



T.C.  
Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**Endüstriyel Amaçlı Bir Mikrodalga Fırının  
Tasarım Optimizasyon Adımlarının  
Belirlenmesi ve Analizi**

**Sofiya Ali MEKONNEN**

**Yüksek Lisans Tezi**



**Endüstriyel Amaçlı Bir Mikrodalga Fırının Tasarım  
Optimizasyon Adımlarının Belirlenmesi ve Analizi**

**Sofiya Ali MEKONNEN**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL AMAÇLI BİR MİKRODALGA FIRININ TASARIM  
OPTİMİZASYON ADIMLARININ BELİRLENMESİ VE ANALİZİ**

**Sofiya Ali MEKONNEN**

Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2018

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA danışmanlığında, Sofiya Ali MEKONNEN tarafından hazırlanan “ENDÜSTRİYEL AMAÇLI BİR MIKRODALGA FIRININ TASARIM OPTİMİZASYON ADIMLARININ BELİRLENMESİ VE ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** (Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA)

**Başkan :**

Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Uludağ Üniversitesi, FEN Bilimleri Enstitüsü,

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA

Uludağ Üniversitesi, FEN Bilimleri Enstitüsü,

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Bahadır HİÇDURMAZ

Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

Elektrik-Elektronik Müh Anabilim Dalı

İmza

  
Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof.Dr.Ali BAYRAM


Enstitü Müdürü

20.../6.../2018 (Tarih)

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

13/06/2018  
İmza 

**Sofiya Ali MEKONNEN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ENDÜSTRİYEL AMAÇLI BİR MİKRODALGA FIRININ TASARIM OPTİMİZASYON ADIMLARININ BELİRLENMESİ VE ANALİZİ

**Sofiya Ali MEKONNEN**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğretim Üyesi Sibel YENİKAYA

Bu tez çalışmasında, endüstriyel mikrodalga fırın tasarımındaki optimizasyon adımları belirlenmiş ve bu adımların analizi gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga fırının optimal tasarımı için rezonatör içindeki elektrik alan dağılımı bilinmelidir. Hem tek hem de çok modlu, yüklü rezonatörlerde bunun yöntemi genel olarak nümerik hesaplama yöntemleridir. Mikrodalga tasarımının verimi, çok modlu rezonatör içindeki elektrik alan dağılımına bağlıdır. Elektrik alan dağılımı ise giriş gücüne, mikrodalga frekansına, mikrodalga uygulanan malzemenin geometrik ve dielektrik özelliklerine, malzemenin rezonatör içindeki pozisyonuna, rezonatör geometrik özelliklerine, dalga kılavuzlarının sayısına ve pozisyonlarına bağlıdır. Bu tez çalışmasında, tasarım başarısını belirleyen bu faktörlerin etkileri hem simüle edilmiş, hem de deneysel olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrodalga Isıtma, Verim, Elektrik Alan dağılımı,  
Endüstriyel fırın

**2018, xi + 70 sayfa.**

## **ABSTRACT**

Msc Thesis

**ANALYSIS AND DETERMINATION OF DESIGN OPTIMIZATION STEPS OF  
AN INDUSTRIAL PURPOSE MICROWAVE OVEN**

**Sofiya Ali MEKONNEN**

Uludag University  
Department of Electronics Engineering  
Graduate School of Natural and Applied Sciences

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Sibel YENİKAYA**

In this study, the design optimization steps of the microwave oven used in industrial applications were determined and analyzed. For an optimal design of the microwave oven, the electric field distribution within the resonator must be known. The electric field distribution within both single and multimode loaded resonators is generally calculated through different numerical methods. The efficiency of the microwave design depends on the electric field distribution within the multimode resonator. The electric field distribution depends on level of input power, the microwave frequency, the shape and dielectric property of the material to be processed, the position of the material in the resonator, position of the material in the resonator, the geometry of the resonator, and the number and position of the waveguides. In this study, these factors which have a direct impact on the performance of microwave heating have been studied numerically and experimentally. In this thesis study, the effects of these factors determining the design success were studied both simulated and experimentally.

**Key words: Microwave heating, Efficiency, Electric Field distribution, Industrial oven**

**2018, xi + 70 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca fikirleriyle bana yol gösteren, yardımlarını benden esirgemeyen, sıcak ve sevecen tavırlarıyla desteğini her zaman hissettiğim tez danıőmanım Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Dr. Öğretim Üyesi Sibel YENİKAYA'e, bana daima destek olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Sofiya Ali MEKONNEN

(Elektronik Mühendisi)

Haziran 2018



## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Elektromanyetik Alanlar .....	3
2.2 Maxwell Denklemleri.....	4
2.3 Mikrodalga Isıtma .....	9
2.4 Mikrodalga Fırını.....	16
2.5 Mikrodalga Fırının Performansını Etkileyen Faktörler.....	19
2.5.1 Frekans.....	19
2.5.2 Dielektrik Özellikler.....	19
2.5.3 Malzemenin fırın içerisindeki konumu .....	20
2.5.4 Mikrodalga fırın geometrisi ve boyutu.....	20
2.5.5 Malzemenin Fiziksel Geometrisi.....	20
2.5.6 Nem Miktarı .....	21
2.5.7 Mikrodalga Gücü.....	21
2.5.8 Kaynağın Konumu.....	21
2.5.9 Sıcaklık.....	22
2.5.10 Yoğunluk.....	22
2.6 Mikrodalga Fırınların Avantaj ve Dezavantajları.....	22
2.7 KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	29
3.1 Materyal.....	29

3.1.1 Problemin Tanımlanması.....	29
3.1.2 Mikrodalga fırının sayısal modellemesi .....	30
3.2 Yöntem .....	33
3.2.1 Rezonatör analizi.....	33
3.2.2 Mikrodalga rezonatöründe absorbe edilen enerji ve verim .....	36
3.2.3 Endüstriyel Amaçlı Mikrodalga Fırın .....	38
3.2.4 Tasarım ve optimizasyon adımları .....	39
4. BULGULAR VE TARTIŞIMA .....	42
4.1 Malzeme Geometrisi .....	43
4.2 Malzemenin Dielektrik Özellikleri.....	47
4.3 Mikrodalga Gücü.....	53
4.4 Çalışma Frekansı .....	54
4.5 Malzeme Konumu .....	57
4.5.1 Malzeme konumunun verime ve performansa etkisi.....	58
4.5.2 Optimizasyon sonuçları .....	60
4.6 Kaynağın Konumu.....	61
5. SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	70

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$c$	Serbest uzaydaki ışık hızı (m/s)
$\lambda$	Dalga boyu (m)
$f$	Frekans (Hz)
$\vec{D}$	Deplasman vektörü(C/m <sup>2</sup> )
$\rho$	Hacimsel yük yoğunluğu (C/m <sup>3</sup> )
$\vec{B}$	Manyetik indüksiyon vektörü (T)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
$\vec{J}$	Yüzeysel akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )
$\sigma_e$	Efektif iletkenlik (S/m)
$\sigma$	İletkenlik(S/m)
$\omega$	Açısal frekans (rad/s)
$t$	Zaman (s)
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$\mu_r$	Ortamın göreceli geçirgenliği
$\mu_0$	Serbest uzayın Manyetik geçirgenliği (H/m)
$\epsilon$	Dielektrik geçirgenlik
$\epsilon_r$	Ortamın göreceli geçirgenliği
$\epsilon_0$	Serbest uzayın dielektrik sabiti (F/m)
$\epsilon'$	Dielektrik sabiti
$\epsilon''$	Dielektrik kayıp faktörü
$P_a$	Giriş güç (W)

$P_b$	Absorbe edilmiş güç (W)
$P_d$	Mikrodalga kayıp güç yoğunluğu ( $W/m^2$ )
$\eta$	Verim
$dp$	Penetrasyon derinliği
$\alpha$	Zayıflatma faktörü
$k$	Isıl iletkenlik ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
$C_p$	Spesifik ısı ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )
$T$	Sıcaklık ( $^\circ C$ )
$f_{mnp}$	mnp Modunun Rezonans Frekansı (Hz)

### **Kısaltmalar Açıklama**

EMA	Elektromanyetik alanı
ISM	Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi
TE	Enine elektrik
TM	Enine manyetik
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
FDTD	Sonlu farklar zaman yöntemi
MoM	Moment Yöntemi
VSWR	Gerilim duran dalga oranı
Hz	Hertz
MHz	Mega Hertz
GHz	Giga Hertz
W	Watt
g	Gram
kg	Kilogram

cm	Santimetre
cm	Santimetre
V	Volt
kV	Kilovolt
J	Joule



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elektromanyetik dalga .....	3
Şekil 2.2. Elektrik alan ve polarizasyon .....	6
Şekil 2.3. Polarizasyon işlemleri: (a) elektronik polarizasyon, (b) iyonik polarizasyon, (c) yönlendirme polarizasyonu ve (d) serbest yükü polarizasyonu.....	8
Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum (Gölcü ve Şen 2014) .....	9
<b>Şekil 2.5.</b> Elektromanyetik-ısı transfer modeli.....	15
Şekil 2.6. Dielektrik malzeme ile yüklü çok modlu rezonatörün elektrik alanının frekansla değişimi (Metaxas ve Meredith 1983) .....	18
Şekil 3.1. Mikrodalga fırının temel yapısı (Zhao 1996).....	29
Şekil 3.2. Mikrodalga ısıtma probleminin çözümü için genel simülasyon prosedürü (Zhao 2011). .....	31
Şekil 3.3. Mikrodalga ısıtma modellemesinde kullanılan akış diyagram.....	32
Şekil 3.4. Boş rezonatördeki elektrik alan dağılımı, $z = 3\text{cm}$ .....	35
Şekil 3.5. Dielektrik yüzeyden yansıyan ve iletilen dalgalar (Datta ve ark. 2001) .....	37
Şekil 4.1. Dielektrik malzeme ile yüklenmiş mikrodalga fırın geometrisi.....	42
Şekil 4.2. Dikdörtgen geometrili örnek 1 için; a) Elektrik alan dağılımı b) faks kağıdı cevabı c) Sıcaklık dağılımı .....	45
Şekil 4.3. Silindirik geometrili örnek 1 için; a) Elektrik alan dağılımı b) faks kağıdı cevabı c) Sıcaklık dağılımı .....	46
Şekil 4.4. Örnek 2 için; a) Fırın içindeki elektrik alan dağılımı b) Malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımı .....	48
Şekil 4.5. Örnek 3 için; a) Fırın içindeki elektrik alan dağılımı b) Malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımı .....	49
Şekil 4.6. KESTAMID kaplama ve dielektrik malzeme ile yüklü mikrodalga fırın geometrisi .....	50
Şekil 4.7. Örnek 2 için çok modlu rezonatör içinde elektrik alan dağılımı: a) dielektrik kaplama yokken b) malzeme üzerinde dielektrik kaplama olması durumunda .....	51
Şekil 4.8. Örnek 3 için çok modlu rezonatör içinde elektrik alan dağılımı: a) dielektrik kaplama yokken b) malzeme üzerinde dielektrik kaplama olması durumunda .....	52
Şekil 4.9. Farklı giriş güçlerinin elektrik alan dağılımı: a) 900 W b) 600 W .....	54
Şekil 4.10. Çalışma frekansı 2,40 GHz olduğu durumda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımı: a) Fırın boşken b) Fırın içerisinde malzeme varken.....	56
Şekil 4.11. Çalışma frekansı 2,45 GHz olduğu durumda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımı: a) Fırın boşken b) Fırın içerisinde malzeme varken.....	56
Şekil 4.12. Çalışma frekansı 2,50 GHz olduğu durumda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımı: a) Fırın boşken b) Fırın içerisinde malzeme varken.....	57
Şekil 4.13. Elektrik alan dağılımı: $\epsilon_r = 59.99 - j11.23$ ; a) $z = 20\text{ mm}$ b) $z = 60\text{ mm}$ c) $100\text{ mm}$ d) $140\text{ mm}$ e) $180\text{ mm}$ .....	59
Şekil 4.14. Farklı çamur malzemeler için verim ve yansımaya katsayısı .....	60
Şekil 4.15. Uyarma kaynağının rezonatör üzerindeki konumu: a) $z = 107\text{mm}$ b) $z = 147\text{mm}$ .....	61

Şekil 4.16. Uyarma kaynağının konumunun $z = 107$ cm iken elektrik alan dağılımına etkisi $z = 3$ cm; a) fırın boşken b) malzeme varken .....	62
Şekil 4.17. Uyarma kaynağının konumunun $z = 147$ cm iken elektrik alan dağılımına etkisi $z = 3$ cm; a) fırın boşken b) malzeme varken .....	63



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.2. Malzeme ile mikrodalganın etkileşimi .....	10
Çizelge 2.1. Bazı yaygın endüstriyel malzemelerin özellikleri (Mataxas ve Meredith 1983) .....	12
Çizelge 3.1. Boş rezonatörde rezonans frekansları ve modları .....	34
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin dielektrik özellikleri .....	43
Çizelge 4.2. Farklı geometrili malzemeler için absorbe edilen güç ve sistem verimi .....	45
Çizelge 4.3. Absorbe edilen güç ve verim .....	49
Çizelge 4.4. Malzemeletin üzeri boş ve KESTAMID kaplama konulduğunda, absorbe edilen güç ve verim .....	52
Çizelge 4.5. Farklı giriş güçleri için absorbe edilen güç ve verim .....	54
Çizelge 4.6. Farklı çalışma frekanslarındaki absorbe edilen güç ve verim .....	57
Çizelge 4.7. Farklı malzemenin fırındaki pozisyonlar için absorbe edilen güç ve verim .....	59
Çizelge 4.8. Uyarma kaynağı konumunun absorbe edilen güç ve sistem verimine etkisi .....	63



## 1. GİRİŞ

Mikrodalga teknolojisi ilk olarak ikinci dünya savaşı sırasında askeri ekipmanların üretimi ve tasarımı üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmaya başlanmış ve zamanla geliştirilerek farklı alanlarda kullanılmaya devam etmiştir. Günümüzde, mikrodalga ısıtma, yüksek ısıtma oranları, önemli enerji tasarrufu, azaltılmış işlem süresi, seçici ve hacimsel ısınma nedeniyle birçok endüstriyel alanda alternatif bir ısıtma tekniği olarak popülerlik kazanmaktadır. Bu alanlar; gıda işlemleri (çözme, kurutma, pişirme, pastörizasyon, sterilizasyon, eritme, kavurma/kızartma, denatürasyon, fırınlama), kimyasal süreçleri (polimerizasyon, plastik malzemelerin sertleştirilmesi, kauçuğun vulkanizasyonu, seramiklerin kurutulması ve sinterlenmesi, boyanmış ipliklerin, kâğıt ve atık çamurün kurutulması, plazma işlemleri), metalurji işlemleri ve TIP işlemleri (pastörizasyon, sterilizasyon, dezenfekte işlemi, enzimlerin ve küflün yok edilmesi)'dir. Bu işlemlerin başarılı olması için, mikrodalga fırın içerisindeki elektrik alan dağılımının ve dolayısıyla ısı dağılımının bilinmesi gerekmektedir.

Sistem performansını etkileyen ana faktörler, rezonatörün şekli ve boyutu, çalışma frekansı, güç seviyesi, malzemenin şekli ve dielektrik özellikleri, işlem görece malzemenin konumu, ve uyarıma kaynağının yeri olarak ifade edilebilir. Mikrodalga fırının tasarım ve optimizasyonunda rezonatör içindeki ve ısıtılacak malzemenin üzerindeki elektrik alan dağılımının bilinmesi, verimli şekilde çalışacak bir mikrodalga fırın tasarımı, uygun güç seviyesinin ve doğru ısıtma süresinin seçimi açısından büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla mikrodalga fırının içindeki elektromanyetik ve termal davranışların belirlenmesi tasarım ve optimizasyon açısından önemlidir.

Bu tezde, endüstriyel amaçlı bir mikrodalga fırın içindeki elektrik alan dağılımı dolayısıyla sistem verimini etkileyen faktörler incelenmiş ve tasarım optimizasyon adımları belirlenmiştir. Mikrodalga rezonatörü içerisindeki elektrik alan dağılımı sonlu elemanlar

yöntemini kullanan program kullanılarak elde edilmiştir. Simulasyon çalışmaları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu tez,

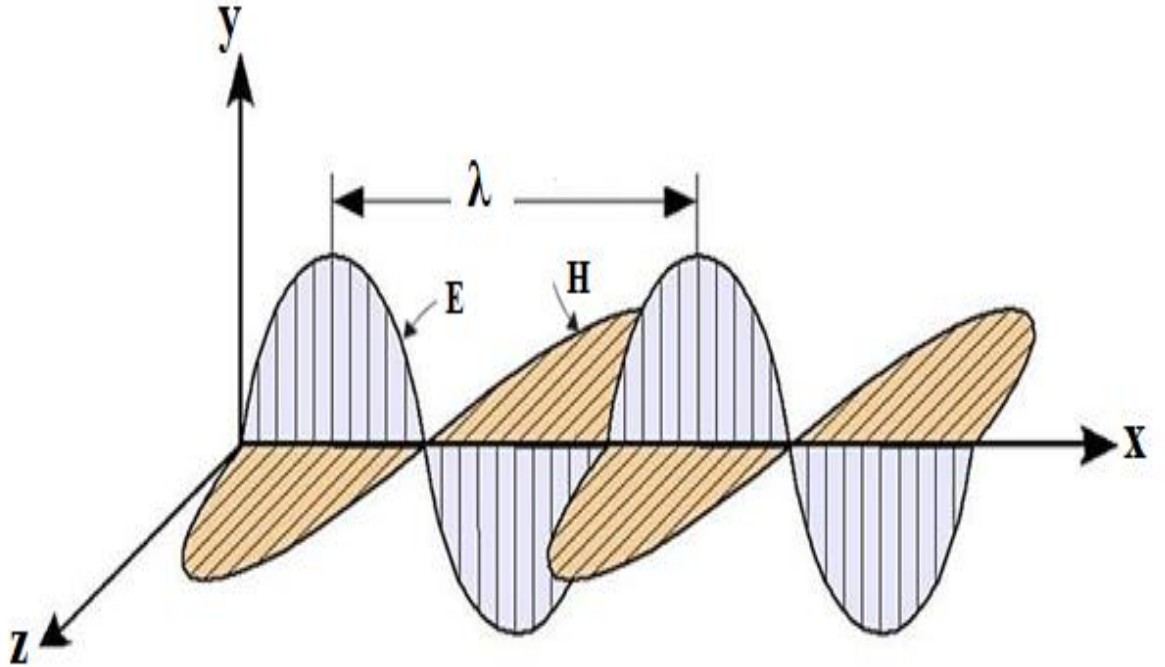
- Mikrodalga ısıtma sisteminin matematiksel modellenmesi
- Mikrodalga fırın performansını etkileyen faktörlerin incelenmesi,
- Endüstriyel amaçlı kullanılacak bir mikrodalga fırının tasarım optimizasyon adımlarının belirlenmesi,

Konularında katkıları sağlamaktadır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1 Elektromanyetik Alanlar

Elektromanyetik dalga, elektrik ve manyetik alanların bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Yayılan bir elektromanyetik dalganın elektrik alanı ( $\vec{E}$ ) ve manyetik alan ( $\vec{H}$ ) bileşeni vardır. Elektrik ve manyetik alan vektörleri hem birbirine hem de yayılma doğrultularına diktir. Elektrik alanın değişmesi manyetik alanı, manyetik alanın değişmesinde elektrik alanı oluşturur. Alanlardan birinin değişimi sağlandığında olaylar zincirleme olarak tekrarlanır ve elektrik ve manyetik alanlar serbest uzayda yan yana dizilerek ışık hızıyla yayılırlar. Şekil 2.1’de bir elektromanyetik dalganın şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Elektromanyetik dalga

Elektromanyetik alanların en belirgin özelliği frekans ve dalga boyudur. Bir elektromanyetik dalganın dalga boyu ( $\lambda$ ), elektrik veya manyetik alanın iki tepe noktası

arasındaki mesafedir. Frekans (f) ise bir saniyede belirli bir noktadan geçen dalga sayısıdır. Dalga boyu ve frekans, ters orantıdır. Frekans arttıkça dalga boyu kısalır ve alanda yayılan enerji yükselir. Serbest uzayda, ışık hızı:

$$c = \lambda \cdot f \quad 2.1$$

olarak ifade edilir. Burada c ışık hızı (m/s), f frekans (Hz) ve  $\lambda$  dalga boyu (m)'dur. Serbest uzayda yayılım yapan dalga yaklaşık  $3.0 \times 10^8$  m/s'lik bir hıza sahiptir.

## 2.2 Maxwell Denklemleri

Kayıplı dielektrik bir malzeme ile yüklenmiş mikrodalga fırının içerisindeki elektromanyetik alanların davranışı, Maxwell denklemlerinin çözümü ile belirlenir. Maxwell denklemleri aşağıda verilmiştir:

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

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad 2.3$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 2.4$$

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

Burada:  $\vec{B}$  manyetik indüksiyon,  $\vec{D}$  deplasman vektörü,  $\vec{E}$  elektrik alan şiddeti,  $\vec{H}$  manyetik alan şiddeti ve  $\vec{J}$  akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Yukarıdaki denklemler sırasıyla Gauss yasasını, manyetizma için Gauss yasasını, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasını ve Amper yasasını temsil etmektedir.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad 2.6$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad 2.7$$

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{E} \quad 2.8$$

burada:  $\rho$  yük yoğunluğu,  $\sigma_e$  efektif iletkenlik,  $\epsilon$  dielektrik geçirgenliği, ve  $\mu$  magnetik geçirgenliği temsil etmektedir.

