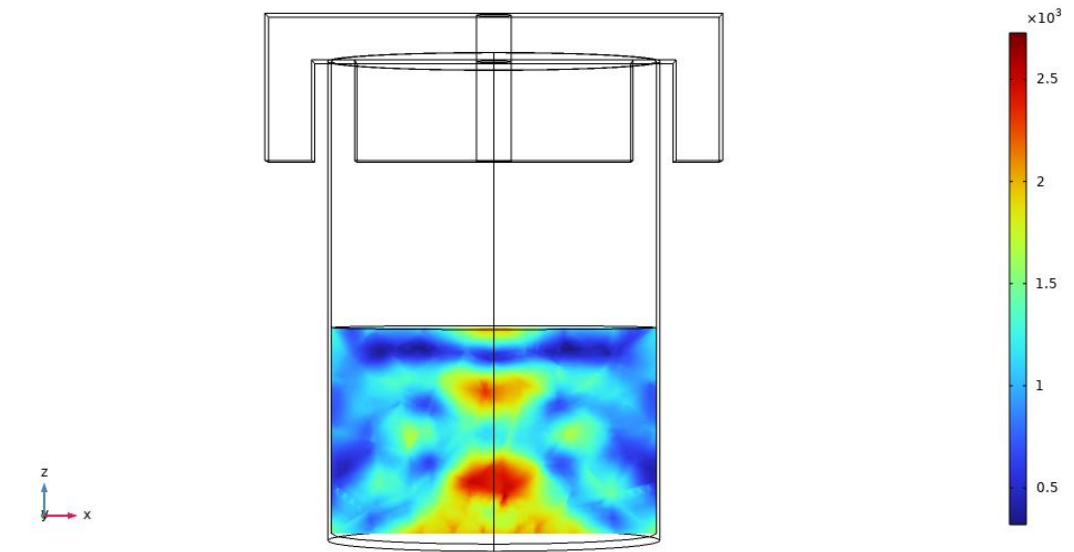
Time=80 s

Slice: Electric field norm (V/m)