Ortamın manyetik geçirgenliği şöyle ifade edilebilir:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad 2.9$$

burada:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabiti ve  $\mu_r$  ortamın göreceli geçirgenliğini ifade etmektedir.

Aynı şekilde, dielektrik geçirgenliği şu şekilde ifade edilebilir:

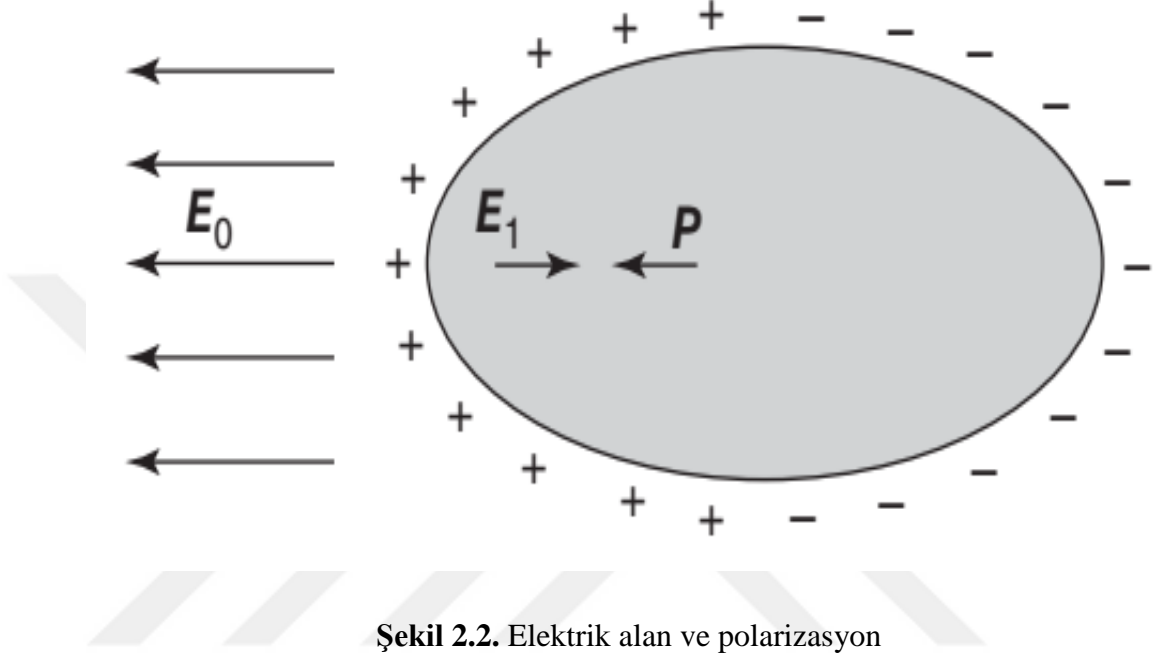
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad 2.10$$

burada:  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  serbest uzayın dielektrik geçirgenlik sabiti ve  $\epsilon_r$  ortamın dielektrik geçirgenliği ifade etmektedir.

Dielektrik malzemeler polar ve polar olmayan olarak sınıflandırılır. Polar olmayan molekül, pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezlerinin normal olarak çakıştığı bir moleküldür, polar molekülde ise kutup molekülü çakışamaz. Polar moleküller bu nedenle kalıcı dipol momentlerine sahiptir. Elektrik alanın bulunmaması durumunda, bu iki kutup rastgele yönlendirilir. Ancak güçlü elektrik alan bulunması durumunda, elektrik alan yönünde daha fazla dipolu yönlendirir. Polar olmayan molekülün yükleri, elektrik alan içerisine yerleştirildiğinde küçük bir yer değiştirmeye maruz kalır.

Moleküller elektrik alan tarafından polarize olurlar ve buna indüklenmiş dipol denilmektedir. Böylece, hem polar hem de polar olmayan dielektrik malzemeler, bir elektrik alanın etkisi altında aynı şekilde davranırlar. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi elektrik

alan uygulandığında bir yüzey üzerinde fazladan negatif yüklere ve diğer yüzey üzerinde pozitif yüklere sahip olacaktır.



Şekil 2.2. Elektrik alan ve polarizasyon

Bir kütle içinde pozitif elektriksel yük merkezi ile negatif elektriksel yük merkezi çakışmazsa elektriksel kutuplaşma (polarizasyon) oluşur. Asimetrik veya polar moleküllerde asimetrik dağılan elektronların ortak negatif yük merkezi, kütlelerin ağırlık merkezindeki protonların sahip olduğu ortak pozitif yük merkezi ile çakışmaz. Bu şekilde oluşan kutuplaşma sürekli dir. Diğer taraftan bireysel atomlarla simetrik moleküllerde zıt işaretli yük merkezleri çakışık tır ve net kutuplaşma yoktur. Ancak elektrik alan uygulanırsa elektronların ortalama konumu pozitif elektroda, pozitif iyon da negatif elektroda doğru bir miktar yer değiştirir. Böylece dış etki ile geçici kutuplaşma oluşur, alan kalkınca kutuplaşma da kaybolur. Alternatif alan uygulanırsa iç elektriksel yük merkezleri ve kutuplar sürekli yer değiştirir.

Yer değiştiren türlere bağlı olarak polarizasyon dört şekilde oluşur. Elektronik polarizasyon, iyonik polarizasyon, yönlenme polarizasyonu ve serbest yük polarizasyonu olmak üzere dört polarizasyon oluşur.

**Elektronik polarizasyon:** bir dielektrik malzemede, elektrik alan etkisi yokken elektronlar çekirdek çevresinde homojen dağılmışlardır ve yük merkezleri çakışıktır. Elektrik alan uygulandığında negatif yüklü elektronlar alanın pozitif elektroduna, pozitif yüklü çekirdek negatif elektroda doğru çok az yer değiştirir. Şekil 2.3a'da gösterildiği gibi, bir "uyarılmış dipol momenti" üretilir. Bu moleküllerin polarizasyonu elektronik polarizasyon ( $\vec{P}_e$ ) olarak adlandırılır. Elektronların duran dalga hareketlerinin frekansı  $10^{16}$  Hz düzeyindedir. Frekansları  $10^{14}$  Hz civarında olan ışık dalgaları elektronları kolaylıkla etkileyerek elektronik kutuplaşma oluşturur. Elektronik polarizasyon sıcaklıktan bağımsızdır, ancak alan gücü ile doğru orantılıdır. Ayrıca bütün malzemelerde oluşmasına rağmen elektronik kutuplaşmanın dielektrik sabite katkısı çok azdır.

**İyonik polarizasyon:** iyonik malzemelerde net elektriksel yük sıfırdır ve polarizasyon yoktur. Ancak elektrik alan uygulandığında, pozitif iyonlar negatif elektroda, negatif iyonlar pozitif elektroda doğru yer değiştirir. İyonların veya onların gruplarının bir dielektrik içinde yer değiştirmesi, Şekil 2.3b'de gösterildiği gibi moleküllerin iyonik polarizasyonunu ( $\vec{P}_i$ ) başlatır. İyonik polarizasyon da sıcaklıktan bağımsızdır.

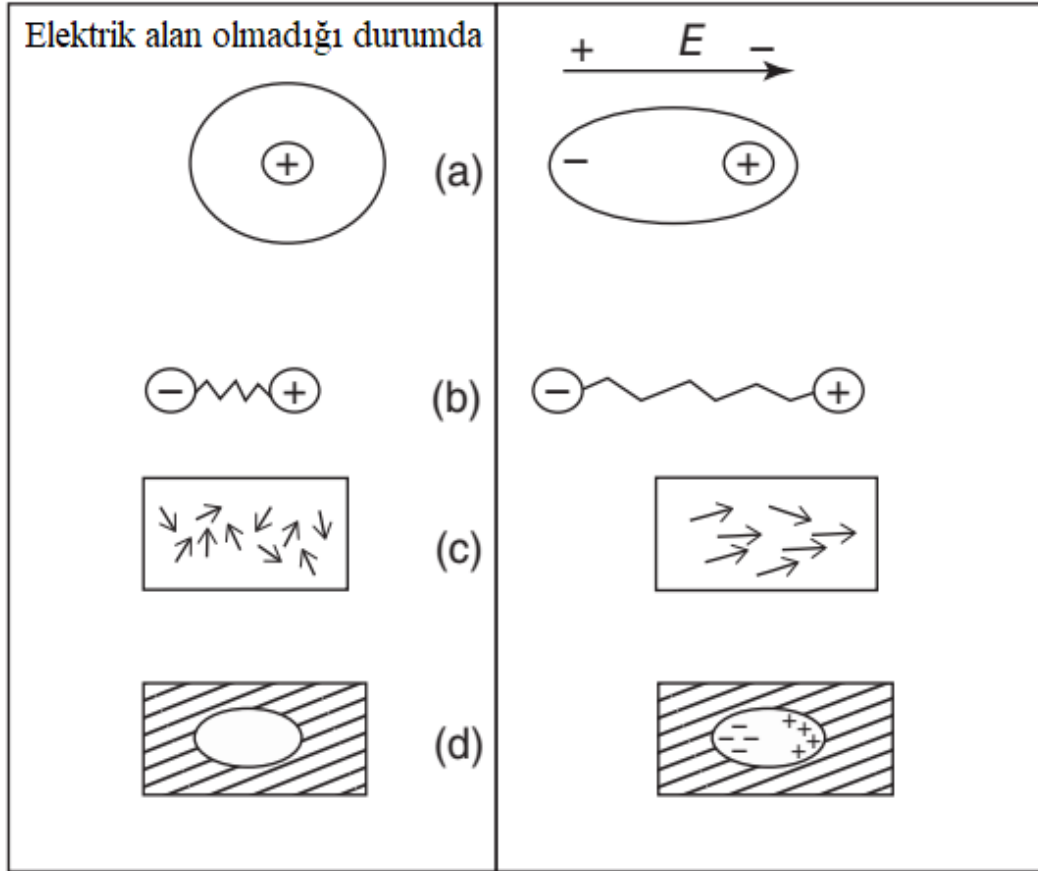
**Yönlenme polarizasyonu:** bir moleküldeki farklı atomlar arasındaki yükün asimetrik dağılımı, bir dielektrik molekülünde kalıcı dipol momentleri üretir. elektrik alan altında, bu kalıcı dipoller alanın yönüne doğru döndürülür ve böylece polarizasyona katkıda bulunurlar. Bu durumda, Şekil 2.3c'de gösterildiği gibi yönlenme polarizasyonunu ( $\vec{P}_o$ ) başlatır. Yönlenme polarizasyonu sıcaklığa bağlıdır. Artan sıcaklıkla, termal enerji malzemelerin içindeki kalıcı dipollerin hizalanmasını rastgele hale getirme eğilimindedir.

**Serbest yük polarizasyonu:** dielektrik malzemelerde, bir elektrik alanının etkisi altında, dielektrik malzeme boyunca hareket eden ve elektrodlarla temas etmeden dielektrik malzeme içindeki bulunan serbest yükler bulunabilir. Serbest yükler daha sonra bir yüzey veya bir serbest yükü olan bölgeler oluşturur, bu da dielektrik polarizasyonuna katkıda bulunan bir dipol momenti oluşturur. Bu mekanizma, Şekil 2.3d'de gösterildiği gibi dielektrik içinde bir serbest yük polarizasyonu ( $\vec{P}_s$ ) başlatır. Yönlenme polarizasyon gibi, serbest yükü polarizasyonu da sıcaklığa bağlıdır, çoğu durumda sıcaklık ile artar.

Bir dielektrik malzemenin toplam polarizasyonu, aynı anda dört mekanizmanın tümünü içerebilir. Bağımsız olduklarını varsayarsak, dielektrik malzemenin toplam polarizasyonu aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$\vec{P}_{total} = \vec{P}_e + \vec{P}_i + \vec{P}_o + \vec{P}_s \quad 2.11$$

Burdaki e, i, o ve s altındisler; elektronik, iyonik, yönlenme ve serbest yükü polarizasyonunu temsil etmektedir.

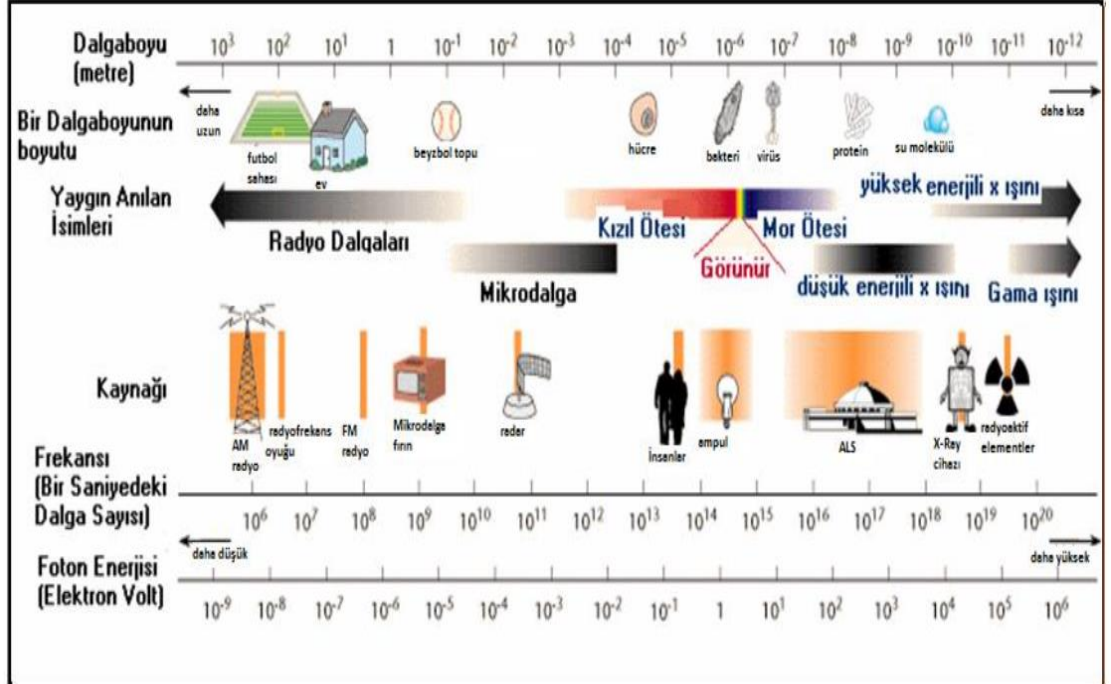


**Şekil 2.3.** Polarizasyon işlemleri: (a) elektronik polarizasyon, (b) iyonik polarizasyon, (c) yönlenme polarizasyonu ve (d) serbest yükü polarizasyonu.



### 2.3 Mikrodalga Isıtma

Elektromanyetik spektrum Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Gölcü ve Şen 2014). Mikrodalgalar kızıl ötesi ile radyo frekansları arasındaki bölgede 1 mm'den 1 m dalga boyuna kadar ve 300 MHz-300 GHz frekans aralığında bulunmaktadır (Pozar 2005). Bu geniş bant, yayın, iletişim, radar, bilgisayar, mikrodalga ısıtma vb. gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Endüstriyel, bilimsel ve medikal amaçlar için iletişim dışındaki frekans aralıklarını belirleyen endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) bantlar standartı vardır. Ayrıca, endüstriyel mikrodalga ısıtma için frekans seçimi maliyet, güç kullanılabilirliği ve ihtiyaç açısından sınırlıdır. ISM tarafından belirlenen frekans aralıkları şunlardır; 915±25, 2450±50, 5800±75 ve 24225±125 MHz (Metaxas ve Meredith 1983). Genel olarak ev tipi mikrodalga fırınlarda 2.45 GHz frekansı, endüstriyel alanlarda 2,45 GHz ya da 915 MHz frekansları (İngiltere'de 896 MHz) ve son iki frekans değeri ise sadece laboratuvarında ve araştırma projelerinde kullanılmaktadır ( Dibben 2001).



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum (Gölcü ve Şen 2014)

Mikrodalgaların malzeme ile etkileşimi malzemenin türüne bağlı olarak üç şekilde gerçekleşir. Bunlar iletim, soğurma ve geçirimdir. Eğer malzeme iletken (metaller, grafit gibi) ise mikrodalgalar yüzeyden geri yansır ve malzeme ısınmaz. Yüksek yalıtkan özellik gösteren malzemeler kullanıldığında, mikrodalgalar malzeme içerisinden soğurulmadan geçer ve malzeme yine ısınmaz. Elektromanyetik alana maruz kaldıklarında mikrodalgayı soğuran malzemeler (su, şeker, yağ gibi) ise çok ısınır. Mikrodalgayı soğuran malzeme içeren çözeltiler de soğurma derecesine bağlı olarak ısınır. Malzemelerin kimyasal veya fiziksel bağları da mikrodalga soğurma derecelerini değiştirir. Çizelge 2.2’de malzemelerin mikrodalga ile etkileşimi gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Malzeme ile mikrodalganın etkileşimi

Malzeme tipi	Mikrodalgaya cevabı	Isınma özelliği
Yalıtkan	Değişiklik yok	Isınma yok
İletken	Yansıma var	Isınma yok
Dielektrik	Emilim var	Malzeme ısınır

Dielektrik özellikleri, malzemenin elektriksel enerjii emmesi ve depolayabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), mikrodalgaların malzemeye nüfuzunu karakterize eder ve kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ) ise malzemenin enerjii depolayabilme yeteneğini belirtir. Kayıp tanjantı,  $\tan\delta$ , malzemenin emilen enerjii ısıya dönüştürme yeteneğinin bir göstergesidir. Optimum ısıtma işlemini sağlamak için, yeterli penetrasyona ve yüksek kayıplara (maksimum ve  $\tan\delta$ ) izin veren dengeli bir kombinasyon gereklidir.

Malzemelerin dışarıdan uygulanan elektromanyetik alanlara tepki gecikmesi genellikle alanın frekansına bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, dielektrik özellikler genellikle frekansın karmaşık bir fonksiyonu olarak ele alınır. Malzemenin dielektrik özellikleri  $\epsilon_r = \epsilon_r(\omega)$ ,

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad 2.12$$

İletken malzeme için,  $\epsilon_r$  'nin kompleks kısmına  $\sigma_e$  olarak aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\left(\epsilon'' + \frac{\sigma_e}{\omega}\right) \quad 2.13$$

Bu çalışmada ortam manyetik malzeme içermediğinden ileriki kısımlarda kullanılan formülasyonlarda  $\mu_r = 1$  olarak kabul edilmiştir. Efektif iletkenlik ise,

$$\sigma_e = \sigma + \omega\epsilon_0\epsilon'' \quad 2.14$$

Olarak tanımlanmaktadır.  $\sigma$  elektriksel iletkenliği temsil ederken  $\omega\epsilon_0\epsilon''$  terimi dielektrik kayıp mekanizmasının iletkenliğe yaptığı dipolar katkıyı ifade eder.  $\epsilon''$  dielektrik kayıp faktörü ve  $\omega$  açısal frekanstır. Efektif iletkenlik katsayısının ifadesinden fark edildiği gibi dielektrik malzemede iki farklı kayıp mekanizması mevcuttur. Pratikte bu iki mekanizmayı birbirinden ayırmak kolay değildir ve ölçülen genellikle efektif iletkenlik katsayısıdır.(Metaxas ve Meredith 1983)

Çizelge 2.1'de bazı endüstriyel malzemelerin dielektrik özellikleri gösterilmiştir. Herhangi bir malzemedeki suyun varlığı, kayıp faktörünü arttırmakta ve böylece mikrodalga enerjisi ile işlemek için daha iyi bir aday haline getirildiğini göstermektedir. Ayrıca malzemelerin dielektrik özellikleri frekans ile değişmektedir. (Mataxas ve Meredith 1983)

$\tan\delta$  (kayıp tanjantı), elektrik alanının maddeye ne kadar nüfuz edebileceğini ve elektrik enerjisinin ne kadarının ısı enerjisiye dönüşeceğini gösterilmesini sağlayan bir parametredir. Kayıp tanjantı aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad 2.15$$

Malzemelerin dielektrik özellikleri, ısıtılma veya kurutulma amacıyla mikrodalga ışımaya maruz bırakılacak malzemelerin göstereceği davranış belirler. Mikrodalga ısıtma işleminde dielektrik malzemede dağılan güç miktarının bilinmesi önemlidir.

**Çizelge 2.2.** Bazı yaygın endüstriyel malzemelerin özellikleri (Mataxas ve Meredith 1983)

	T (°C)	% Moisture dry basis	10 <sup>7</sup> Hz		10 <sup>9</sup> Hz		3 x 10 <sup>9</sup> Hz	
			ε'	ε''	ε'	ε''	ε'	ε''
Food Beef steak, bottom round	25	-	50	1300	50	39	40	12
frozen lean	0	-	-	-	4.4	0.72	3.95	0.3
Bacon fat, Conventionally rendered	25	-	-	-	2.6	0.16	2.5	0.13
Potato raw	25	-	80	47.8	65.1	19.6	53.7	15.7
Turkey cooked 1070 kg/m <sup>3</sup>	25	-	-	-	46.0	68.0*	40.0	14.0 <sup>++</sup>
Butter	0	16.5**	-	-	-	-	4.05	0.39 <sup>++</sup>
Butter	35	-	-	-	-	-	4.15	0.44 <sup>++</sup>
Forest products Douglas fir	20	0	-	-	2.05	0.04	2.0	0.02
Paper,royal grey	82	0	-	-	3.0	0.216*	2.94	0.235
white wove 78 g/m <sup>2</sup> E   to web	22	7.0	3.1	0.25 <sup>+</sup>	-	-	3.2	0.5 <sup>++</sup>
Board, box 230 g/m <sup>2</sup> E  toweb	22	5.0	2.8	0.3 <sup>+</sup>	-	-	2.7	0.3 <sup>++</sup>
Glass Fused silica	25	-	3.78	<10 <sup>-4</sup>	378	0.0002*	3.78	0.0002
96% SiO <sub>2</sub>	25	-	3.85	0.0023*	3.85	0.0023*	3.84	0.0026
Minerals and ceramics Ruby mica,	25	-	5.4	0.0016	-	-	5.4	0.0016
Muscovite	25	-	9.0	0.33	-	-	9.0	0.22
Marble, dry	25	-	2.55	0.04	2.55	0.26*	2.55	0.016
Sandy soil, dry Porcelain (aluminium oxide)	25	-	8.95	0.0018	8.93	0.008	8.90	0.01
Barium titanate	25	-	1140. 0	8.55	1100. 0	55.0*	600.0	180.0

**Çizelge 2.1.** devamı

Oils and waxes Cable oil	25	-	2.17	0.009	2.17	0.009*	2.16	0.0043
Aviation gasoline (100 octane)	25	-	-	-	1.94	0.00016 *	1.92	0.0027
Wax (Mitchell Rand)	25	-	2.36	0.0006	2.31	0.00083	2.31	0.0011
Plastics Araldite	-	-	-	-	-	-	3.14	0.076
Laminated fibreglass (69% fibreglass, 31% bakelite)	24	-	5.0	0.17	4.54	0.108*	4.4	0.128
Melamine formaldehyde, moulding comps	25	-	5.53	0.23	4.37	0.228	4.2	0.219
Cellulose acetate	-	-	3.3	0.07	3.28	0.072*	3.24	0.094
Polyamide, Dupont Nylon FM10001	25	-	3.24	0.07	3.06	0.043	3.02	0.036
Polyethylene	23	-	-	-	2.26	0.0024*	2.25	0.0026
Polythene	24	-	2.21	0.0004	-	-	2.25	0.0007
Polythene	24	-	2.21	0.0004	-	-	2.25	0.0007
Plexiglass, perspex	27	-	2.71	0.027	2.66	0.017*	2.6	0.015
Polyester formica, field to laminate	25	-	4.08	0.23	3.53	0.138	3.41	0.106
Polytetra								
Polyester resin, mylar	20	-	2.4	0.0384	2.2	0.0088	-	-
Rubber								
Cyclized, pliobond	24	-	-	-	-	-	3.76	0.28
Nitrile, natural	25	-	-	-	2.85	0.069	2.8	0.05
Silicon,								
SBR, uncured	40	-	-	-	-	-	8.7	0.09
Cured	120	-	-	-	-	-	8.4	0.3
Water								

Çizelge 2.1. devamı

Distilled	25	-	-	-	77.5	1.2*	76.7	12.00
Distilled	95	-	-	-	52.0	0.364*	52.0	2.44
+ 0.5 molal NaCl	25	-	-	-	69.0	269.0	7.0	41.87
Cotton 210kg/m <sup>3</sup>	-	7	1.5	0.03+	-	-	-	-
Wool 68 kg/m <sup>3</sup>	-	20	1.2	0.01+	-	-	-	-
Wool fibre	-	7	-	-	-	-	3.9	0.29
Milk powder 800 kg/m <sup>3</sup>	30	3.3**	-	-	-	-	2.29	0.048++
Whey powder 780 kg/m <sup>3</sup>	30	4.8**	-	-	-	-	2.04	0.025++
Leaves Rapeseed, frost resistant	23	-	400.0	900.0	40.0	20	40.0	11.0

\*  $3 \times 10^8$

+  $2.712 \times 10^7$

++  $2.45 \times 10^9$

\*\* Islak temel

Dağılan güç miktarı, elektrik alan gerilimine (güç yoğunluğuna), frekansa ve malzemenin dielektrik özelliklerine bağlıdır. (Toraman ve Depçi 2007)

Bir malzemede dağılan güç miktarı (kayıp gücü) aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Metaxas 1991):

$$P_d = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad 2.16$$

burada  $P_d$ , malzemede dağılan gücü ve  $\vec{E}$  rms elektrik alan şiddetini temsil etmektedir.

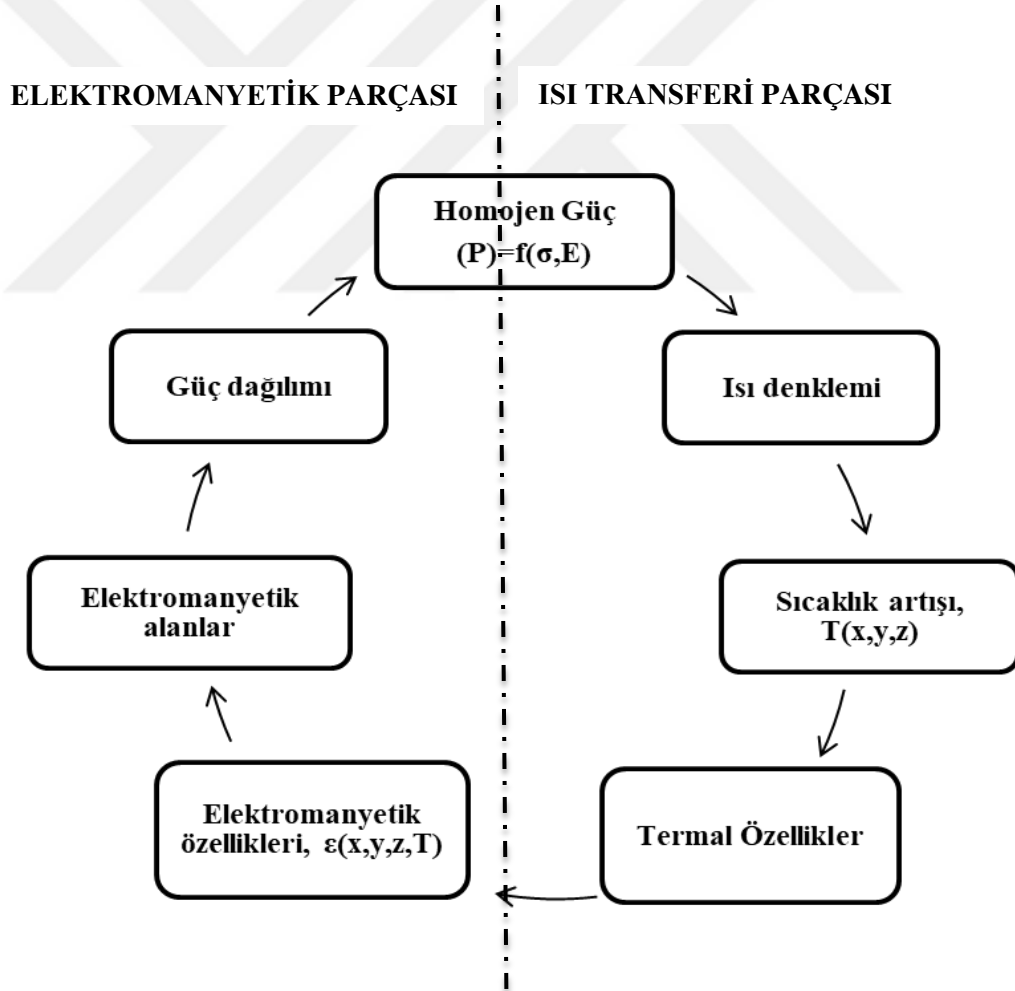
Penetrasyon derinliği  $dp$ , malzeme yüzeyine bir elektrik aln uygulandığında gücün %37'ye yani  $(1/e)$ 'sine düştüğü uzaklık olarak tanımlanır. Mikrodalga ışımanın malzemeye nüfuz etme derinliği, numunenin dielektrik özelliklerinin bir fonksiyonudur. Dielektrik kayıp faktörü çok düşükse, penetrasyon derinliği çok büyük olacaktır. Penetrasyon derinliğine ( $dp$ ) denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$dp = \frac{1}{2\alpha} \quad 2.17$$

burada  $\alpha$  zayıflama faktörüdür. Açılımı ise aşağıda verilmiştir.

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \left( \sqrt{1 + \frac{\epsilon''}{\epsilon'} - 1} \right)} \quad 2.18$$

Zayıflama sabiti,  $\alpha$ , kayıplı dielektrik malzemeye nüfuz ederken azalan alan genliğinin ölçüsüdür. Genellikle pratik sistemlerde dB/m cinsinden zayıflamayı ifade etmek gerekir. Bu durumda Denklem 2.19'un sonuçlarının dB/m'de zayıflama sabitini elde etmek için 8.686 faktörü ile çarpılması gerekir. (Mehrdad, 2009)



Şekil 2.5. Elektromanyetik-ısı transfer modeli

Uygulanan mikrodalga enerjisi, belirli bir bölgedeki elektrik alan dağılımına dayanarak güce dönüştürülür. Absorbe edilen güç terimi, geçici sıcaklık profilini hesaplamak için ısı transferi denklemlerinde bir kaynak terimi olarak kabul edilir. Yani mikrodalga kayıp gücü, malzeme üzerinde oluşan ısı enerjisinin kaynağıdır. Dolayısıyla malzeme üzerinde oluşan ısı dağılımı, (Metaxas 1991):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + P_d \quad 2.19$$

şeklinde tanımlanan ısı transfer denklemi ile belirlenir. Burada  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $T$  ve  $k$ , sırasıyla, malzemenin yoğunluğu, ısı kapasitesi ( $J/kg.^{\circ}C$ ), sıcaklık ( $^{\circ}C$ ) ve termal iletkenliği ( $W/m.^{\circ}C$ ) temsil etmektedir.

Herhangi bir mikrodalga ısıtma sisteminin analizi, elektromanyetik alan denklemleri ile belirlenen ısı transfer denklemlerini de gerektirmektedir. Şekil 2.5 sıcaklık ve elektrik alan dağılımı arasındaki etkileşimli ilişkiyi göstermektedir. Isı kaynağı mikrodalga gücü tarafından sağlanır. Ayrıca, ısıtma işlemi sırasındaki sıcaklık değişimi malzemenin dielektrik özelliklerinin değişmesine ve dolayısıyla elektromanyetik alanların değişmesine neden olur. Sonuç olarak bu olay zincirleme bir reaksiyona neden olur.

## 2.4 Mikrodalga Fırın

Mikrodalga fırınlar, bir malzemeyi kontrollü bir ortamda mikrodalga alanına maruz bırakarak ısıtacak şekilde tasarlanmış cihazlardır. Mikrodalğanın materyal ile teması sonucu değişik şekilde etkileşimler oluşmaktadır. Elektromanyetik dalgalar metallere yansırken, dielektrik ortamda absorbe edilmekte ve yalıtılan ortamda örn. cam, kağıt, plastik ve tahtadan hiçbir değişikliğe uğramadan geçebilmektedir.

Saniyede 2,45 milyar kez titreşen mikrodalgalar malzemenin içine girdiklerinde, su moleküllerinde bir titreşim oluştururlar. Su molekülleri bir ileri bir geri saniyede 4,9 milyar kez titreşirler. Bu yüksek hızdaki titreşmeden dolayı birbirine sürtünen su molekülleri ısı enerjisini açığa çıkarırlar. Bu ısı sayesinde malzeme ısıtılmış olur. İçinde daha fazla su



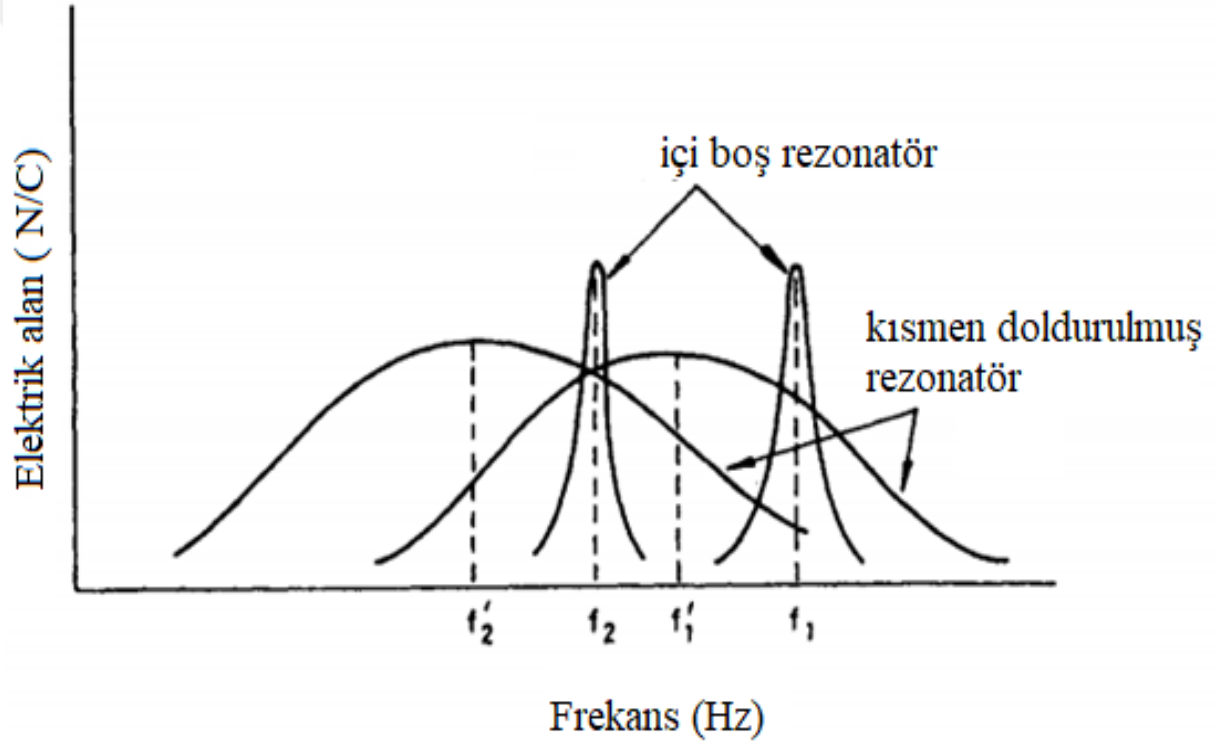
molekölü olan malzemeler daha hızlı ısınırlar. Mikrodalga ile ısıtma, geleneksel ısıtma yöntemlerinden hem daha hızlıdır hem de ısıtma sürecinde yalnızca malzeme ısınır, fırın ve ortam ısınmaz. Dolayısıyla su, mikrodalga enerjisinin ısıtılacak malzemeler tarafından absorbe edilmesinde önemli bir etkidir. Isıtılacak malzeme içerisinde bulunan su moleküllerinin fazla olması, polarize olacak içerik miktarının artması anlamına gelmekte; diğer bir ifade ile o ısıtılacak malzemenin dielektrik kayıp faktörünün büyümesi olarak sonuçlanmaktadır. Böylece malzeme daha iyi ısınacaktır. (Ekin 2013)

Mikrodalga ısıtma sistemi genel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar güç ünitesi, rezonatör ve kontrol ünitesidir. İlk bölüm, mikrodalgaların gereken frekans bandında üretildiği kaynak ve elektromanyetik enerjinin rezonatöre aktarıldığı dalga kılavuzu ile gerçekleştirilir. İkinci bölüm, malzemenin yoğun mikrodalga alanlarına maruz kalacağı ve endüstriyel duruma göre buhar veya sıcak hava enjeksiyonu altında çalıştırılması için pompalar gibi ek yardımcı işlem ekipmanının bağlanması gereken rezonatörden oluşur. Son olarak, üçüncü bölüm ise mikrodalga ısıtıcının genel performansını optimize etmek ve düzenlemek için kullanılan kontrol devresidir. Uygulamaya bağlı olarak, parti tipi, konveyör tipi, dalga kılavuzu tipi, vb. gibi çeşitli rezonatör türleri vardır. Magnetron tüpleri öncelikle mikrodalga gücünü üretmek için kullanılır. Magnetron kaynağı ve rezonatör arasında bir ferrit izo-sirkülatör korumasını dahil etmek çok faydalı bir uygulamadır. (Metaxas 1991).

Mikrodalga fırınlarını tek modlu ve çok modlu olarak ayırabiliriz. Tek modlu mikrodalga fırınları, küçük bir hacim içerisinde bir veya birkaç rezonans modunun uyarılmasıyla oluşturulan fırınlardır. Bu tipin en yaygın uygulayıcıları,  $TM_{010}$  moduna sahip silindirik rezonatör veya  $TE_{10n}$  rezonans modlu dikdörtgen rezonatörlerdir. Bu uygulayıcılar iyi tanımlanmış bir alan dağılımına sahiptir ve analitik teknikleri kullanarak analiz etmek ve tasarlamak kolaydır. Bununla birlikte, endüstriyel işlem için kullanımı son derece sınırlıdır.

Çok modlu mikrodalga fırınlar ise kaynağın ürettiği frekans bandında çok sayıda rezonans modunu destekleyen fırınlardır. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi içi boş çok modlu rezonatör için bu modların her biri, belirli bir frekansta keskin bir rezonans yanıtı ile karakterize

edilir. Mikrodalga enerjisini fırın uygulayıcısına besleyen magnetron kaynağının çalışma frekansına yakın olması için bu modların mümkün olduğunca ayarlanması önemlidir. Bununla birlikte, böyle bir fırın kısmen emici bir yük ile doldurulduğunda, her modun Q faktörü boş olduğu duruma göre daha da azalır. Bu yükleme etkisi Şekil 2.6'de gösterilmektedir ve burada mod sönümlenmesinin daha düşük Q faktörlerine neden olması dışında, frekans kaymasının da meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 2.6. Dielektrik malzeme ile yüklü çok modlu rezonatörün elektrik alanının frekansla değişimi (Metaxas ve Meredith 1983)

## 2.5 Mikrodalga Fırının Performansını Etkileyen Faktörler

Mikrodalga ısıtma ile yapılan malzeme ısıtma işlemlerinde ısıtma performansını etkileyen en önemli faktörler:

### 2.5.1 Frekans

frekans, bir malzemeye nüfuz etme derinliğini büyük ölçüde etkilenmektedir. Mikrodalga ısıtma sistemlerinde kullanılan frekans uluslararası telekomünikasyon birliği tarafından (ITU) belirlenen endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamaları (ISM) için olan bantlardır. Ev ve endüstri uygulamalarında 915 MHz ve 2450 MHz frekansları kullanılmıştır. Benzer dielektrik özelliklere sahip olan malzemelerde, 915 MHz'lik mikrodalgalar 2450 MHz'lik dalgalardan 2.5 kat daha büyük bir penetrasyon derinliğine ulaşmaktadır. Penetrasyon derinliği frekans ile ters orantılı olarak değişmektedir. Malzemenin dengeli bir şekilde ısıtılabilmesi için, büyüklüğüne göre frekans seçimi oldukça önemlidir. Ayrıca frekansa göre dielektrik kayıp faktörü de değiştiği için frekans malzemenin ısınma performansı doğrudan etkilediği söylenebilir.

### 2.5.2 Dielektrik özellikler

Isınma performansını etkileyen önemli faktörlerden biri de malzemenin dielektrik özellikleridir. Bir malzemenin mikrodalga ile nasıl etkileşime girdiğini, yani elektromanyetik enerjiyi emme, iletme ve yansıtma kabiliyetini açıklayan dielektrik özelliğidir. Bir malzemenin dielektrik sabiti, enerjiyi depolayabilme yeteneğini göstermektedir. Kayıp tanjantı,  $\tan\delta$ , ise malzemedeki depolanan enerjinin ısıya dönüştürme yeteneğinin bir göstergesidir. Kayıp faktörü yüksek olan malzemeler mikrodalga etkisiyle daha çabuk ısınmaktadır.

### **2.5.3 Malzemenin Fırın İçerisindeki konumu**

Isıtılacak malzemenin fırının içerisinde konulduğu yer mikrodalga ısıtmayı büyük şekilde etkilemektedir. Yüksek mikrodalga performans elde edebilmek için ısıtılacak malzeme fırının içinde en uygun yere konulması gerekmektedir. Isıtılacak malzemenin rezonatördeki yeri değiştirildiğinde elektrik alan dağılımı da değişecektir. Elektrik alan değişimi sistem verimliliğinin ve performansının değişmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada yapılan tasarım optimizasyonlarından biri de malzeme yerinin seçimi üzerinedir.

### **2.5.4 Mikrodalga Fırın Geometrisi ve Boyutu**

Malzeme geometrisine ve boyutlarına göre mikrodalga fırının geometrisi ve boyutunun ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde fırının içinde düzgün olmayan ısı transfer gerçekleşebilir. Birçok uygulamada, rezonatör boyutu, büyük ölçüde ürün boyutu ve mevcut fabrika konveyörü veya endüstri üretim formatlarıyla uyumlu olması istenir. Yüksüz koşullar altında yapılan çalışmalarla, ürün boyutu ve oran duyarlılığı sorunları ve mikrodalga güç kullanma kapasitesi dikkate alınarak fırının minimum boyutu belirlenir.