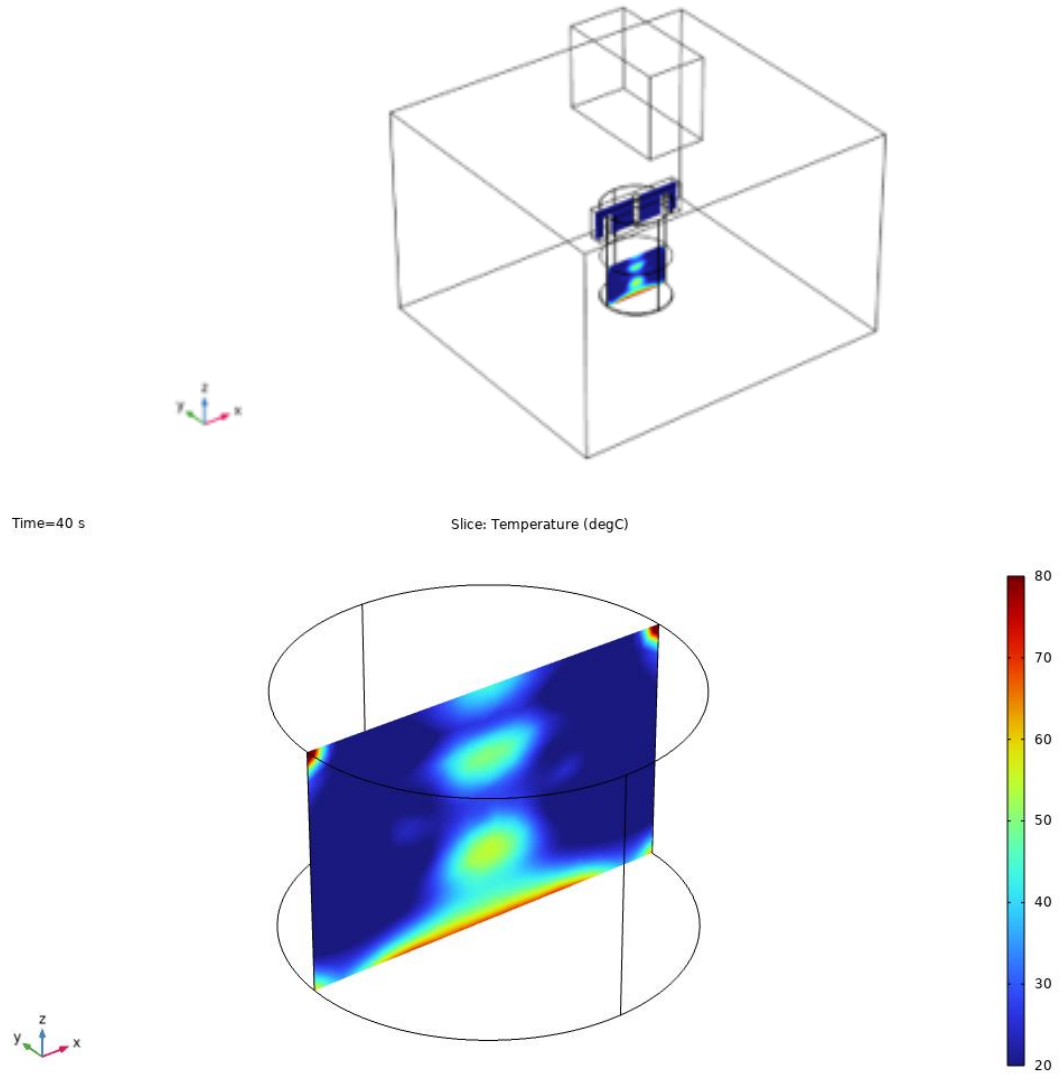


Time=80 s

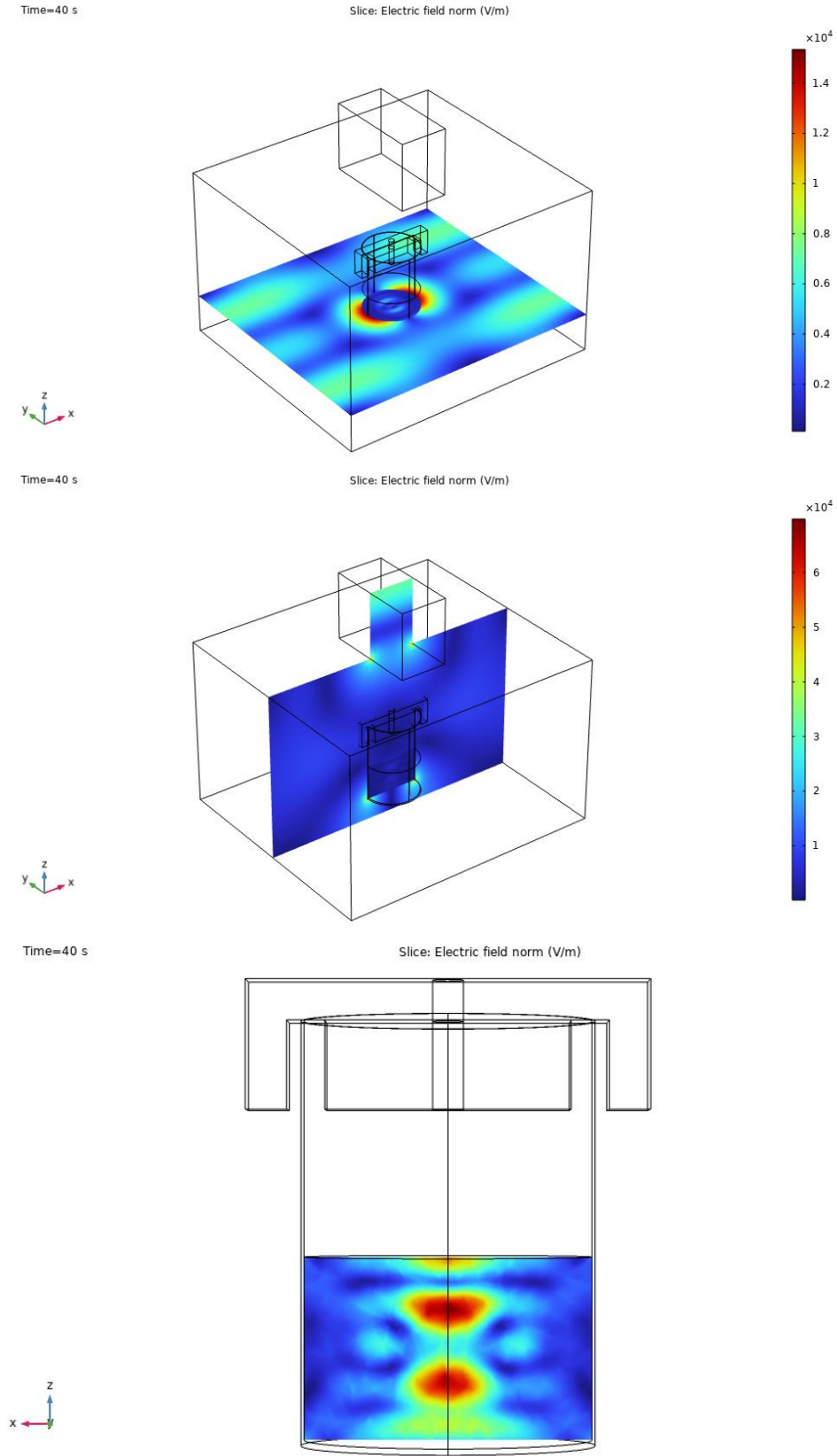
Slice: Electric field norm (V/m)



Şekil 4.17 %0,5 CMC kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü-t= 80s)



Şekil 4.18 %2 agar çözeltisi kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi sıcaklık dağılımı ($t= 40$ s)



Şekil 4.19 %2 agar çözeltisi kullanılarak (%100 güç uygulamasında), üretilen portatif sistemde elde edilen ürün içi elektromanyetik alan dağılımı (elektrik alan gücü- $t=40s$)

4.4 Konvansiyonel Sistemden Elde Edilen Sonuçlar ile Portatif Sistem Sonuçlarının Karşılaştırılması

Konvansiyonel sistemden elde edilen ısı işlem hızı – verimliliği ile tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla birim zamanda birim güç uygulaması ile elde edilen sıcaklık değişimi sonuçları karşılaştırılmıştır $\left(q_{rate} - \frac{^{\circ}C}{W-s} \right)$:

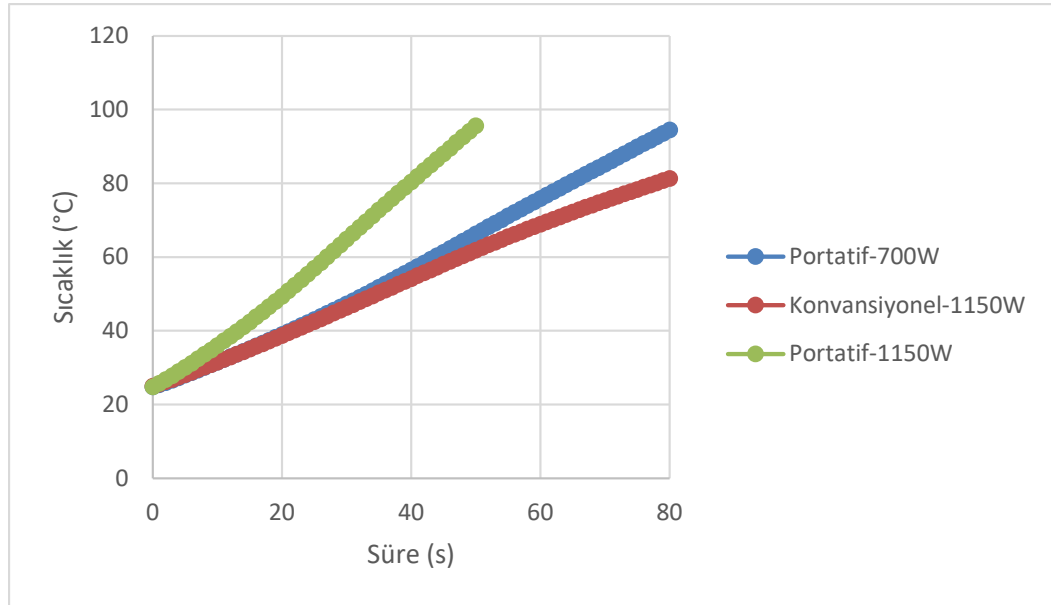
$$q_{rate} = \frac{\Delta T}{t \cdot P} \quad (4.1)$$

Bu kapsamda konvansiyonel sistem için 1150 W, tasarlanarak üretilen sistem için ise 700 W güç değerleri kullanılırken; üretilen sistemde 1150 W güç uygulaması ile ek bir simülasyon çalışması da gerçekleştirilmiştir. Saf su, %0,5 CMC çözeltisi ve %2 agar jeli kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir (bu bağlamda ürün hacimsel sıcaklık ortalamasının 80 °C’ye ulaşması için gerekli süre temel olarak alınmıştır. %2 agar çözeltisi için bu değer, ürünün hızlı erime göstermesinden dolayı 35 °C olarak kullanılmıştır.). Bu ürünler için hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişimi karşılaştırmaları ise sırasıyla Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22’de gösterilmektedir.