### **2.5.5 Malzemenin Fiziksel Geometrisi**

Mikrodalga fırınlarda ısıtılan malzemelerin büyüklüğü ve şekli mikrodalga performansına büyük bir şekilde etkilemektedir. Isıtılacak malzemenin büyüklüğü dalga boyuna göre fazla ise ısıtma üniform olmayacaktır. Boyutun penetrasyon derinliğine daha yakın olduğu diğer durumlarda ısıtma üniform olacaktır. Isıtma, düzenli şekilli yapılarda daha homojen olmaktadır. Keskin kenarların ve köşelerin olması durumunda aşırı ısınmaya neden olur, dolayısıyla mikrodalga ısıtmada en iyi geometri küredir.

### **2.5.6 Nem Miktarı**

Mikrodalga ısıtma işleminde malzemenin ne kadar mikrodalga enerjisi absorbe edeceğini belirleyen faktörlerden biri materyalin nem miktarıdır. Genellikle, mevcut nem miktarı ne kadar fazla olursa, dielektrik kayıp faktörü o kadar yüksek olması ve dolayısıyla ısıtma veriminin daha yüksek olması beklenmektedir.

### **2.5.7 Mikrodalga Gücü**

Mikrodalga giriş gücünün artması veya azalması, ilk olarak ısıtılacak malzeme içinde üretilebilecek ısı seviyesini belirler. Mikrodalga ısıtma için gerekli güç genellikle önerilen işlemin ilk değerlendirmesine göre hesaplanır ve fırın yapısı, düzeni ve boyutu oluşturulduktan sonra gerçek testler yoluyla doğrulanmaktadır. Doğrulanacak ana parametreler arasında ısıtma oranı hassasiyeti, sıcaklık bütünlüğü ve işlem verimi bulunmaktadır.

### **2.5.8 Kaynağın Konumu**

Mikrodalga fırınlarda, kaynağın ürettiği enerji dalga kılavuzları vasıtasıyla rezonatöre taşınır. Elektriksel ve manyetik olarak rezonans modlarını uyarabilmesi, dalga kılavuzunun sağladığı en önemli avantajlardan biridir. Mikrodalga ısıtma performansını etkileyen faktörlerden biri de dalga kılavuzunun rezonatörde konulacağı yerin belirlenmesidir. Birden fazla dalga kılavuzu ile kurutma yada ısıtma yapabilmek için düşük kublaj verecek şekilde mikrodalga fırının üzerinde dalga kılavuzlarının konulması gerekmektedir. Aksi takdirde mikrodalga ısıtmanın performansı oldukça düşük olacaktır.

### 2.5.9 Sıcaklık

Dielektrik kaybı malzemeye bağlı olarak sıcaklıkla artabilir veya azalabilir. Sıcaklık ve nem seviyesi ısınma işlemi boyunca değiştii için, bu büyüklükler dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla bu parametreler arasında hangi fonksiyonel ilişkilerin bulunduğunu bilmek önemlidir. Örneğin buz ve suyun çok farklı dielektrik özellikleri nedeniyle donma, bir malzemenin ısınma kabiliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Su son derece emicidir ve iyi ısıtır, buz ise oldukça saydamdır ve hiç ısınmaz.

### 2.5.10 Yoğunluk

Havanın dielektrik sabiti birdir ve endüstride ısıtma için kullanılan frekanslarda tamamen geçirgendir. Bu yüzden malzemenin yapısında bulunan hava miktarı arttıkça, o malzemenin dielektrik sabiti düşmektedir. Bununla birlikte; materyalin yoğunluğu arttıkça, dielektrik sabiti de genellikle doğrusal olarak artmaktadır.

## 2.6 Mikrodalga Fırınlarmın Avantaj ve Dezavantajları

Malzemelerin ısıtılmasında mikrodalga enerjisi kullanımının avantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir: (Eren, 2005)

- Hızlıdır ve işlem süresi kısadır.
- Az yer kaplar, kullanımı ve bakımı kolaydır.
- Kimyasal maddeleri direkt olarak ısıtır.
- Mikrodalga ısıtma temizdir.
- Enerji verimii yüksektir.
- Isıma homojendir.
- Hacimsel ve seçici ısıtma sağlarlar.

- Mikrodalga ısıtma, istenen sonuca ulaşılabilmesi için diğer ısı transfer yöntemleriyle belirlenerek uygulanabilir.

Mikrodalga ısıtmanın, yukarıda sıraladığımız avantajlarının yanında bir takım dezavantajları da vardır. Bunlar:

- Magnetronlar geleneksel ısıtma elemanlarına göre pahalıdır.
- İnsan sağlığı açısından radyasyon sızıntısının önlenmesi gerektiğinden tamamen kapalı bir sistem olması zorunludur,
- Mikrodalga fırınlar, geleneksel fırınlara göre farklı emniyet tedbirleri gerektirir,
- Metal gibi düz yüzeylerden yansır.
- Teknolojileri daha karmaşıktır, bu da eğitimsiz insanların kullanımı için tehlike oluşturur.
- Ürün karakteristikleri, şekil ve boyuta bağlı olarak düzensiz ısınma meydana gelebilir. Keskin köşe ve kıyılarda aşırı ısıtma ortaya çıkar ve geniş parçalı malzemelerin merkezinde ısıtma tam gerçekleşmeyebilir.

## 2.7 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde, endüstriyel uygulamalarda mikrodalga fırınların kullanımı büyük ölçüde artmaktadır. Bir malzemenin mikrodalga ile ısıtılması uygulanan elektrik alan şiddetine bağlı olarak iyonik bileşenlerin hareketi yada moleküllerin polarizasyon-depolarizasyon mekanizması ile gerçekleşmektedir. Mikrodalgalar, dipol parçaların dönmesine ve iyonik parçaların polarizasyonu ile moleküllerin harekete geçmesine sebep olmaktadır.(Anonim 1994) Hharekete geçen moleküller, mikrodalga frekanslarında uygulanan elektrik alanın genliğinin değiştirilmesiyle önce polarize daha sonra depolarize olmaya çalışırlar. Bu aşamada birbirine sürtünen moleküller de ısı enerjisini açığa çıkarırlar. Dolayısıyla malzemenin mikrodalga ile ısıtma işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır.(Konak ve ark. 2009)

Endüstriyel alanlarda mikrodalga ısıtmanın geleneksel ısıtma yöntemlerine göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Endüstriyel bir işleme için mikrodalga kullanmanın başlıca

avantajları şunlardır: hızlı ısı nüfuzu, malzemenin hacimsel ısınması, seçici ısıtma, yüksek ısıtma oranları, işlem süresinin azaltılması, yüksek ürün kalitesi, geleneksel yöntemlerle kombinasyon, enerji tüketiminde tasarruf, çevre temizliği, az yer kaplaması, kullanımı ve bakımı kolay olmasıdır. (Anonim 1993)

Mikrodalga fırınlar; gıda işleme (ısıtma, çözme, kalite kontrol, temperleme, kurutma, dondurarak kurutma, pastörizasyon, sterilizasyon), endüstriyel ürünlerin kurutulması (kağıt, odun, tekstil, mobilya, çamur), kimyasal süreçler (polimerizasyon, kimyasal plastik malzemenin sertleştirilmesi, kauçuk vulkanizasyonu, seramik kurutma ve sinterleme, tekstilde boyanmış ipliklerin kurutulması, kâğıt ve atık çamur kurutma işlemleri, plazma işlemleri), endüstriyel metalurji işlemleri, biyolojik ( TIP) alanlarda (pastörizasyon ve sterilizasyon, dezenfekte işlemi, enzimlerin, küflenmelerin yok edilmesi), endüstriyel malzemelerin eritilmesi, mineral prosesleri (kaya parçalama, ufalama) alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Meredith 1998, Konak ve ark. 2009 )

Bununla birlikte, hala mikrodalga ısıtmanın büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarını sınırlayan sakıncalar bulunmaktadır. Mikrodalga ısıtma ile malzeme işlem sürecinde en önemli bir zorluk düşük güç verimliliğidir. Çok modlu mikrodalga rezonatörde, düşük güç verimliliği yüksek yansıma katsayısının sonucudur. Çok modlu mikrodalga rezonatörü içindeki elektrik alan dağılımı, rezonatörün şekli ve boyutu, çalışma frekansı, işlenecek malzemenin şekli, boyutu ve dielektrik özellikleri, işlenecek malzemenin rezonatör içindeki konumu, besleme kılavuzunun rezonatör üzerindeki konumu gibi faktörlere bağlıdır. (Vadivambal ve ark. 2010)

Mikrodalga ısıtma işleminde istenen hedeflerden biri, ısıtılacak malzeme üzerindeki ve rezonatördeki elektrik alan dağılımının düzgün olmasıdır çünkü elde edilecek malzemenin kalitesi bununla bağlıdır. Mikrodalga fırınların tasarımı ve optimizasyonu için rezonatörün 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.



Verimin artırılması ve elektrik alan dağılımının homojen hale getirilmesi için birçok deneysel ve simülasyon çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda geleneksel olarak, malzemenin rezonatör içerisinde hareket ettirerek veya döndürerek, modlu karıştırıcılar kullanılarak, çoklu besleme sistemleri kullanarak veya bu tekniklerden oluşan bir kombinasyonun uygulanmasıyla üniform elektrik alan dağılımı elde etmeye çalışılmıştır. ( Mehrdad 2009, Datta ve ark. 2001).

Hong ve ark. (2017) mikrodalga fırınlarında sıcaklık dağılımının homojenliğini artırmak için çok malzemeli bir döner tabla yapısı önermişlerdir. Döner tabaklar ile mikrodalga fırında ısıtma işlemi için birleştirilmiş model sunmuşlar ve döner tabla bileşenlerinin ısıtma düzgünlüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Simüle edilen modelin doğruluğunu göstermek için denemeler de yapmışlar. Bu çalışmada, işlenen malzemelerin ısıtma düzgünlüğünü etkin bir şekilde geliştirmek için yeni ve basit bir çok malzemeli döner tabla yapısını ilk kez önermişlerdir.

Hernandez ve ark. (2005) bir mikrodalga fırınına yerleştirilmiş düşük, orta ve yüksek kayıplı dielektrik malzemeler için farklı modlu karıştırıcıların konfigürasyonlarının performansını karşılaştırmışlardır. Simüle edilmiş sonuçlardan, elektrik alan dağılımı üzerine hem materyalin dielektrik sabiti hem de karıştırıcı konfigürasyonun güçlü bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Pedreno ve ark. (2005) yapay sinir ağları kullanarak çok modlu mikrodalga rezonatöründeki elektrik alan dağılımını elde etmişlerdir. Ayrıca elektrik alan dağılımının ısıtılacak materyalin dielektrik özelliklerine bağlı olduğunu da göstermişlerdir.

Narumitbowonkul ve ark. (2015) mikrodalga ısıtma işlemi sırasında mikrodalga enerjisini kullanan, doğal lastik eldivenin (NRG) sıcaklık dağılımı ve elektrik alan değerlerini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. NRG'nin sıcaklık dağılımı ve elektrik alanı üzerindeki konum, ısıtma süresi ve dönüş açısının etkileri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Çalışmalarında 2,45 GHz frekansında çalışan bir mikrodalga fırın içerisinde NRG'deki sıcaklık ve elektrik alan dağılımını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir.

Lin ve ark. (2016), çalışmalarında, sonlu elemanlar yöntemine dayanan COMSOL Multiphysics yazılımı ile kömür örneğinin ısınma davranışlarını simüle etmişlerdir. Mikrodalga frekansı, mikrodalga gücü ve numune pozisyonunun sıcaklık profilleri ve elektrik alan dağılımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kömür numunesinin sıcaklık ve ısınma davranışının frekans, güç ve numune pozisyonundan etkilendiğini tespit etmişlerdir.

Prado ve ark. (2004), Perez ve ark. (2005), Molina ve ark. (2007a &b) yapmış oldukları çalışmalarda dalga kılavuzundaki yansıyan gücü azaltmak için malzemenin konulması gereken yeri farklı yöntemler kullanarak bulmuşlardır. Yansıyan gücün az olması hem magnetronun ömrünü hem de sistem verimini arttırmaktadır. Dolayısıyla, ısıtılacak malzemenin rezonatöre konulduğu yerin bilinmesi çok önemlidir. Dalga kılavuzunda minimum enerji yansıması sağlayan yükün uygun yerini bulmak için farklı optimizasyon yöntemleri uygulamışlardır.

Gonzalez ve ark. (2004), Cabrera ve ark. (2004), Elsa ve ark. (2005) ise istenmeyen yansımaların ortaya çıkmasını önlemek ve çok modlu mikrodalga ısıtma fırınlarında daha yüksek verim elde etmek için ısıtılacak malzemenin etrafında çok katmanlı dielektrik materyalin farklı metot ve yöntem kullanarak tasarımını yapmışlardır. Ek dielektrik katman kullanılması rezonatörün içindeki yansıma katsayısının azaltılması ve ısıtılan malzemedeki yüksek güç soğurma oranı sağlanması için yapılmıştır. Farklı yöntemler kullanarak ısıtılacak malzemenin üzerinde yerleştirecek iki dielektrik katmanın değerlerini bulmuşlardır. Ek katmanlar kullanarak yansıma katsayısının azaldığını ve rezonatör içindeki verimin artırabileceğini göstermişlerdir.

Pitarch ve ark. (2003), Balbastre ve ark. (2007) ise çok modlu mikrodalga rezonatördeki elektrik alan dağılımının üniform olmasında GA optimizasyonu kullanarak optimum dalga kılavuzu besleme konumlarını belirlemişlerdir.

Chaum ve ark. (2009) dikdörtgen dalga kılavuzundaki dielektrik materyelin mikrodalga enerjisi ile ısıtılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, mikrodalga güç seviyesinin, dielektrik malzeme türünün, malzemenin boyutunun ve kılavuzundaki

malzemenin konulduğu yerin etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta, malzemenin dalga kılavuzu içerisine farklı yerleştirilmesiyle, malzeme içinde sıcaklık ve emilen gücün etkilendiğini göstermişlerdir.

Klinbun ve ark. (2011) dikdörtgen dalga kılavuzu ( $TE_{10}$  modu) kullanılarak mikrodalga ısıtmanın sayısal ve deneysel analizini sunmuşlardır. Parçacık boyutunun, malzeme boyutunun, kılavuz içerisindeki malzeme yerleşiminin ve ısı transferi ve akış deseninin frekansla değişimleri incelenmiştir.

Idris (2016) çok modlu mikrodalga rezonatörleri kullanılarak malzemelerin boyutu, geometrisi ve özelliklerinin verim ve ısıtma düzgünlüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Tortajada ve ark. (2007) genetik algoritma kullanarak, ısıtılacak çamur materyalinde düzgün bir elektrik alan dağılımı elde etmek için örnek etrafında çok katmanlı bir dielektrik malzeme tasarlamışlardır. Fakat elde edilen değerleri pratik uygulamalarda kullanabilmek için çok hassas malzeme imalatı gerekmektedir.

Dharmendra S. R. ve Rahul C. (2014, 2016) iki dalga kılavuzu kullanarak farklı pozisyonlardan beslenen bir rezonatörün içerisindeki malzeme de oluşan elektrik alanın düzgün dağılımının sağlanabileceğini sunmuşlardır. Birden fazla kaynak kullanmak hem düzgün elektrik alan dağılımını hem de eğer magnetronlardan biri arızalanırsa ve dolayısıyla çalışma dışına çıkarsa işlemin devam etmesini sağlamaktadır. Mikrodalga rezonatöründeki istenen elektrik alan dağılımı sağlayacak girişteki dalga kılavuzu portlarının düzenlenmesini yapmışlardır. İki kaynakla beslenen çok modlu mikrodalga rezonatörü yüksek verim için tasarlamıştır.

Liao ve ark. (2016) faz kaydırmalı ısıtma stratejisi kullanmanın mikrodalga esaslı malzeme işlemede düzgün olmayan ısıtma probleminin çözümünde önemli bir rol oynayabildiğini göstermişlerdir. Mikrodalga ile işlenmiş malzemeler için, faz kaydırma yönteminin uyarlanması ile elde edilen düzgünlük değerinde % 25 - % 58'lik bir artış elde edilmiştir.

Wang ve ark. (2014) mikrodalga rezonatöründeki elektrik alan dağılımının düzgünleştirmek için mikrodalga rezonatör içine yerleştirilmiş iletken malzemelerin konum, boyut ve sayılarını değiştirerek etkisini incelemişlerdir. İletken bilyelerin yerleşimi, elektrik alan dağılımının düzgünlüğünü artırmış ve rezonatör içerisindeki elektrik alan iletken boncukların konumuna ve sayısına bağlı olarak değişim göstermiştir.

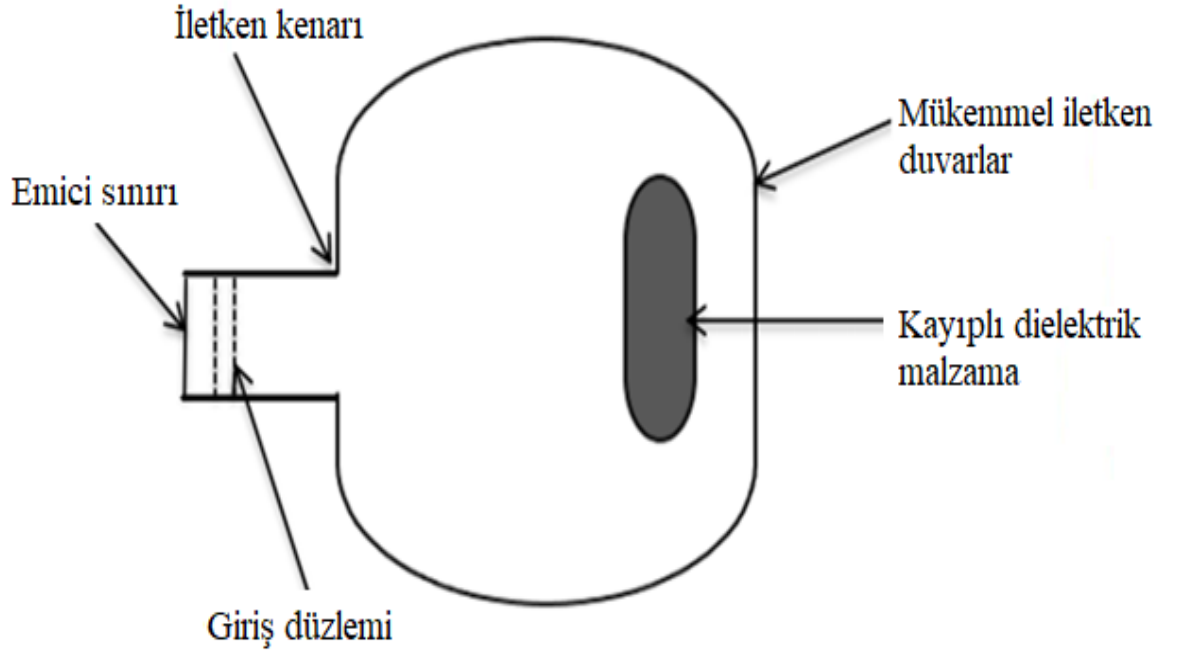
Tang ve ark. (2016) çokmodlu mikrodalga fırının içerisindeki elektrik alanının kararlılığı frekans, malzemenin dielektrik sabiti ve geometrisine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Yüksek kayıplı malzeme için, elektrik alanın nispeten kararlı olduğunu bununla birlikte, düşük kayıplı veya kayıpsız malzeme için, elektrik alanının genellikle kararsız olduğunu ifade etmişlerdir. İlgili parametrelerdeki küçük bir kayma, elektrik alanda dramatik değişimlerine yol açmaktadır. Dahası, elektrik alanın kararsızlığı, düşük kayıpla, yüksek frekansla veya daha büyük dielektrik sabiti ile arttığını ve tersinin de doğru olduğunu göstermişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

##### 3.1.1 Problemin Tanımlanması

Bu çalışma, endüstriyel amaçlı bir mikrodalga fırının tasarım ve optimizasyon adımları belirlenmesi ve analizinin yapılmasını konu almaktadır. Bundan dolayı şekil 3.1’de görüldüğü gibi, mikrodalga fırın kayıplı dielektrik malzeme ile yüklenmiştir.



Şekil 3.1. Mikrodalga fırının temel yapısı (Zhao 1996)

Mikrodalga fırın kayıplı dielektrik bir malzeme ile yüklenmiş ve dikdörtgen kesitli dalga kılavuzları ile uyarılan dikdörtgen metalik bir kutudur. Uyarma modu  $TE_{10}$ 'dır. Malzeme ise kayıplı dielektrik malzemedir.

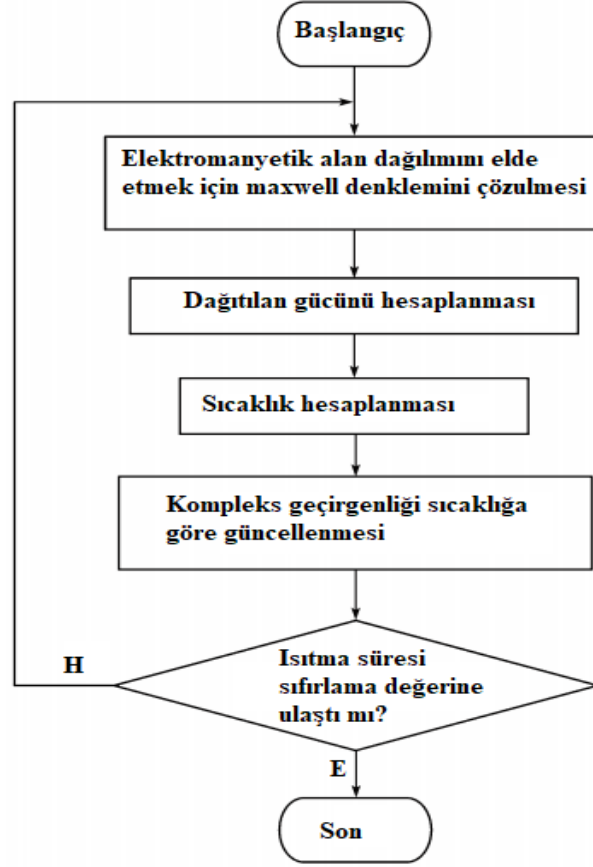
Mikrodalga rezonatördeki elektrik alan dağılımının hesaplanması tasarım optimizasyon işlemlerinde gereken parameterlerin bulunmasını sağlar. Daha önce bahsedildiği gibi, Maxwell denklemler ile mikrodalga rezonatördeki ve malzemenin üzerindeki elektromanyetik alan dağılımı hesaplanabilir. Ancak mikrodalga ısıtma sistemlerde Maxwell denklemlerinin analitik çözümü çok zordur. Bundan dolayı, bu çalışmada, mikrodalga rezonatördeki ve malzeme üstündeki elektromanyetik alan dağılımı hesaplanması ve sonuçların elde edilmesi için COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır.

### **3.1.2 Mikrodalga fırının sayısal modellemesi**

Mikrodalga ısıtma işlemini temsil etmek için kullanılan matematiksel model elektromanyetik alan denklemlerinden (yani Maxwell denklemi) ve ısı transfer denklemlerinden oluşmaktadır. Maxwell'in denklemleri, elektromanyetizmanın temel yasalarıdır ve bu nedenle mikrodalga rezonatördeki elektrik alanının analiz edilmesi için yaklaşımın temelini oluşturmaktadır. Fakat Maxwell denklemlerinden, yüklü bir mikrodalga rezonatörü içerisindeki elektrik alan (E) dağılımını hesaplamak analitik olarak zordur. Bu nedenle, mikrodalga rezonatör içindeki dinamik olarak değişen elektromanyetik alanların nümerik yöntemler kullanılarak çözülmesi gerekir. Şekil 3.2'de bir mikrodalga ısıtma probleminin çözümü için kullanılabilecek genel simülasyon prosedürü gösterilmektedir.

Mikrodalga ısıtma işleminde malzemenin içindeki güç dağılımını elde etmek için (Maxwell denklemlerini çözmek için) çeşitli sayısal teknikler mevcuttur. Sonlu Farklar Zaman Dömeni Yöntemi (FDTD), Sonlu Elemanlar Zaman Domeni (FETD), Momentler Yöntemi (MoM) ve Yonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) gibi etkili sayısal yöntemlerin ortaya çıkmasıyla, Maxwell denklemini çözmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, çok

modlu mikrodalga fırının modellenmesi için, FEM tabanlı elektromanyetik yazılım olan COMSOL Multiphysics v 5.2 kullanılmıştır.



**Şekil 3.2.** Mikrodalga ısıtma probleminin çözümü için genel simülasyon prosedürü (Zhao 2011)

Program yardımı ile benzetimin yapılabilmesi için, model ortamının oluşturulması, geometrik nesnelerin oluşturulması, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, sınır koşullarının tanımlanması, örgünün oluşturulması gerekmektedir. Uygun geometriyi oluşturmak için program içerisinde bulunan tek, iki veya üç boyutlu şekillerden yararlanılır. Bu şekiller, birbirleriyle toplanarak veya çıkartılarak daha karmaşık geometrilerin şekilleri oluşturur. Şekil tanımlandıktan sonra problemin yapısında bulunan malzemelerin elektromanyetik özellikleri ve yer aldığı problemin çözüm bölgesinde elektromanyetik alanın sınır koşulları yüklenir. Daha sonra kaynağın yeri, şekli, polaritesi, başlangıç sıcaklık gibi değişkenler

ifade edilir. Son olarak frekans ve zaman bilgisi eklenir. Şekil 3.3’de mikrodalga ısıtma işleminde kullanılan modellenmenin akışı diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Mikrodalga ısıtma modellemesinde kullanılan akış diyagramı



## 3.2 Yöntem

### 3.2.1 Rezonatör analizi

Çok modlu mikrodalga rezonatörü malzeme üzerinde homojen sıcaklık dağılımının elde edilmesi için homojen güç dağılımını sağlamak zorundadır. Etkin bir ısıtma, farklı elektriksel parametrelere sahip malzemeler ile etkileşime girebilecek maksimum sayıda rezonans modunun ortaya çıkmasıyla sağlanabilir. Bu nedenle mikrodalga rezonatörün analizi mikrodalga ısıtma sistemlerinin tasarımında oldukça önemlidir.

Çok modlu bir rezonatör birçok rezonans modunu sağlamaktadır ve burada rezonatör duvarlarından gelen yansımalar, sabit bir duran dalga paterni oluşturmak için birbirlerini güçlendirir.

İçi boş dikdörtgen kesitli bir rezonatör için rezonans modların tekabül edilen rezonans frekansı aşağıda eşitlik ile verilmektedir (David 2006).

$$f = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \quad 3.1$$

Burada m,n,p tamsayılardır ve rezonatörün mod numarasını temsil ederler, a, b, h rezonatörün sırasıyla x, y, z yönündeki boyutlardır ve  $f_{mnp}$  m,n,p modunun rezonans frekansıdır. Rezonatorde TE ve TM modları olmak üzere iki tip mod mevcuttur. Yayılım yönü z eksenini farz edilirse TE modlarında p, TM modlarında ise m ve n sıfır olamaz. Tüm indisler sıfır değilse, rezonatör hem TE hem de TM modunu destekleyebilir. Rezonatör içerisinde aynı rezonans frekansına sahip TE ve TM modu bulunabilir. Bu modlar dejenere modlar olarak adlandırılır. Ancak iki farklı mod (TE ve TM) sadece indisleri (m, n ve p) sıfır değilse aynı rezonans frekansına sahip olacaklardır. Aynı rezonans frekans için farklı modlar mevcut olsa da, karşılık gelen alan modeli aynı değildir. Bir mikrodalga rezonatörde ortaya çıkabilecek olası modlar, denklem 3. 2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$2\pi f\sqrt{\mu\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad 3.2$$

Denklem 3.2 belirli bir frekans aralığında içi boş bir mikrodalga rezonatöründe ortaya çıkabilecek modları ve sayılarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu çalışmada kullandığımız mikrodalga rezonatörün boyutları; a = 354 mm (x yönüne), b = 337 mm (y yönüne), ve h = 215 mm (z yönüne) olarak alınmıştır. Çizelge 3.1'de gösterilen mod sayısı, 2450 MHz'lik rezonans frekansı etrafında 50 MHz'lik bant genişliği için rezonatörün içi boş olduğu durumda uyarılabilecek olası modlardır.

**Çizelge 3.1.** Boş rezonatörde rezonans frekansları ve modları

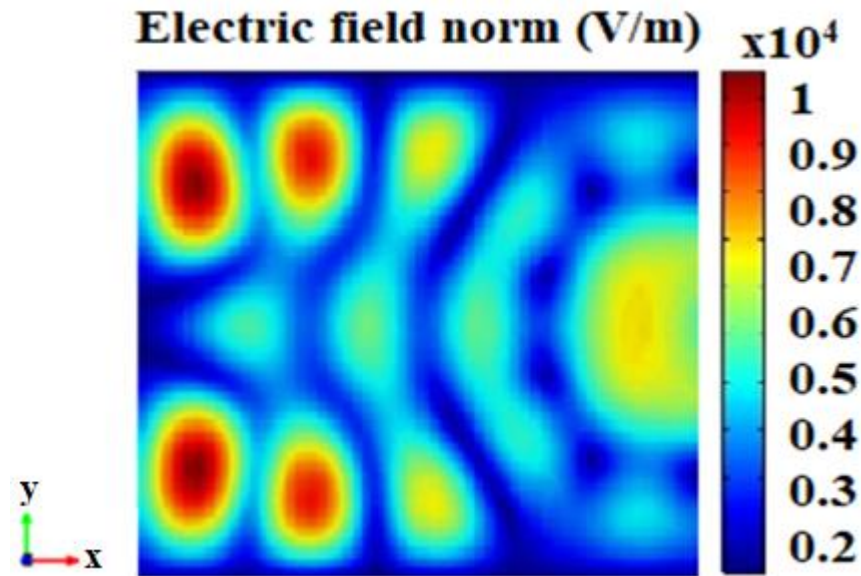
Modları	Mod Tipi	Rezonans Frekansı (GHz)
440	TM	2.4582
223	TE, TM	2.4272
242	TE, TM	2.4156
521	TE, TM	2.4016
033	TE	2.4827
251	TE, TM	2.4815
313	TE, TM	2.4889
303	TE	2.4488

Pratikte, uyarma kaynağının pozisyonuna ve sayısına bağlı olarak, modların sayısı çizelge 3.1'de gösterilenlerden farklı olacaktır. Ayrıca, rezonatördeki bir dizi uyarılmış mod, teorik duruma kıyasla daha küçük olacaktır. (Tijana ve ark. 2005)

Bir mikrodalga rezonatörü içindeki elektromanyetik alanları görselleştirmek için en etkili yöntem, yüksek güçlü bilgisayar simülasyonu kullanılarak sayısal olarak çözmektir. Elektromanyetik problemleri çözmek için uygulanabilecek sayısal yöntemler arasında Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Sonlu Farklar Zaman Domeni Yöntemi (FDTD) ve Moment Metodu (MoM) bulunmaktadır. COMSOL Multiphysics, QuickWave ve Ansoft

gibi ticari yazılımlar bu amaçla kullanılabilir. QuickWave yazılımı FDTD'yi kullanırken COMSOL Multiphysics ve Ansoft FEM kullanır. Elektromanyetik uygulamalar için sayısal simülasyonun doğruluğu, rezonatör ve malzemeyi oluşturmada kullanılan örgü boyutlarına bağlıdır. Daha küçük bir örgü veya eleman normal olarak daha doğru sonuçlar sağlar. Ancak, elektromanyetik bir problemi simüle etmek için gereken zaman, örgü boyutunda azalma ile keskin bir şekilde artmaktadır. (Cheng ve ark. 2007)

Bu çalışmada kullanılmış mikrodalga rezonatörü 2,45 GHz frekansında  $TE_{10}$  temel modunu destekleyen standart bir dikdörtgen kılavuzu ile uyarılmaktadır. Dalga kılavuzu, rezonatörün bir yan duvarına yerleştirilmiştir. Mikrodalga rezonatörü 600 ve/veya 900 W giriş güç ile beslenebilmektedir. Hesaplama alanı bir tetrahedral eleman kullanılarak örgülenmiştir. Öge boyutu Nyquist kriterine göre belirlenmiştir. Örgü 30835 alan elemanları, 2556 sınır elemanları ve 192 kenar elemanlarından oluşmaktadır. İlk olarak içi boş olan mikrodalga fırının elektrik alan dağılımı simülasyon edilmiştir. Şekil 3.4 rezonatörün içi boş olduğu durumda,  $z = 3$  cm düzleminde oluşan elektrik alan dağılımının simülasyon sonucu verilmiştir.



Şekil 3.4. Boş rezonatördeki elektrik alan dağılımı,  $z = 3$  cm

Tasarım optimizasyonunun ilk adımı mikrodalga fırın içindeki elektrik alan dağılımının belirlenmesidir. Mikrodalga fırında alan dağılımı, belirli bir frekansta uyarılan tüm modların toplamı ile elde edilir; her mod, ana koordinat eksenleri boyunca uzayda sinüzoidal bir güç değişimi sağlar. Bu nedenle, çok modlu bir fırında temel olarak uzamsal bir dağılımı vardır.( Metaxas ve Meredith 1983)

Mikrodalga rezonatörün içerisine bir yük yerleştirildiğinde, alan dağılımı daha karmaşık olacaktır. Yük olması durumunda olası modlar değişir ve dejenere modlar bölünebilir ya da birleşebilir. Sonuç olarak, rezonatör içerisindeki alan dağılımı birbiriyle örtüşen modların karışımından oluşacaktır. Yüke bağlı etkiler, güç yoğunluğu dağılımını da etkileyecektir. (Chan ve Reader 2000)

### **3.2.2 Mikrodalga rezonatöründe absorbe edilen enerji ve verim**

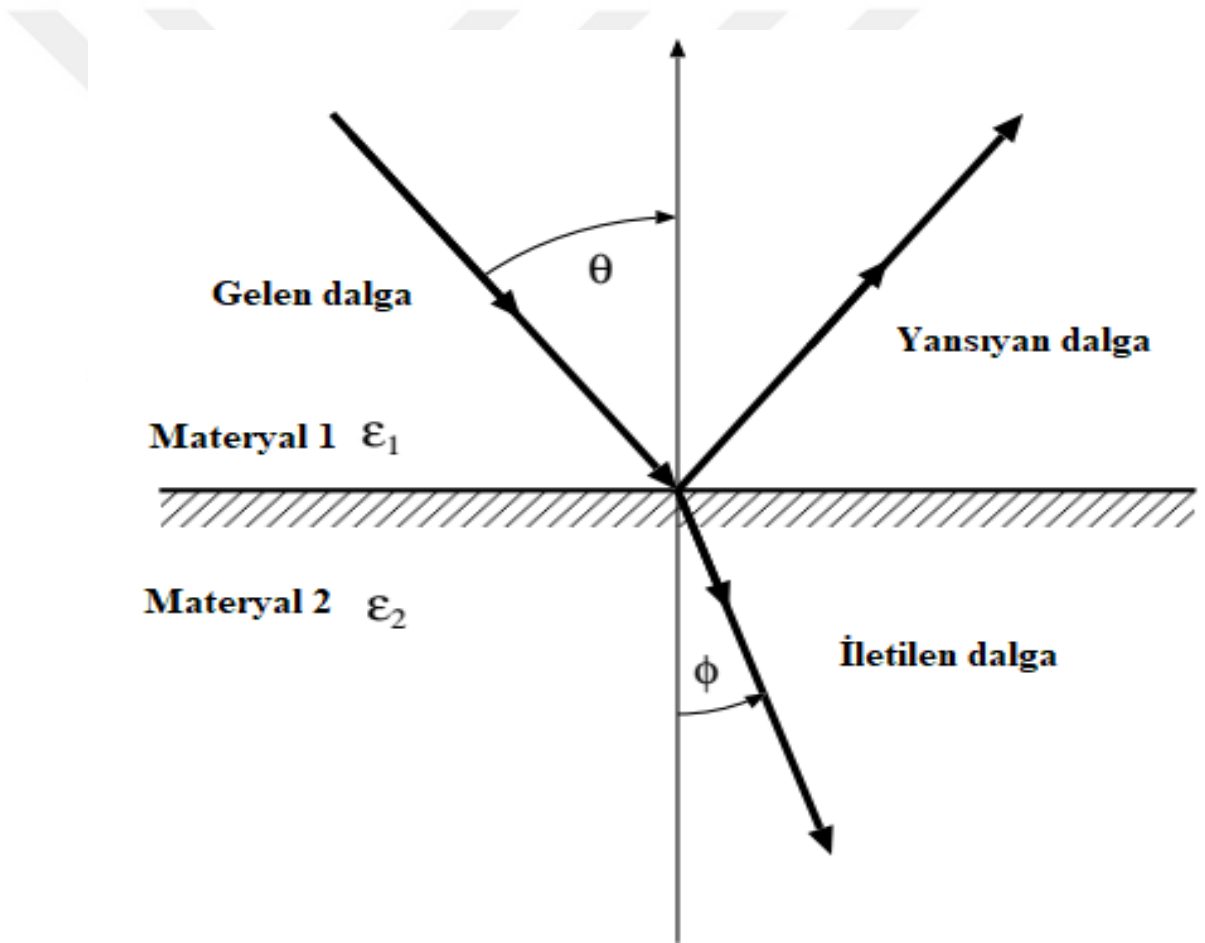
Isıtma sırasında absorbe edilen enerjinin belirlenmesi, yüksek güç yoğunluklu mikrodalga alanına yerleştirilen malzemenin ısıtma işlemini anlamak için özellikle önemlidir. Mikrodalga enerjisi sıcaklığı değiştirir ve ısıtılmış malzemede yeni fiziksel ve kimyasal etkiler yaratır. Aynı anda, mikrodalga ısıtma ekipmanının genel veriminin tahmini, mikrodalga ısıtmanın ekonomik yönlerini değerlendirme açısından önemlidir. Mikrodalga gücü içeren herhangi bir uygulamada enerji kullanımı büyük önem taşımaktadır.

Mikrodalga uygulamalarında güç verimi ısıtılacak malzemenin kalitesini etkilenmektedir. Isıtılacak malzemenin dielektrik özellikleri, çalışma frekansı, malzemenin fırın içerisindeki konumu, malzemenin geometrisi ve boyutu gibi faktörler mikrodalga ısıtma işlemini etkilemektedir. Bundan dolayı en iyi performansı veren mikrodalga fırın tasarım optimizasyon adımlarında rezonatöründeki güç verimini analiz etmek oldukça önemlidir. Bu çalışmada mikrodalga rezonatöründeki güç verimini analiz edebilmek için ısıtılacak malzemenin absorbe edeceği güç ile analiz yapılmıştır. Dolayısıyla mikrodalga ısıtma verimini absorbe edilen gücün ısıtılacak olan materyalin mikrodalga giriş gücüne oranı olarak hesaplanmıştır. Verim( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{P_a}{P_b} \times 100$$

3.3

Burada:  $P_a$  mikrodalga giriş gücüne ve  $P_b$  ise malzeme tarafından absorbe edilmiş gücü ifade etmektedir. Mikrodalga ısıtma sürecinde dalga kılavuzundaki yansıma katsayısı mikrodalga rezonatörünün verimini etkilemektedir. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi bir dielektrik malzemenin yüzeyine düzlem dalga geldiğinde, gelen dalganın bir kısmı geri yansıtılır ve kalanı da malzeme içerisine iletilir.



Şekil 3.5. Dielektrik yüzeyden yansıyan ve iletilen dalgalar (Datta ve ark. 2001)

Yansımaya katsayısının hesabı, özellikle empedans uygunluğunun sağlanması açısından mikrodalga ısıtma sistemlerinin tasarımında önemli yer tutar. Dalga klavuzundaki yansımaya katsayısı( $\Gamma$ ) ( Datta ve ark. 2001);

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad 3.4$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada:  $E_i$  gelen elektrik alan ve  $E_r$  elektrik alanı ifade etmektedir. Güç, elektrik alanın karesiyle orantılı olduğundan, güç veriminin yansımaya katsayısıyla ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2 \quad 3.5$$

Yansımaya katsayısının değeri ısıtma işlemi sırasında ısıtılacak malzemenin dielektrik özellikleri sıcaklıkla değiştiğinden dolayı değişmektedir. Kaynaktan yüke maksimum güç aktarımı için yansımaya katsayısı değeri sıfır olmalıdır. Fakat gerçek uygulamalarda, rezonatörün giriş empedansı ve dalga klavuzunun karakteristik empedansının aynı olması oldukça zordur. Genellikle endüstriyel mikrodalga uygulayıcılar, magnetronun çalışma frekans aralığı boyunca 3'ten daha küçük bir giriş duran dalga oranına (VSWR) sahip olacak şekilde tasarlanmıştır ve maksimum yaklaşık % 25 yansımaya gücüne sahiptir (Adamski 2001).

### 3.2.3 Endüstriyel Amaçlı Mikrodalga Fırın

Mikrodalga fırının iki genel uygulayıcısı, tek modlu ve çok modlu uygulayıcılardır. Endüstriyel uygulamalarda çok modlu mikrodalga fırınlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok modlu fırınların, mekanik olarak basitliği, çok çeşitli ısıtma yüklerini kabul edilebilmesi gibi avantajlara sahip olmaları, bu tip fırınların kullanım alanlarını arttırmıştır.

Çok modlu rezonatörler genellikle tek modlu bir fırında işlemek için genel boyutları çok büyük olan (çalışma frekansının dalga boyundan daha büyük olan) hacimli malzemeleri işlemek için kullanılır. Bu uygulayıcılar, en basit şekliyle, temel kesim frekansının üzerindeki bir frekansta uyarılan metalden yapılmış kutudur. Böyle bir kutu, belirli bir

frekans aralığında çok sayıda rezonans modunu destekleyecektir. Boş bir rezonatör için, bu modların her biri, belirli bir frekansta rezonans yanıtı ile karakterize edilmektedir. (Metaxas ve Meredith 1983)

Çok modlu rezonatörün boyutları, çalışma frekansının serbest uzay dalga boyu cinsinden ifade edildiğinde çok büyük olduğu için, rezonatörün içindeki çalışma frekansında veya çok yakınında duran çok sayıda mod bulunabilir. Rezonatör boyunca istenilen seviyede homojen bir elektrik alan dağılımı oluşturmak için, mümkün olduğu kadar bu modların çoğunun uyarılması gerekir.