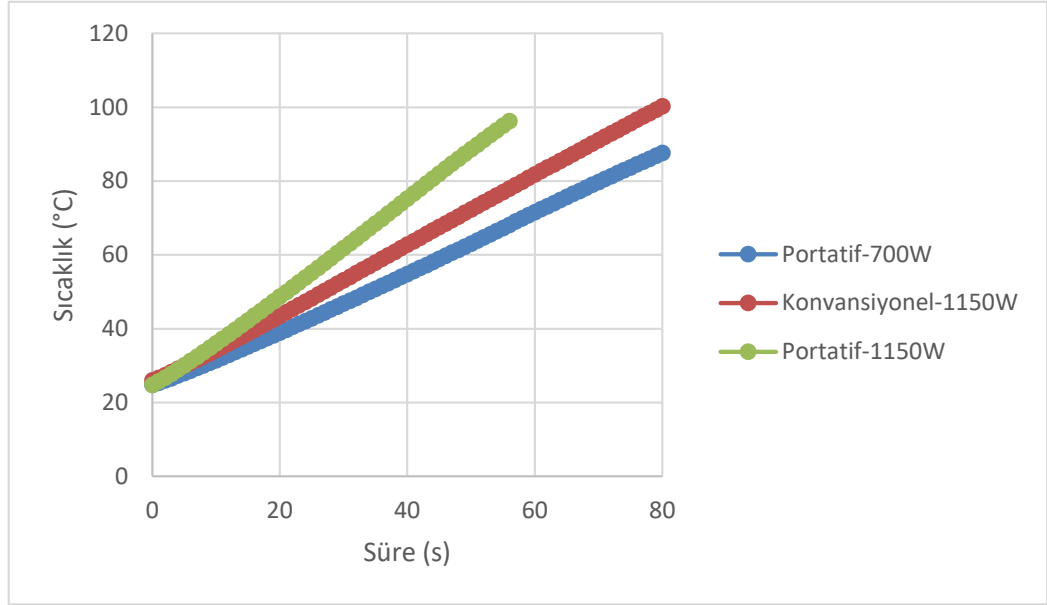
Newtonumsu bir akışkan olan saf suyun kullanıldığı durumda, (normal oda koşullarından) 80 °C’lik bir ortalama sıcaklık değerine ulaşma süresi tasarlanarak üretilen mikrodalga sistemin kullanılması durumunda (konvansiyonel sisteme göre 1150 W güç uygulaması durumunda) 2 kat daha hızlı olurken 700 W güç uygulaması ile de yeterli bir ısı transferi hızı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.20). Newtonumsu olmayan yüksek viskoziteli bir örnek olan %0,5 CMC çözeltisi kullanımında da örneğin 80 °C’nin üzerine çıkması için gerekli proses süresi %25 oranında kısaltılabilmektedir (Şekil 4.21). Bu sonuçlar, tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemin ısı transferi hızı ve enerji verimliliği kapsamında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.2 Konvansiyonel sistem ve portatif sistemde birim zamanda birim güç uygulaması ile elde edilen sıcaklık değişimi sonuçları ($q_{rate} \times 1000$) ve hacimsel ortalama sıcaklık değeri temelinde 80 °C'ye ulaşmak için gerekli süre