Üretim basitliklerine ve sundukları önemli elektriksel özelliklerine rağmen bu tip fırınlar, analizi en karmaşık olan elektriksel yapılardan biridir. Bu tezde, bu tip fırınların sayısal olarak analizi ve tasarımına etki eden parametreler incelenmiştir.

#### **3.2.4 Tasarım ve optimizasyon adımları**

Bir mikrodalga fırının tasarımında kullanılan optimizasyonun amacı, ısıtılacak malzeme üzerinde düzgün sıcaklık dağılımının sağlanması ve yüksek verimin sağlanabilmesidir. Her iki amaç da, birbirine çok yakın konumlanmış çok sayıda modu destekleyen rezonatör geometrisinin seçilmesiyle gerçekleştirilebilir.

Rezonatör veriminin önemli olmasının nedeni, enerji tasarrufunun ötesinde düşük rezonatör verimi genellikle çok yüksek gerilimler (ark) ve yüksek akımlara neden olmasıdır.

Çok modlu bir fırında üniform ısıtma ve yüksek verim elde etmek zordur. Bu zorluk, mikrodalga rezonatörün içindeki elektromanyetik alanın homojen olmayan bir dağılımından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, çoklu duran dalga modlarının uyarılmasına ek olarak, üniform ısıtmayı desteklemek için bir takım teknikler kullanılabilir. Bununla birlikte çok modlu mikrodalga rezonatörün verimini artırmak için tasarım ve optimizasyon yapılması gerekmektedir.

Endüstriyel bir fırında tasarım optimizasyonu üç konu ile ilişkilidir. Bunları rezonatör boyutları, kaynağın konumu ve malzeme özellikleri/konumu olarak ifade edebiliriz.

#### **3.2.4.1 Rezonatör boyutları**

Rezonatörlerdeki ısıtmanın homojenliğini sağlamak için fazla sayıda modun kullanılması gerekmektedir. Mod sayısındaki bu istenen artış, rezonatörün dalga boyuna göre boyutlarının arttırılmasıyla sağlanabilir. ( Mehrdad, 2009)

Mikrodalga rezonatörün tasarımının ilk adımı içerisinde oluşan alan dağılımının bilinmesidir. Ayrıca, tasarım yapılırken malzemenin boyutuna ve şekline, çalışmanın amacı ve benzer faktörlere de dikkat edilmelidir.

Mikrodalga ısıtma sürecinde olası modların sayısı ne kadar çok olursa, homojenlik o kadar yüksek olacaktır. Belirli bir çalışma frekansı için rezonatör ne kadar büyük olursa, olası mod sayısı da o kadar büyür. Bu nedenle büyük bir rezonatör, mikrodalga ısıtma homojenliğini iyileştirmede önemli bir faktördür. (Mehrdad, 2009)

#### **3.2.4.2 Kaynağın konumu**

Dalga kılavuzunun yeri rezonatör içerisinde oluşan alan dağılım yönünü ve yoğunluğu belirlemektedir. Dolayısıyla, mikrodalga fırın tasarlanırken dalga kılavuzunun yerinin hesaplanması gerekmektedir. Dalga kılavuzunun konumu ve yönelimi, yüklü bir mikrodalga rezonatörde ısıtma modeli üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Bazı çalışmalarda çoklu besleme dalga kılavuzları ısıtma homojenliğini geliştirmek için kullanılmıştır. Çoklu besleme prensibi, mümkün olduğunca çok sayıda rezonans modunu uyarmakla sağlanır. Bir rezonatörde çok sayıda mod uyarıldığında, elektromanyetik alanlar daha düzenli olma eğiliminde olurlar. Rezonatör duvarının belirli bir yerinde bulunan her besleme dalga kılavuzu, uyarma kaynağına karşılık gelen belirli modları harekete geçirir.



İlave bir uyarma kaynağın olarak dalga kılavuzu kullanıldığında, rezonatöre farklı bir mod seti eklenir, böylece daha homojen ısıtma elde edilebilir. (Datta ve ark. 2001)

Mikrodalga ısıtmanın homojenliğini geliştirilmesinin yanı sıra, mikrodalga rezonatörlerinin birden fazla noktada beslenmesinin başka nedenleri de vardır. Endüstriyel uygulamalarda magnetronlar sınırlı bir çalışma süresine sahip olduklarından birden fazla sayıda kullanılması genellikle daha iyi olmaktadır, böylece eğer bir magnetron çalışmazsa, diğer magnetron çalışarak işlemin durmamasını sağlar. İlave bir avantajı, tek güç kaynaklarının mevcut olmadığı onlarca kilowatt'tan daha fazla yüksek güç uygulamalarında ortaya çıkmaktadır. ( Mehrdad, 2009)

### **3.2.4.3 Malzeme konumu ve özellikleri**

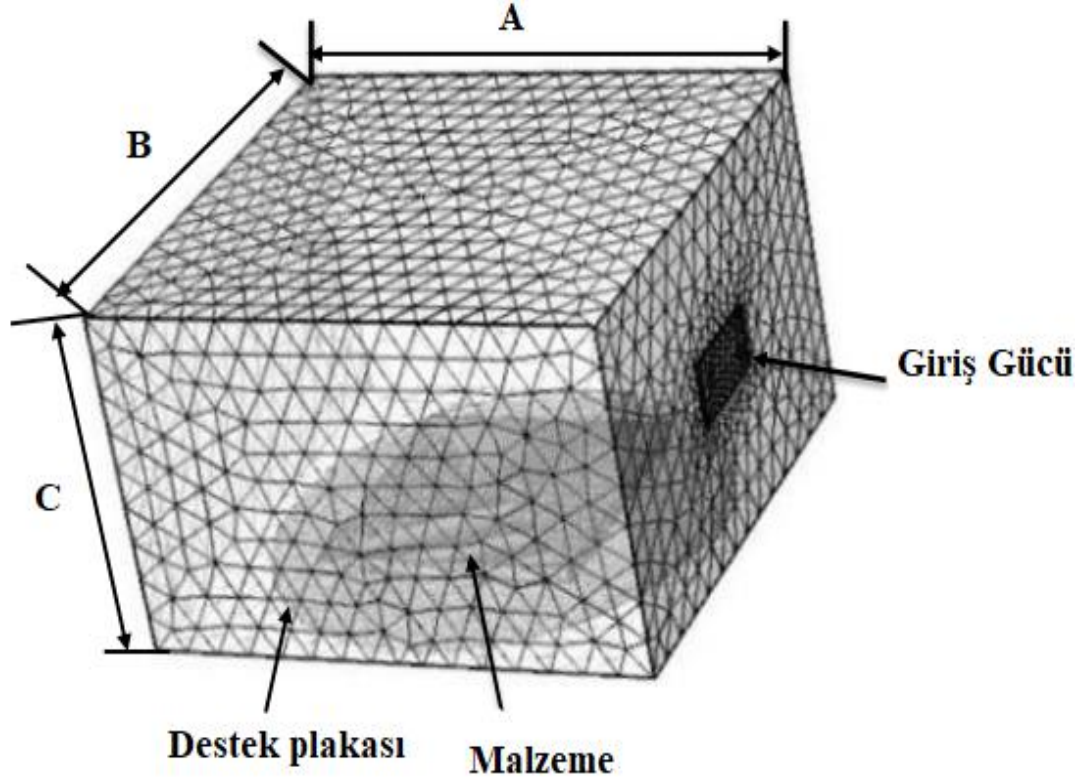
Isıtılacak malzemenin dielektrik özellikleri ve fırın içerisindeki konumu mikrodalga ısıtmayı etkileyen faktörlerden biridir. Rezonatör içindeki modların durumu rezonatör ve aynı zamanda malzeme tarafından belirlendiğinden, rezonatör içindeki yükün hareketi ısınmanın homojenliği için çok önemlidir. Endüstriyel amaçlı mikrodalga fırının tasarım optimizasyonu yapmak için mikrodalga rezonatörü içerisindeki malzemenin konumu değiştirilerek yüksek verim ve üniform elektrik alan dağılımı sağlanabilmektedir.

Yükün tanıtılması, alanın düzenlenmesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu şekilde, malzemenin özellikleri, geometrisi ve konumu devrenin elektriksel özelliklerinin bir parçası haline gelir. Bu özellik, yükün dielektrik özelliklerinin zaman, sıcaklık ve diğer parametrelerle değiştiği tasarımlarda özellikle büyük bir sorun haline gelir. Örneğin, malzemeler ısıtılığında, dielektrik özellikleri değişir. Bu değişiklikle rezonatörün alan özellikleri de değişir. Bazı durumlarda, malzeme özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, uygulayıcının özelliklerinin değişmeden kalacağı kadar küçüktür. Bu, rezonatör tasarımında kullanılabilir mükemmel bir basitliktir. (Mehrdad, 2009)

Bu tezde tasarım optimizasyon problemi, rezonatör içerisindeki malzeme konumunun değiştirilerek diğer faktörler sabit tutularak, sistemin verimini artıran sürecin bulunmasıdır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞIMA

Bu çalışmada kullanılan dielektrik malzeme ile yüklenmiş mikrodalga fırının geometrisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu çok modlu mikrodalga rezonatörün boyutları  $A = 354$  mm (x yönüne),  $B = 337$  mm (y yönüne) ve  $C = 215$  mm (z yönüne) olarak seçilmiştir. Mikrodalga rezonatör 2.45 GHz çalışma frekansında  $TE_{10}$  temel modunu destekleyen standart bir dikdörtgen dalga kılavuzu ile uyarılmaktadır. Dalga kılavuzu, rezonatörün yan duvarına yerleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında malzeme olarak endüstriyel çamur seçilmiştir. Malzeme fırın içerisinde bulunan silindirik şekilli bir cam plaka üzerine yerleştirilmiştir. Cam plakanın dielektrik özelliği  $\epsilon_r = 2.1 - j0.0003$  olarak alınmıştır. Malzeme kalınlığı 10 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1. Dielektrik malzeme ile yüklenmiş mikrodalga fırın geometrisi

Tüm malzeme numuneleri, çok modlu mikrodalga fırınında 2.45 GHz çalışma frekansında 5 dakika ısıtılmıştır. Malzemenin dielektrik sabiti ve dielektrik kaybı, 2.45 GHz frekansında iki paralel 200 mm probu olan bir network analizör (Agilent, E5061B) kullanılarak ölçülmüştür. Tüm simülasyon ve deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin dielektrik değerleri çizelge 4.1’de listelenmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çalışmada kullanılan malzemelerin dielektrik özellikleri

	$\epsilon'$	$\epsilon''$
Örnek 1	90	4.25
Örnek 2	77.10	9.19
Örnek 3	59.99	11.23
Örnek 4	76.22	10.18

Mikrodalga ısıtma verimi ve elektrik alan dağılımı, ısıtılacak numunenin geometri ve boyutu, dielektrik özellikleri, fırın içerisindeki yerleşimi, çalışma frekansı, uygulanan/giriş gücü, ısıtma süresi, başlangıç sıcaklığı, dalga kılavuzunun rezonatör üzerindeki yerleşimi ve sayısı, rezonatör boyutu ve geometrisinden büyük ölçüde etkilenmektedir.

#### 4.1 Malzeme Geometrisi

Isıtılacak malzemenin geometrisi, fırındaki duran dalga oranını ve sonuç olarak mikrodalga güç emilimini etkiler. Bu çalışma için seçilen örnek 1 (90-j4.25) malzemesi dikdörtgen ve silindirik geometrili olarak kullanılacaktır. Her iki geometrisi için başlangıç sıcaklığı 9 °C ve kaynağın gücü 900 W’tır. Malzeme fırın tabandan  $z = 3$  cm yukarıya yerleştirilip 5 dakika ısıtılmıştır.

Şekil 4.2’de dikdörtgen geometriye malzeme sahip malzemenin mikrodalga ısıtma işlemi sonunda malzeme üzerinde ve rezonatör içindeki elektrik alan dağılımını, mikrodalga ısıtmadan sonra deneysel çalışmadan elde edilen sıcaklık dağılımı ve fax kağıdı cevabı göstermektedir. Örnek 1; 18cm x 18cm x 1cm boyutuna eşit olacak şekilde tabandan  $z = 3$

cm yukarıda rezonatörün ortasına yerleştirilmiştir. Şekil 4.2a, dikdörtgen geometrili malzeme için elektrik alan dağılımını göstermektedir. Dikdörtgen geometrili malzemenin absorbe ettiği güç 376 W'dir; Buradan sistem verimi ( $\eta$ ), % 42 olarak hesaplanmaktadır.

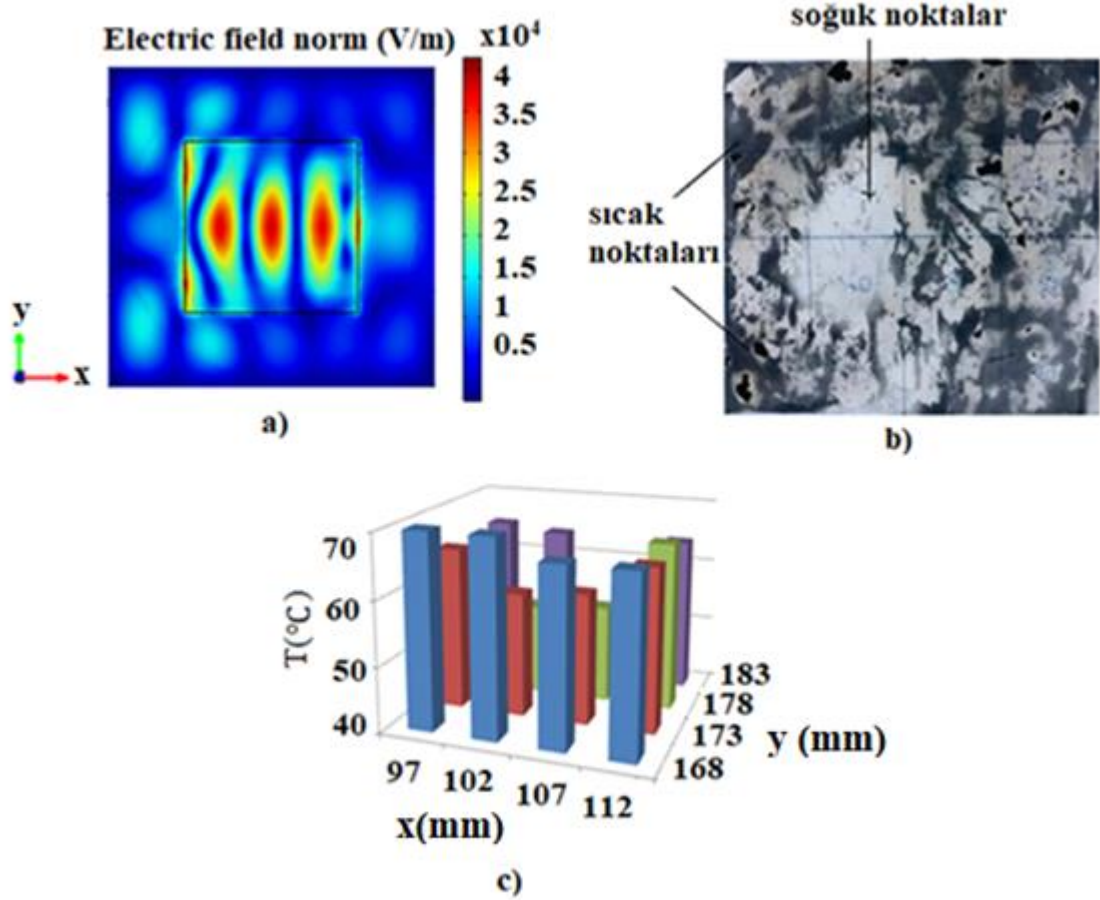
Bir elektromanyetik dalga çok modlu yüklü bir fırında yayıldığında, malzemenin özelliklerine bağlı olarak emilir ve ısıya dönüştürülür, bu da sıcaklığının artmasına neden olur. Bu nedenle, sonuçların doğrulaması sıcaklık dağılımı açısından gerçekleştirilmiştir. Malzemeler üzerinde sıcaklık dağılımını ölçmek için, malzemenin üstüne 16 bölüme ayrılan bir termal faks kağıdı yerleştirilmiştir. Bir lazer termometresi kullanılarak her bölümün merkezinden sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Şekil 4.2b mikrodalga ısıtma işleminden sonra dikdörtgen kesitli örnek 1 üzerine yerleştirilmiş termal faks kağıdını göstermektedir. Şekil 4.2c, deneysel çalışmadan elde edilen dikdörtgen geometrili örnek 1 üzerinde sıcaklık dağılım paternini göstermektedir. Mikrodalga ısıtma işleminden sonra, ısıtılmış malzemenin üzerinde ölçülen en düşük sıcaklık  $T_{min} = 51^{\circ}\text{C}$  ve en yüksek sıcaklık ise  $T_{max} = 67^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Malzeme zerindeki ortalama sıcaklık dağılımı ise  $59^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.3'te, silindirik geometrili malzeme için mikrodalga ısıtma işlemi sonunda malzeme üzerinde ve rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımını ve mikrodalga ısıtmadan sonra deneysel çalışmadan bulunan malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımı ve fax kağıdı cevabı gösterilmiştir. Şekil 4.3a, silindirik geometrili malzeme için elektrik alan dağılımını göstermektedir. Silindirik geometrili malzeme tarafından absorbe edilen güç 296 W'dir. Buradan, sistemin verimi ( $\eta$ ) % 33 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3b mikrodalga ısıtma işleminden sonra silindirik kesitli örnek 1 üzerine yerleştirilmiş termal faks kağıdını göstermektedir. Şekil 4.3c, mikrodalga ısıtmasından sonra ölçülmüş silindirik geometrili malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. En yüksek ve en düşük sıcaklıklar sırasıyla  $T_{max} = 65^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{min} = 49^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Isıtılmış silindirik geometrili malzemenin ortalama sıcaklık dağılımı  $57^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.

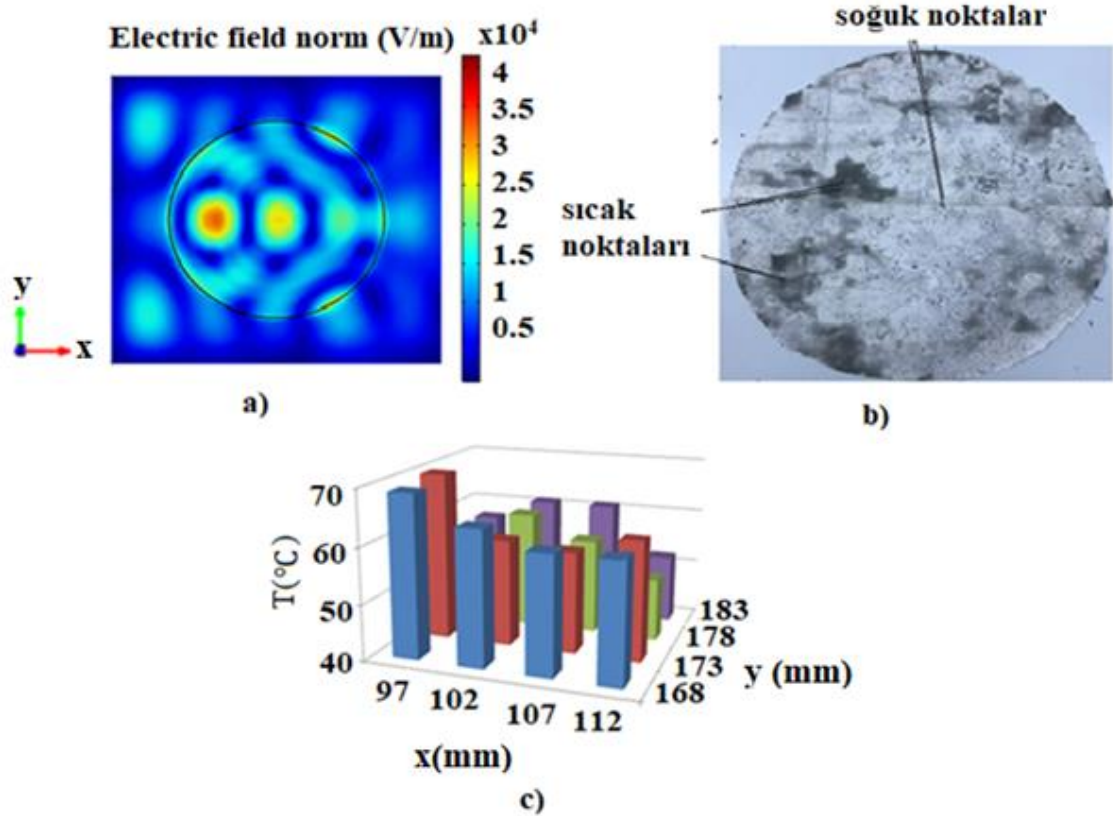
Çizelge 4.2, farklı malzeme geometrileri için sistemin absorbe ettiği gücü ve verimi göstermektedir. Absorbe edilen güç ve ısıtma verimi, malzemenin geometrisine göre değişmektedir.