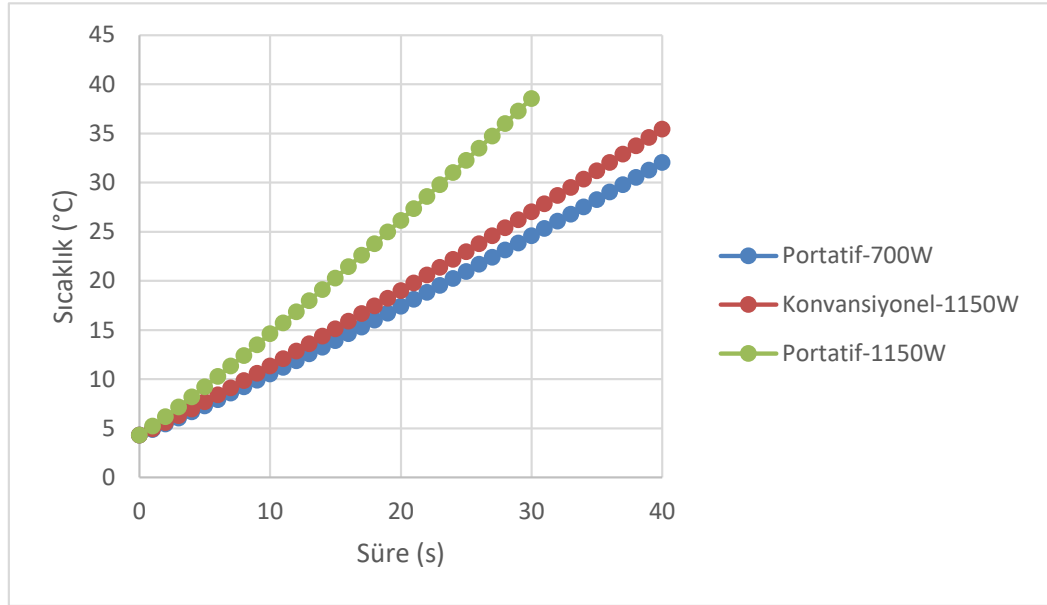
	Konvansiyonel sistem – 1150 W	Portatif sistem – 700W	Portatif sistem – 1150W
Saf su	0,614 – 78 s	1,200 – 65 s	1,226 – 40 s
%0,5 CMC çözeltisi	0,808 – 59 s	1,105 – 71 s	1,122 – 44 s
%2 agar jeli	0,677 – 40 s	0,984 – 44 s	1.018 – 28 s



Şekil 4.20 Saf su kullanılarak konvansiyonel sistemden elde edilen hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması



Şekil 4.21 %0,5 CMC çözeltisi kullanılarak konvansiyonel sistemden elde edilen hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması



Şekil 4.22 %2 Agar jeli kullanılarak konvansiyonel sistemden elde edilen hacimsel ortalama sıcaklık değeri değişiminin tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemden (portatif sistem) elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir

- Bu tez çalışması kapsamında konvansiyonel sistemlere göre daha düşük mikrodalga kavite hacminde (8.35 L) bir sistemin tasarım ve üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Tasarım çalışmaları konvansiyonel bir sistem kullanılarak geliştirilen ve bu sistemden elde edilen deneysel veriler kullanılarak doğrulaması yapılan bir matematiksel model temelinde yapılmıştır.
- Tasarım yapılarak üretilen sistemde 3 farklı örnek kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda saf su, Newtonumsu düşük viskoziteli ürünleri temsilen; %0,5 CMC çözeltisi Newtonumsu olmayan yüksek viskoziteli ürünleri temsilen ve %2 agar jeli de katı ürünleri temsilen kullanılmıştır.
- Farklı güç seviyelerinde gerçekleştirilen deney ve matematiksel model temelli simülasyon çalışmaları tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen sistemde etkin bir ısı transfer hızı elde edilebildiğini göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilecek sonuçlar portatif mikrodalga sistemlerinin tasarım ve optimizasyonunda önemli katkılar sağlayacak niteliktedir. Yüksek ısı transferi hızı temelinde düşük hacimli bir sistemin varlığı ileri de pillerden sağlanacak güç kaynağı ile çalışabilecek portatif bir sistem üretimine öncülük edebilecektir. Hallen uygulanan mikrodalga fırın üretim teknolojisinin içerisindeki kritik bileşen olan hareketli dalga tüplerinin beslenmesi için ihtiyaç duyulan anlık yüksek güç değerlerine mevcut pil teknolojisi ile ulaşmak tam anlamıyla imkânsız olmasa da; ekonomik ve fiziksel olarak fizibilitesi çok düşük bir işlemdir. Hareketli dalga tüpünün ihtiyaç duyacağı anlık yüksek güç değerlerine ulaşabilecek piller çok büyük hacimli çok ağır ve çok pahalı olabilmekte olup; şarj edilebilir olmaları durumunda da şarj süreleri tolere edilemeyecek kadar yüksek olabilmektedir. Bunun yanı sıra pillerin DC ürettiği, hareketli dalga tüplerinin ise AC ile çalışıyor olmasından ötürü bu sistemlerin arasına yine yüksek maliyet hacim ve ağırlıklı DC-AC dönüştürücü devreler tasarlanması ve eklenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak

günümüz teknolojisi ile, "pille çalışan mikrodalga fırın" ekonomik ve fiziksel açıdan fizibilitesi düşük bir kavram olarak göze çarpmaktadır. Ancak, yakın gelecekte pil ve batarya teknolojilerinde devrimsel birtakım yenilikler olması; farklı teknolojik altyapılara dayalı, anlık güç kapasitesi çok yüksek ve çok daha hızlı şarj edilebilir yeni pil ve batarya teknolojilerinin geliştirilmesi söz konusu olacaktır. Ancak, bu proje neticesinde elde edilecek bilgi birikimi daha sonraki projelerde aktif olarak kullanılacak olup devam edecek olan çalışmalar kapsamında, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilecek olan sistemin, güneş ya da rüzgâr enerjisi ile kullanılabilmesi konusunda da proje planları yapılacaktır. Ayrıca, şu an itibarıyla ekonomik ve fiziksel anlamda fizibilitesi düşük olan "pille çalışan mikrodalga fırın kavramının, yakın gelecekte pratikte uygulanabilir ve ticarileşebilir ürünler doğacak şekilde evrilebileceği düşünülmekte olup bu bağlamda düşük hacimli ve ısı transfer hızı – enerji verimliliği yüksek olan sistemlerin tasarlanması önemli bir nokta olacaktır.

KAYNAKLAR

- Altin, O., Skipnes, D., Skåra, T., & Erdogdu, F. (2022). A computational study for the effects of sample movement and cavity geometry in industrial scale continuous microwave systems during heating and thawing processes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102953.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- Basak, T., & Kumaran, S. S. (2005). A generalized analysis on material invariant characteristics for microwave heating of slabs. *Chemical Engineering Science*, 60(20), 5480-5498.
- Basak, T., & Meenakshi, A. (2006). A theoretical analysis on microwave heating of food slabs attached with ceramic plates: Role of distributed microwave incidence. *Food research international*, 39(8), 932-944.
- Baysal, T., Demirdöven, A., & Ergün, A. R. (2013). Kara havuç suyu üretiminde elektroliz ve mikrodalga uygulamalarının verim ve kalite özellikleri üzerine etkileri. *Gıda*, 38(5), 291-298.
- Bernussi, A. L. M., Chang, Y. K., & Martínez-Bustos, F. (1998). Effects of production by microwave heating after conventional baking on moisture gradient and product quality of biscuits (cookies). *Cereal chemistry*, 75(5), 606-611.
- Campanone, L. A., & Zaritzky, N. E. (2005). Mathematical analysis of microwave heating process. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 359-368.
- Campbell, N. L., Clowes, R., Ritchie, L. K., & Cooper, A. I. (2009). Rapid microwave synthesis and purification of porous covalent organic frameworks. *Chemistry of Materials*, 21(2), 204-206.
- Chatterjee, S., Basak, T., & Das, S. K. (2007). Microwave driven convection in a rotating cylindrical cavity: A numerical study. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1269-1279.
- Chaumet, P. C., Belkebir, K., & Sentenac, A. (2009). Experimental microwave imaging of three-dimensional targets with different inversion procedures. *Journal of Applied Physics*, 106(3).
- Cooper, A., & Brodie, G. (2009). The effect of microwave radiation and soil depth on soil pH, N, P, K, SO₄ and bacterial colonies. *Plant Protection Quarterly*, 24(2), 67-70.
- Coronel, P., Simunovic, J., Sandeep, K. P., Cartwright, G. D., & Kumar, P. (2008). Sterilization solutions for aseptic processing using a continuous flow microwave system. *Journal of Food Engineering*, 85(4), 528-536.