**Çizelge 4.2.** Farklı geometrili mlezemeler için absorbe edilen güç ve sistem verimi

Örnek Geometri Türü	Absorbe edilen güç (W)	Verim, $\eta$ (%)
Dikdörtgen	376	42
Silindirik	296	33



**Şekil 4.2.** Dikdörtgen geometrili örnek 1 için; a) Elektrik alan dağılımı b) faks kağıdı cevabı c) Sıcaklık dağılımı



Şekil 4.3. Silindirik geometrili örnek 1 için; a) Elektrik alan dağılımı b) fax kağıdı cevabı c) Sıcaklık dağılımı

Simülasyon sonuçları, malzemenin aynı dielektrik geçirgenliğe ve başlangıç sıcaklığına sahip olmasına rağmen, örneklerin üzerindeki elektrik alan dağılımlarının aynı desenlere sahip olmadığını göstermektedir. Ayrıca ölçülen ve hesaplanan sonuçlardan dikdörtgen ve silindirik geometriye sahip malzemelerin farklı sıcaklık dağılımlarına sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Verim ısıtılacak malzemenin üzerindeki sıcaklık dağılımı ile ilgili olduğundan, sıcaklıktaki değişim mikrodalga ısıtma sırasında ısıtma veriminde bir değişiklik yaratmaktadır.

Çizelge 4.2 ve şekil 4.2a ve 4.3a'deki analiz sonuçlarına dayanarak dikdörtgen geometrinin, mikrodalga ısıtma sisteminde için silindirik geometriye göre avantajlı olduğu söylenebilir.

## 4.2 Malzemenin Dielektrik Özellikleri

Fırın içinde yer alan örneklerin dielektrik özellikleri, ısıtma işlemi sırasında malzeme tarafından absorbe edilen mikrodalga gücünün miktarını etkilemektedir. Isıtılacak malzemenin dielektrik özellikleri, sıcaklığın, frekansın ve malzemenin yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Dielektrik özelliklerin sıcaklıkla değişimi, mikrodalga fırın içindeki duran dalga sayısını ve dolayısıyla mikrodalga emilimini etkiler.

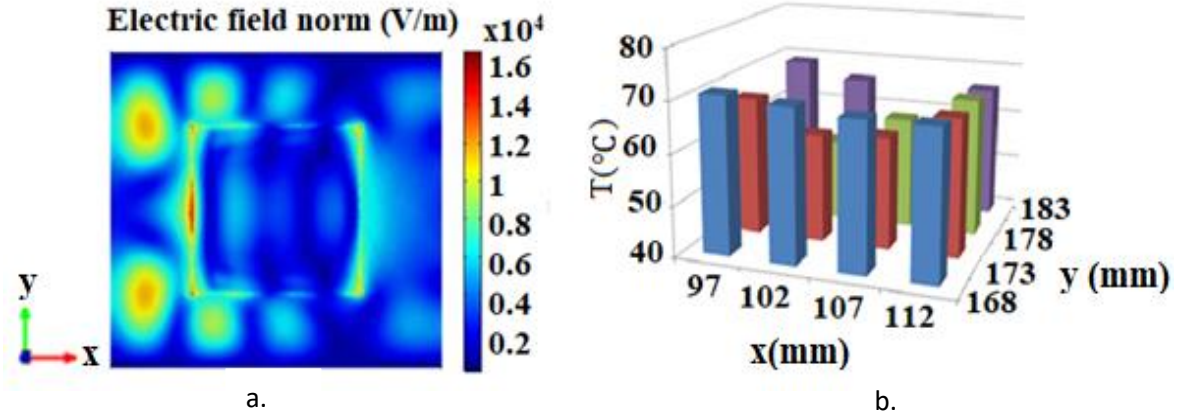
Mikrodalga fırındaki farklı dielektrik özelliklere sahip malzemelerin elektrik alan dağılımları simüle edilip her bir malzeme için sistem verimi hesaplanmıştır. Farklı dielektrik geçirgenliklere sahip malzemeler için, absorbe edilen güç dielektrik sabiti tarafından belirlenir. Daha yüksek bir dielektrik sabiti, malzeme tarafından emilen daha büyük bir güce karşılık gelir ve bu da verimi yükseltmektedir.

Bu çalışmada, ilk olarak, dielektrik özelliklerin mikrodalga ısıtmanın performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için iki farklı malzeme kullanılmıştır. İkinci olarak da, çok modlu rezonatöründe bulunan malzemenin üstüne konulan ek dielektrik malzemenin mikrodalga ısıtma performansına olan etkisini araştırılmıştır. KESTAMID için  $\epsilon_r = 3,7$  olarak alınmıştır. Örnek 2 (77.10-j9.19) ve örnek 3 (59.99-j11.23) malzemeleri dikdörtgen geometrili olarak kullanılacaktır. Her iki dielektrik özellikleri için başlangıç sıcaklığı 9 °C ve kaynağın gücü 900 W'tır. Malzeme içerisinde 5 dakika ısıtılacaktır. Örnek 2 ve 3'ün malzemelerin boyutları 18cm x 18cm x 1cm olacak şekilde hazırlanmış ve tabandan z = 3 cm yukarıda ve rezonatörün ortasına yerleştirilmiştir.

Şekil 4.4'te dikdörtgen geometreli örnek malzeme 2 ( $\epsilon_r = 77.10-j9.19$ ) için mikrodalga ısıtma işlemi sonunda malzeme üzerinde ve rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımı ve ısıtmadan sonra deneysel çalışmadan bulunan malzeme üzerinde sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 4.4a, örnek 2 üzerindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Simülasyon sonuçlarından elektrik alan şiddetinin malzemenin dielektrik özelliğinden için beklendiği gibi malzemenin dielektrik özelliklerinden doğrudan etkilendiği görülmektedir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 380,04 W ve sistemin hesaplanan verimi ( $\eta$ ), %

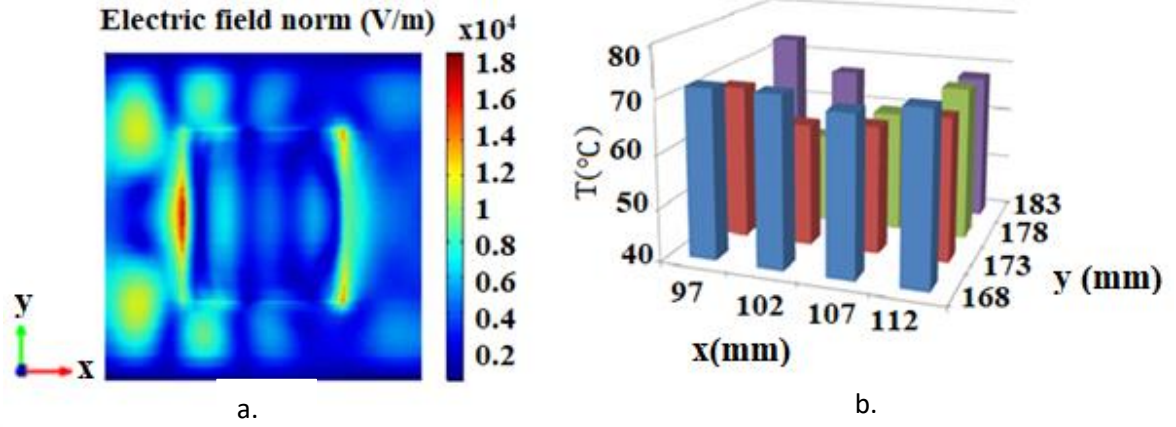
42,31 olarak bulunmuştur. Şekil 4.4b, deneysel çalışmadan elde edilen örnek 2 üzerindeki sıcaklık dağılımı paternini göstermektedir. Mikrodalga ısıtmadan sonra, ısıtılmış malzemenin üzerindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık,  $T_{min} = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{max} = 71 \text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Malzeme üzerindeki ortalama sıcaklık dağılımı  $62 \text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.5, dikdörtgen geometreli örnek malzeme örnek 3 ( $\epsilon_r = 59.99 - j11.23$ ) için mikrodalga ısıtma işlemi sonunda malzeme üzerinde ve rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımını ve mikrodalga ısıtmadan sonra deneysel çalışmadan bulunan malzeme üzerinde sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 4.5a, örnek 3 üzerindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Örnek 3 tarafından absorbe edilen güç  $430,83 \text{ W}$  ve hesaplanan verim ( $\eta$ ),  $\% 47,87$  olarak bulunmuştur. Şekil 4.5b, deneysel çalışmadan elde edilen örnek 3 üzerinden sıcaklık dağılımı paternini göstermektedir. Mikrodalga ısıtma işleminden sonra, ısıtılmış malzeme üzerindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık,  $T_{min} = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{max} = 71 \text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak sırasıyla ölçülmüştür. Malzeme üzerindeki ortalama sıcaklık dağılımı  $63 \text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.4.** Örnek 2 için; a) Fırın içindeki elektrik alan dağılımı b) Malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımı





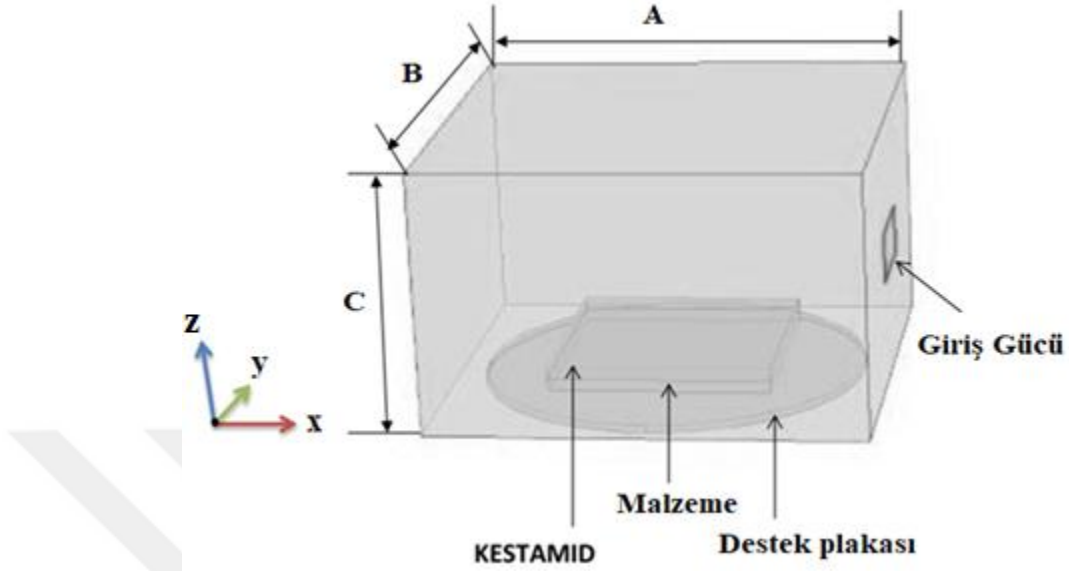
Şekil 4.5. Örnek 3 için; a) Fırın içindeki elektrik alan dağılımı b) Malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımı

Çizelge 4.3. Absorbe edilen güç ve verim

	$\tan\delta (10^{-3})$	Absorbe edilen güç (W)	Verim (%)
Örnek 2	119.2	380.34	42.31
Örnek 3	193.87	430.83	47.87

Simüle edilen ve hesaplanan sonuçlardan, malzemenin başlangıç sıcaklığı, numunenin boyutu ve geometrisi, örneklerin rezonatör içerisindeki konumu, frekans ve rezonatör boyutlarını aynı tutularak sadece dielektrik özellikleri farklı malzemeler konulduğunda mikrodalga fırın içerisindeki elektrik alan dağılımının ve verimin değiştiği bulunmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarla simüle edilmiş değerlerin uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ayrıca sistem verimi ısıtılacak malzemenin üzerindeki sıcaklık dağılımı ile ilgili olduğundan, sıcaklıktaki değişim mikrodalga ısıtma sürecinde ısıtma veriminde bir değişiklik oluşturmasına sebep olmaktadır.

Dielektrik malzemelerin mikrodalga ısıtma performansı üzerine etkisini görmek için malzeme üzerine ek malzeme yerleştirilmiştir. Şekil 4.6, üzeri kestamid malzeme ile kaplanmış malzemenizin mikrodalga fırın içerisine yerleşim düzeni gösterilmektedir.



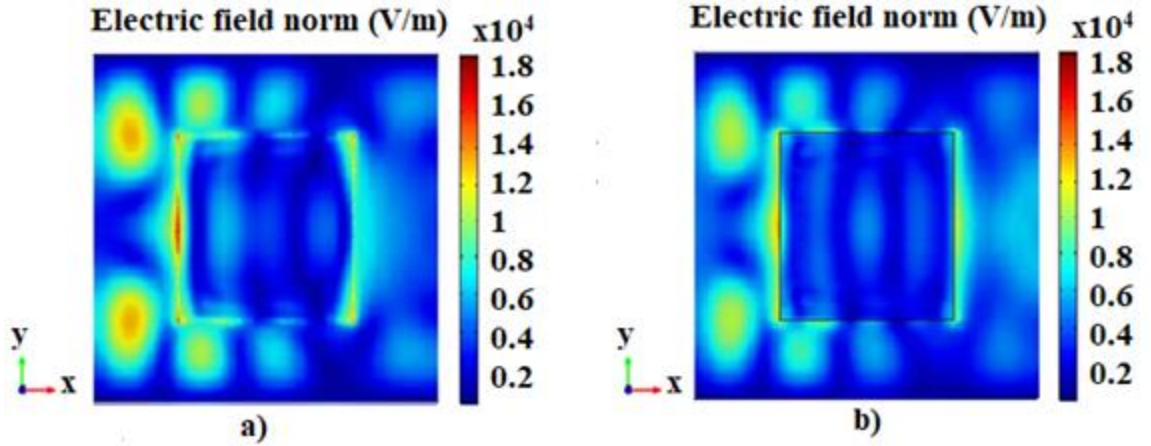
Şekil 4.6. KESTAMID kaplama ve dielektrik malzeme ile yüklü mikrodalga fırın geometrisi

Ek dielektrik bir malzeme örneğimizin üstüne yerleştirildiğinde, çok modlu rezonatör içindeki orijinal elektrik alan dağılımı değişir, çünkü iki farklı malzeme arasında da elektromanyetik alan yansıması ve iletimi söz konusu olur. Bu çalışmada, çok modlu rezonatörde üzerine başka bir dielektrik malzeme yüklenen yapının mikrodalga ısıtma performansına etkisi araştırılmıştır. Ek malzeme için dikdörtgen geometrili ve 1 cm kalınlığında KESTAMID kullanılmıştır.

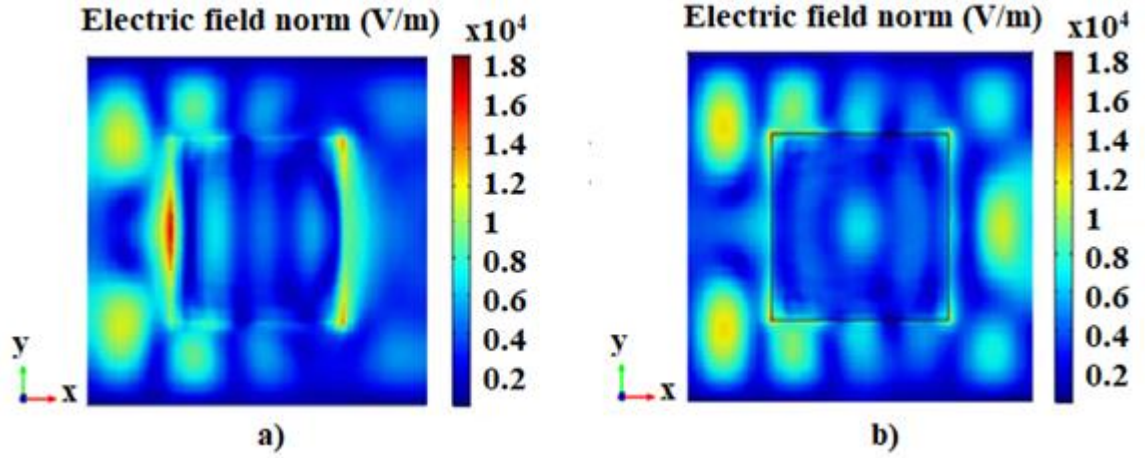
Şekil 4.7, örnek 2 için KESTAMID kaplama yokken ve olduğu durumda malzeme üzerindeki ve çok modlu rezonatörü içindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.7a, örnek malzeme 2 üzerindeki kaplama yokken elektrik alan dağılımını göstermektedir. Simülasyon sonuçlarından malzeme tarafından absorbe edilen güç 380,04 W ve sistemin hesaplanan verim ( $\eta$ ), % 42,31 olarak bulunmuştur. Şekil 4.7b örnek 2 üzerinde dielektrik kaplama olması durumunda çok modlu rezonatör içinde elektrik dağılımı gösterilmiştir. Simülasyondan, mikrodalga ısıtma işleminden sonra örnek 2 tarafından absorbe edilen

mikrodalga gücü, 504,61 W olarak elde edilmiştir. Sistem verimi de,  $\eta = \% 56,07$  olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.8, örnek 3 için KESTAMID kaplama yokken ve olduğu durumda malzeme üzerindeki ve çok modlu rezonatörü içindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.8a, örnek malzeme 3 için dielektrik kaplama yokken elektrik alan dağılımını göstermektedir. Örnek 3 tarafından absorbe edilen güç 430,83 W ve hesaplanan verim ( $\eta$ ), % 47,87 olarak bulunmuştur. Şekil 4.8b, malzeme üzerinde dielektrik kaplama olması durumunda çok modlu rezonatör içinde elektrik dağılımını gösterilmiştir. Örnek 3 tarafından absorbe edilen güç 561,26 W'dir. Malzemenin hesaplanan verim % 62,36 olarak bulunmuştur. Çizelge 4.4, KESTAMID kaplama yokken ve olduğu durumunda, farklı malzemeler tarafından elde edilen sonuçların özetini göstermektedir.



Şekil 4.7. Örnek 2 için çok modlu rezonatör içinde elektrik alan dağılımı: a) dielektrik kaplama yokken b) malzeme üzerinde dielektrik kaplama olması durumunda



**Şekil 4.8.** Örnek 3 için çok modlu rezonatör içinde elektrik alan dağılımı: a) dielektrik kaplama yokken b) malzeme üzerinde dielektrik kaplama olması durumunda

**Çizelge 4.4.** Malzemeletin üzeri boş ve KESTAMID kaplama konulduğunda, absorbe edilen güç ve verim

	tan $\delta$ ( $10^{-3}$ )	Absorbe edilen güç (W)		Verim (%)	
		Kaplama yokken	Kaplama olması durumunda	Kaplama yokken	Kaplama olması durumunda
Örnek 2	119.2	380.34	504,61	42.31	56,07
Örnek 3	193.87	430.83	561,26	47.87	62,36

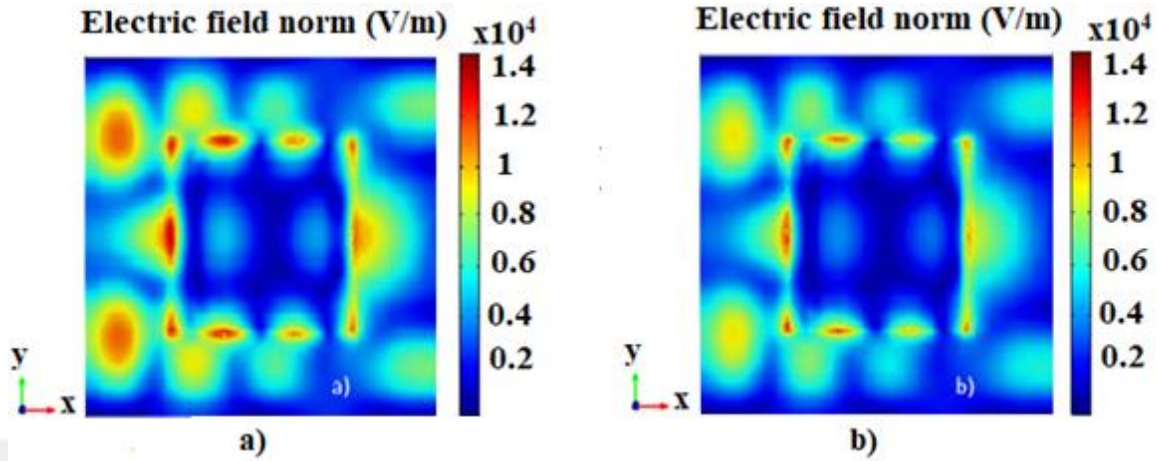
Şekil 4.7 ve 4.8'de, yeni eklenen dielektrik kaplamanın, sistemin elektrik alan dağılımını ve verimi büyük ölçüde etkilediği görülmektedir. Elektrik alan dağılımı kaplama durumu kıyaslandığında, malzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı daha homojenlik göstermiştir. Ayrıca kestamid kaplama olması durumunda, yüksek kayıp tanjantına sahip malzemeler üzerindeki elektrik alan dağılımı, düşük kayıp tanjantına sahip malzemelere kıyasla daha fazla homojenlik göstermektedir.

KESTAMİD kaplamanın yerleştirilmesi, bir dielektrik kaplama yerleştirilmeden önce elde edilen verim ile karşılaştırıldığında sistem verimini ortalama olarak % 15 artırmıştır. Son olarak beklendiği gibi, mikrodalga ısıtma işleminde kullanılan farklı dielektrik özelliklerinin sahip malzemelerin farklı verim seviyelerini sağladığı sonucuna varılabilir. Isıtılacak olan malzemenin üzerine bir dielektrik kaplama yerleştirilerek sistem verimi artırılabilir. Bu nedenle, çok modlu rezonatör içinde bulunan malzemenin dielektrik özellikleri, verimli bir mikrodalga fırın tasarlanırken büyük önem taşımaktadır.