- Datta, A. K. (2001). Mathematical modeling of microwave processing of foods: An overview. *Food Processing Operations Modeling*, 150-190.
- Elsa, A., & Ubandawaki, S. (2005). Ketamine anaesthesia following premedication of rabbits with vitamin C. *Journal of Veterinary Science*, 6(3), 239-241.
- Ghasemi, M., Mashhadi, S., Asif, M., Tyagi, I., Agarwal, S., & Gupta, V. K. (2016). Microwave-assisted synthesis of tetraethylenepentamine functionalized activated carbon with high adsorption capacity for Malachite green dye. *Journal of Molecular Liquids*, 213, 317-325.
- Hong, Y., Chen, W., Luo, X., Pang, C., Lester, E., & Wu, T. (2017). Microwave-enhanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for syngas production. *Bioresource technology*, 237, 47-56.
- Jouquand, C., Tessier, F. J., Bernard, J., Marier, D., Woodward, K., Jacolot, P., ... & Laguerre, J. C. (2015). Optimization of microwave cooking of beef burgundy in terms of nutritional and organoleptic properties. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1), 271-276.
- Kadem, S., Younsi, R., & Lachemet, A. (2016). Computational analysis of heat and mass transfer during microwave drying of timber. *Thermal Science*, 20(5), 1447-1455.
- Karatas, O., Topcam, H., Altin, O., & ERDOĞDU, F. (2020). Microwave pasteurization of beer: A computational study with experimental validation.
- Karatas, O., Topcam, H., Altin, O., & Erdogdu, F. (2022). Computational study for microwave pasteurization of beer and hypothetical continuous flow system design. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102878.
- Kizer, G. (2013). *Digital microwave communication: engineering point-to-point microwave systems*. John Wiley & Sons.
- Liao, Jeni, et al. "Design of a Low-Voltage Instrumentation Amplifier at 1.2 V." 2021 IEEE 15th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID). IEEE, 2021.
- Littman, A. J., Kristal, A. R., & White, E. (2005). Effects of physical activity intensity, frequency, and activity type on 10-y weight change in middle-aged men and women. *International journal of obesity*, 29(5), 524-533.
- Liu, J., Chen, X., & Zhang, Z. (2005). A novel algorithm in the FMCW microwave liquid level measuring system. *Measurement Science and Technology*, 17(1), 135.
- Marra, G., Slavík, R., Margolis, H. S., Lea, S. N., Petropoulos, P., Richardson, D. J., & Gill, P. (2011). High-resolution microwave frequency transfer over an 86-km-

- long optical fiber network using a mode-locked laser. *Optics letters*, 36(4), 511-513.
- Mello, P. A., Barin, J. S., & Guarnieri, R. A. (2014). Microwave heating. In *Microwave-assisted sample preparation for trace element analysis* (pp. 59-75). Elsevier.
- Mizrahi, S. (2012). Mechanisms of objectionable textural changes by microwave reheating of foods: a review. *Journal of Food Science*, 77(1), R57-R62.
- Monzó-Cabrera, J., Pedreño-Molina, J. L., Lozano-Guerrero, A., & Toledo-Moreo, A. (2008). A novel design of a robust ten-port microwave reflectometer with autonomous calibration by using neural networks. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 56(12), 2972-2978.
- Nakayama, A., & Koyama, H. (1991). Buoyancy-induced flow of non-Newtonian fluids over a non-isothermal body of arbitrary shape in a fluid-saturated porous medium. *Applied Scientific Research*, 48, 55-70.
- Negi, A., Alex, J. M., Amrutkar, S. M., Baviskar, A. T., Joshi, G., Singh, S., ... & Kumar, R. (2015). Imine/amide-imidazole conjugates derived from 5-amino-4-cyano-N1-substituted benzyl imidazole: Microwave-assisted synthesis and anticancer activity via selective topoisomerase-II- α inhibition. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 23(17), 5654-5661.
- Osepchuk, J. M. (1984). A history of microwave heating applications. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, 32(9), 1200-1224.
- Patel, M., Kumar, M., Gupta, P., & Bhatnagar, J. (2017, December). Determination of PSAP and routing of emergency calls in IP multimedia subsystem. In *2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Percival, W. J., Sutherland, W., Peacock, J. A., Baugh, C. M., Bland-Hawthorn, J., Bridges, T., ... & 2dFGRS Team). (2002). Parameter constraints for flat cosmologies from cosmic microwave background and 2dFGRS power spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 337(3), 1068-1080.
- Pitarch, J., Catalá-Civera, J. M., Peñaranda-Foix, F. L., & García-Baños, B. (2006). Modeling microwave power structures based on k-furcated waveguides arbitrarily filled with materials by modal techniques. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 41(4), 46-61.
- Pozar, D. M. (2021). *Microwave engineering: theory and techniques*. John Wiley & sons.
- Prado-Gonjal, J., Villafuerte-Castrejón, M. E., Fuentes, L., & Moran, E. (2009). Microwave-hydrothermal synthesis of the multiferroic BiFeO₃. *Materials Research Bulletin*, 44(8), 1734-1737.

- Radoiu, M., & Mello, A. (2022). Technical advances, barriers, and solutions in microwave—assisted technology for industrial processing. *Chemical Engineering Research and Design*, 181, 331-342.
- Ren, S., Yu, H., Wang, L., Huang, Z., Lin, T., Huang, Y., ... & Liu, J. (2022). State of the art and prospects in metal-organic framework-derived microwave absorption materials. *Nano-Micro Letters*, 14(1), 68.
- Salvi, V. L. F., & Salazar, J. (2011). Prácticas rituales en el paisaje agrario. Una ofrenda como acto fundacional de andenes de cultivo tempranos del valle de Tañi (Provincia de Tucumán, Argentina). In *Tercer Taller de Arqueología del Noroeste Argentino (TANO A III)*. UNJu.
- San, S. (2022). Mikrodalga ile Kurutma İşleminde Döner Tabla Hızının Limon Kabuğunun Kurutma Kinetiği ve Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Shah, B., Pandya, D., Patel, H., & Shah, A. (2017). Microwave assisted synthesis of zeolitic material from agricultural waste bagasse fly ash for the sorption of monocrotophos. *International Journal of Environment and Waste Management*, 20(1), 1-20.
- Stephens, I. E., Chan, K., Bagger, A., Boettcher, S. W., Bonin, J., Boutin, E., ... & Zhou, Y. (2022). 2022 roadmap on low temperature electrochemical CO₂ reduction. *Journal of Physics: Energy*, 4(4), 042003.
- Topcam, H., Karatas, O., Erol, B., & Erdogan, F. (2020). Effect of rotation on temperature uniformity of microwave processed low-high viscosity liquids: A computational study with experimental validation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102306.
- Topcam, H., & Erdogan, F. (2021). Designing system cavity geometry and optimizing process variables for continuous flow microwave processing. *Food and Bioproducts Processing*, 127, 295-308.
- Topcam, H., Karatas, O., Erol, B., & Erdogan, F. (2020). Effect of rotation on temperature uniformity of microwave processed low-high viscosity liquids: A computational study with experimental validation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102306.
- Topcam, H., Coskun, E., Son, E., Kutuk, D., Aytac, S. A., Mert, B., ... & Erdogan, F. (2023). Microwave decontamination processing of tahini and process design considerations using a computational approach. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 86, 103377.

- Tuta, S., & Palazoğlu, T. K. (2017). Finite element modeling of continuous-flow microwave heating of fluid foods and experimental validation. *Journal of food engineering*, 192, 79-92.
- Uzzan, M., Kesselman, E., Ramon, O., Kopelman, I. J., & Mizrahi, S. (2006). Mechanism of textural changes induced by microwave reheating of a surimi shrimp imitation. *Journal of food engineering*, 74(2), 279-284.
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2010). Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—A review. *Food and bioprocess technology*, 3, 161-171.
- Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems engineering*, 88(1), 1-18.
- Vielva, P., Martinez-Gonzalez, E., Barreiro, R. B., Sanz, J. L., & Cayón, L. (2004). Detection of non-Gaussianity in the Wilkinson microwave anisotropy probe first-year data using spherical wavelets. *The Astrophysical Journal*, 609(1), 22.
- Wahidin, S., Idris, A., & Shaleh, S. R. M. (2016). Ionic liquid as a promising biobased green solvent in combination with microwave irradiation for direct biodiesel production. *Bioresource technology*, 206, 150-154.
- Wang, H., Lin, D., Shen, Z., & Jia, M. (2022). Two highly accurate electromagnetic map reconstruction methods. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(11), 12419-12424.
- Wang, S., Xu, Y., Fu, R., Zhu, H., Jiao, Q., Feng, T., ... & Zhao, Y. (2019). Rational construction of hierarchically porous Fe–Co/N-doped carbon/rGO composites for broadband microwave absorption. *Nano-Micro Letters*, 11, 1-16.
- Yang, H. W., & Gunasekaran, S. (2004). Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 445-453.
- Yarmand, M. S., & Homayouni, A. (2011). Microwave processing of meat. *Microwave heating*, 107-134.
- Yek, P. N. Y., Liew, R. K., Osman, M. S., Lee, C. L., Chuah, J. H., Park, Y. K., & Lam, S. S. (2019). Microwave steam activation, an innovative pyrolysis approach to convert waste palm shell into highly microporous activated carbon. *Journal of environmental management*, 236, 245-253.
- Zhou, D., Wei, M. X., Cao, J., Shi, L., Shen, J., & An, L. (2022). Simulation and experimental study of the field distribution of engine for electromagnetic pulse. *IEEE Access*, 10, 118475-118483.

- Zhou, L., Puri, V. M., Anantheswaran, R. C., & Yeh, G. (1995). Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating—Model development and validation. *Journal of food engineering*, 25(4), 509-529.
- Zhu, J. G., Zhu, X., & Tang, Y. (2007). Microwave assisted magnetic recording. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(1), 125-131.