### 4.3 Mikrodalga Gücü

Mikrodalga fırının giriş gücü ısıtılacak malzemenin kalitesini ve ısıtma oranını etkilenmektedir. Fırının boyutuna ve ısıtılacak malzemenin özelliklere göre giriş gücünün hesaplanması ve ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada seçilen örnek 4 (76.22-j10.18) malzemesi dikdörtgen geometridir. Örnek 4; 18cm x 18cm x 1 cm boyutuna eşit olacak şekilde fırın tabanından  $z = 3$  cm düzlemine rezonatörün ortasına yerleştirip 5 dakika ısıtılacaktır. Malzeme 600 W ve 900 W mikrodalga giriş güç değerleriyle ısıtılmıştır.

Şekil 4.9'te mikrodalga ısıtma işlemi için farklı dielektrik değerlerine sahip malzemelerin üzerinde ve rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.9a, 900 W giriş güç verildiğinde elektrik alan dağılımını göstermektedir. Simülasyondan, mikrodalga işlemi sonunda malzemenin absorbe ettiği gücü, 353.23 W olarak hesaplanmıştır. Sistem verim de  $\eta = \%39.25$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9b, 600 W giriş gücü verildiğinde örnek 4 için elektrik alan dağılımını göstermektedir. Malzemenin emdiği güç 235.49 W'dir. Buradan sistem verim  $\eta = \%39.25$  olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.5, farklı giriş gücü değerleri için elde edilen sonuçların özetini göstermektedir.



Şekil 4.9. Farklı giriş güçlerinin elektrik alan dağılımı: a) 900 W b) 600 W

Çizelge 4.5. Farklı giriş güçleri için absorbe edilen güç ve verim

Giriş gücü (W)	Absorbe edilmiş gücü (W)	Sistem verimliliği (%)
900	353.23	39.25
600	235.49	39.25

Yukarıda simüle edilen ve hesaplanan sonuçlar, giriş gücü değıştikçe absorbe edilen gücü de değıştiğini göstermiştir. Giriş gücü ne kadar yüksek ise ısıtılacak malzeme tarafından absorbe edilen gücü o kadar yüksek olacaktır. Sistem verimliliği absorbe edilen gücün ve giriş gücün orantılı olarak hesaplandığından dolayı sistem verimliliği değışmemiştir. Dolayısıyla verimli mikrodalga fırın tasarlanırken giriş gücünün miktarının dikkate alınması gerekmektedir.

#### 4.4 Çalışma Frekansı

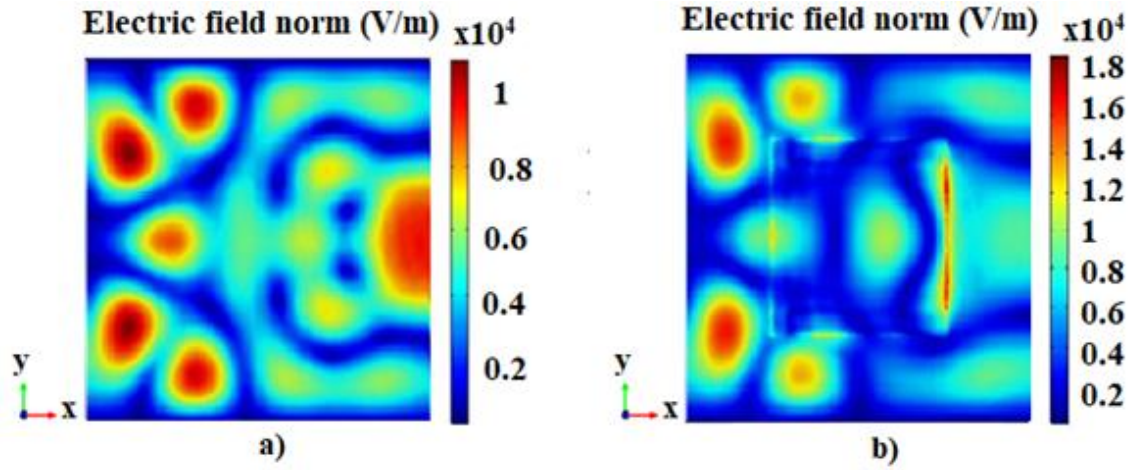
Mikrodalga işlemlerinde, mikrodalga gücünün malzemelerle etkileşimi, kullanılan mikrodalga frekansına bağlıdır. Endüstriyel ve evsel uygulamalar için yaygın olarak 915 MHz ve 2,450 MHz olmak üzere iki frekans verilmektedir. Çalışmamızda mikrodalga frekansının ısıtılacak malzemedeki elektrik alan dağılımı üzerindeki etkisini

değerlendirmek için, çalışma frekansına (2,45 GHz) yakın frekanslar (yani 2,40GHz, 2,45GHz ve 2.50 GHz) ile simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada seçilen malzeme dikdörtgen geometrili olan örnek 2 (77.10 - j9.19)'tir. Malzemenin boyutu 18 cm x 18 cm 1cm olacak şekilde tabandan  $z = 3$  cm yukarıda rezonatörün ortasına yerleştirip 5 dakika ısıtılmıştır. Giriş gücü 900 W ve malzemenin başlangıç sıcaklığı 9°C olarak alınmıştır.

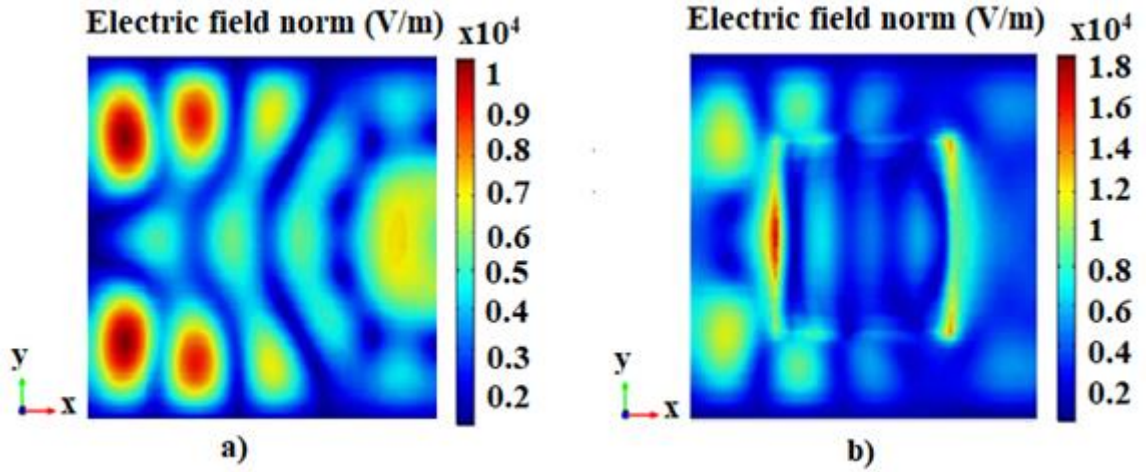
Şekil 4.10'da çalışma frekansı 2,40 GHz olduğu durumda fırın boşken ve fırın içerisinde malzeme konulduğunda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımının gösterilmiştir. Şekil 4.10a'da 2,40 GHz çalışma frekansında fırın boşken fırının içerisindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.10b'da çalışma frekansı 2,40 GHz olduğu durumda fırının içerisinde malzeme yerleştirildiğinde, fırındaki ve malzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı sunulmuştur. Malzeme tarafından absorbe edilen gücü 380 W'dir. Hesaplanan verimliliği ise % 42,2'tir.

Şekil 4.11'da çalışma frekansı 2,45 GHz olduğu durumda fırın boşken ve fırın içerisinde malzeme konulduğunda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımının gösterilmiştir. Şekil 4.11a'da 2,45 GHz çalışma frekansı altında fırın boşken fırının içerisindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.11b'da çalışma frekansı 2,45 GHz olduğu durumda fırının içerisinde malzeme yerleştirildiğinde, fırındaki ve malzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı sunulmuştur. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 428 W'tir. Hesapladığımız verim değeri ise % 46,5'tir.

Şekil 4.12'da çalışma frekansı 2,50 GHz olduğu durumda fırın boşken ve fırın içerisinde malzeme konulduğunda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımının gösterilmiştir. Şekil 4.12a'da 2,50 GHz çalışma frekansı altında fırın boşken fırının içerisindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.12b'da çalışma frekansı 2,50 GHz olduğu durumda fırının içerisinde malzeme yerleştirildiğinde, fırındaki ve malzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı sunulmuştur. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 384 W'tir. Hesaplanan verim değeri ise % 43'tir. Çizelge 4.6'da farklı çalışma frekanslarına karşılık gelen malzeme tarafından absorbe edilen güç ve sistem verimliliği gösterilmiştir.

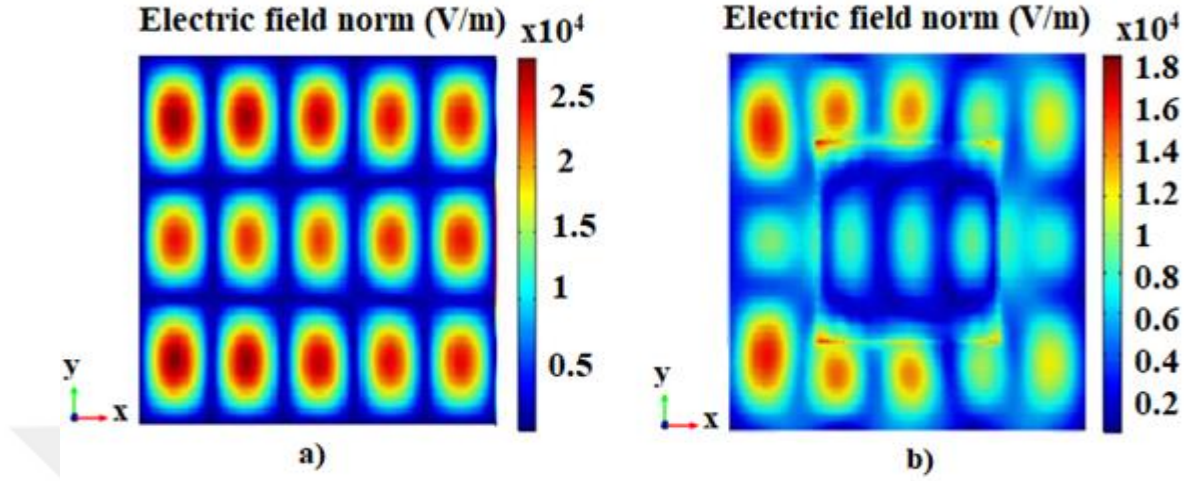


**Şekil 4.10.** Çalışma frekansı 2,40 GHz olduğu durumda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımı: a) Fırın boşken b) Fırın içerisinde malzeme varken



**Şekil 4.11.** Çalışma frekansı 2,45 GHz olduğu durumda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımı: a) Fırın boşken b) Fırın içerisinde malzeme varken





**Şekil 4.12.** Çalışma frekansı 2,50 GHz olduğu durumda malzeme üzerinde elektrik alan dağılımı: a) Fırın boşken b) Fırın içerisinde malzeme varken

**Çizelge 4.6.** Farklı çalışma frekanslarındaki absorbe edilen güç ve verim

Çalışma frekansı (GHz)	Absorbe edilen güç (W)	Sistem verimliliği (%)
2,40	380	42.3
2,45	416	46.5
2,50	384	43

Simulasyon çalışmalarından ve analiz edilmiş sonuçlardan çalışma frekansı değişimin sistemin performansın ve verimliliğini oldukça etkilediği görülmektedir. Bundan dolayı bir mikrodalga sistemi tasarlanırken çalışma frekansının dikkatle seçilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Dolayısıyla kullanılacak kaynağın bant genişliği de dikkate alınmalıdır.

#### 4.5 Malzeme Konumu

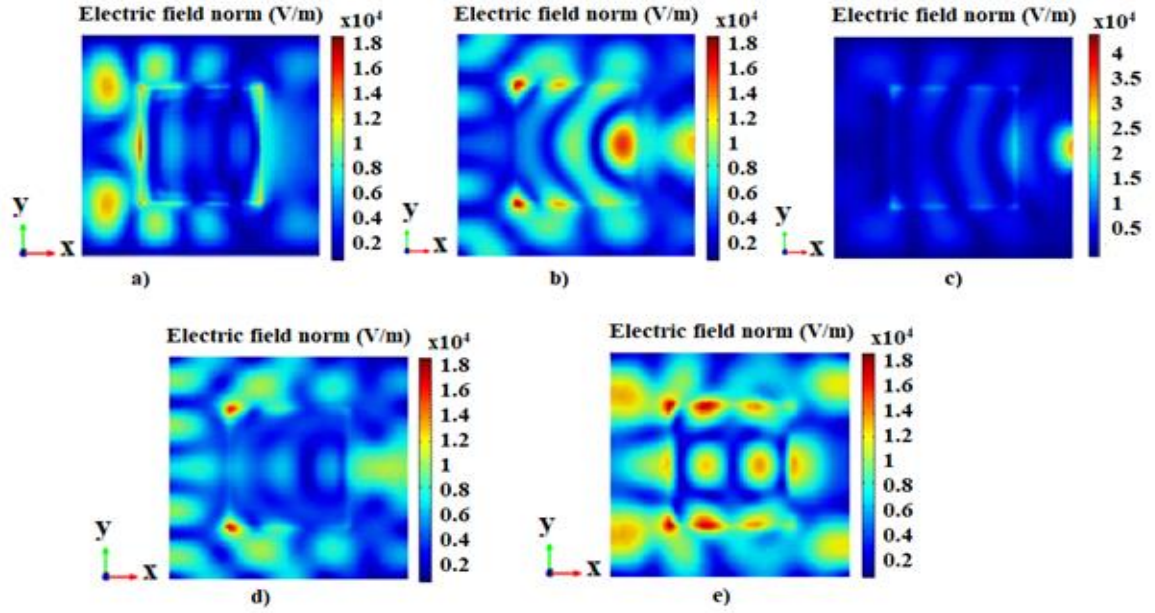
Mikrodalga ısıtma sisteminde ısıtılacak malzemenin fırın içerisindeki konumu malzeme üzerinde ve rezonatörde oluşan elektrik alan dağılımını etkilemektedir. Böylece mikrodalga performansı da etkilenmektedir. Bu çalışmada farklı örnek malzemelerle

yüklenmiş mikrodalga rezonatörü içerisindeki elektrik alan dağılımı ve verimi üzerine etkisi incelenmiştir.

#### **4.5.1 Malzeme konumunun verime ve performansa etkisi**

Bu tez çalışmada örnek 3 (59.99-j11.23) malzemesinin fırın içerisindeki konumu değiştirilerek sistem performansı ve verim üzerine etkisini incelenmiştir. Malzemenin boyutu 18 cm x 18 cm x 1 cm olacak şekilde 5 dakikalık ısıtma süresi ve 2.45 GHz çalışma frekansı ile simüle edilmiştir. Malzemelerin farklı konum değerleri için elektrik alan dağılımı simüle edilmiş ve sistemin verimliliği malzeme tarafından absorbe edilen güç ve giriş gücü yardımıyla hesaplanmıştır. Farklı malzeme konumları için kaynağın gücü 900 W ve başlangıç sıcaklığı 9°C'tir.

Şekil 4.13'de örnek 3 için beş farklı konum değerleri için simüle edilen elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Şekil 4.13a'de malzemeyi  $z = 20$  mm düzleminde konulduğunda bulunan elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 406 W'tir. Bundan hesaplanan verim ise % 45.1'dir. Şekil 4.13b'de malzeme  $z = 60$  mm'ye konulduğunda elde edilmiş elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Bu düzlemde malzeme tarafından absorbe edilen güç 426 W ve hesaplanan verim ise % 47 dir. Şekil 4.13c'de malzemeyi  $z = 100$  mm düzleminde konulduğunda bulunan elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 554 W'tir. Bundan hesaplanan verim ise % 62'dir. Şekil 4.13d'de malzemeyi  $z = 140$  mm düzleminde konulduğunda bulunan elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 494 W'tir. Bundan hesaplanan verim ise % 55'dir. Şekil 4.13e'de malzemeyi  $z = 180$  mm düzleminde konulduğunda bulunan elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç 742 W'tir. Bundan hesaplanan verim ise % 83'dir. Çizelge 4.7'de malzeme fırında beş farklı konum yerleştirildiğinde elde edilen absorbe güç ve verim değerleri gösterilmiştir.



**Şekil 4.13.** Elektrik alan dağılımı:  $\epsilon_r = 59.99 - j11.23$ ; a)  $z = 20$  mm b)  $z = 60$  mm c) 100 mm d) 140 mm e) 180 mm

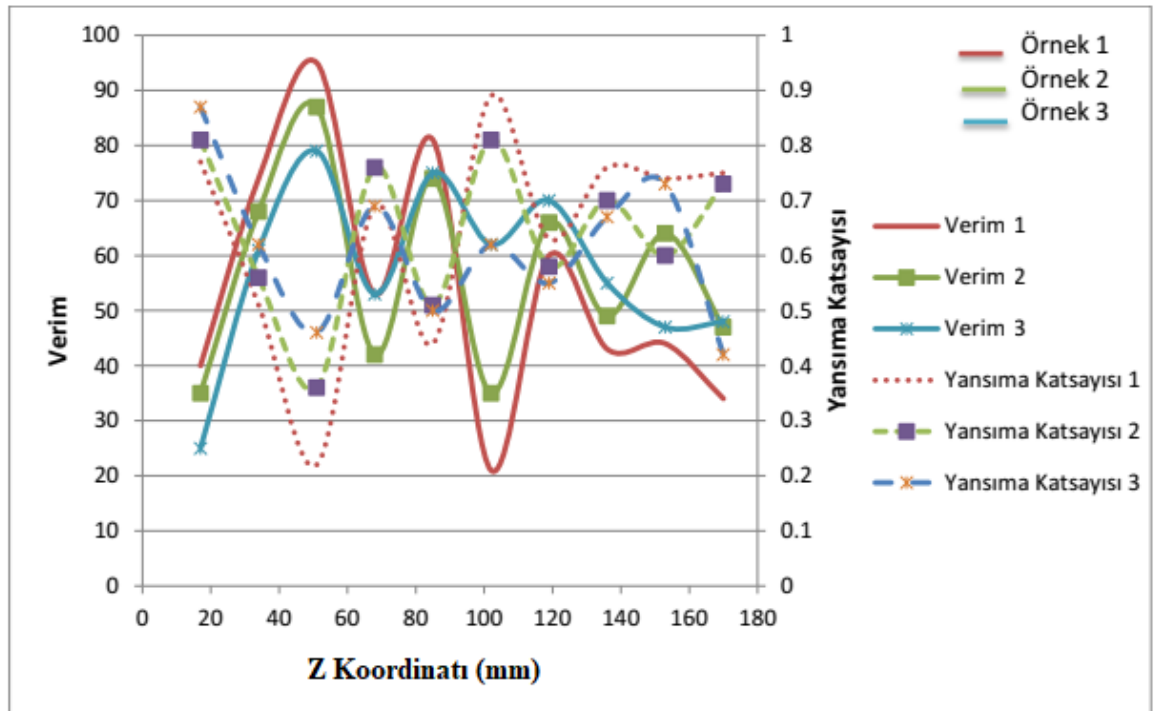
**Çizelge 4.7.** Farklı malzemenin fırındaki pozisyonlar için absorbe edilen güç ve verim

Malzeme konumu (z)	Absorbe edilen Güç (W)	Verim (%)
20 mm	315	35
60 mm	426	47
100 mm	554	62
140 mm	494	55
180 mm	742	83

Simulasyon çalışmalarından ve analiz edilmiş sonuçlardan malzemenin rezonatördeki konumunun değişimi, rezonatördeki elektrik alan dağılımını ve absorbe edilen gücünü oldukça etkilediğini göstermiştir. Konulacak malzemenin konumu az bile kayması işlenecek malzemenin performansı büyük miktarda etkilemektedir. Dolayısıyla mikrodalga fırın tasarımı yapılırken malzemenin rezonatördeki konumunun belirlenmesi gerekmektedir.

#### 4.5.2 Optimizasyon sonuçları

Çok modlu dikdörtgen bir rezonatörden oluşan mikrodalga fırın duvarları üzerinde ortalanmış bir dikdörtgen dalga kılavuzu tarafından beslenen bir mikrodalga sistemi için optimizasyon sonuçları elde edilmiştir. Isıtılacak malzeme olarak, üç farklı örnek seçilmiştir. Optimizasyon 5 dakika ısıtma süresi ve 2.45 GHz çalışma frekansı kullanılarak farklı dielektrik özelliklere sahip olan malzeme için rezonatörde en uygun konumun bulunması için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzemenin dielektrik özellikleri örnek 1, 2 ve 3 olarak çizelge 4.1'de listelenmiştir. Her bir malzeme mikrodalga fırının tabanından itibaren on(10) farklı pozisyona konularak simüle edilmiştir. Her bir örnek için, elektrik alan dağılımı simüle edilmiş ve sistem verimliliği, örnekler tarafında absorbe edilen gücü ve giriş gücü arasındaki ilişki ile hesaplanmıştır.

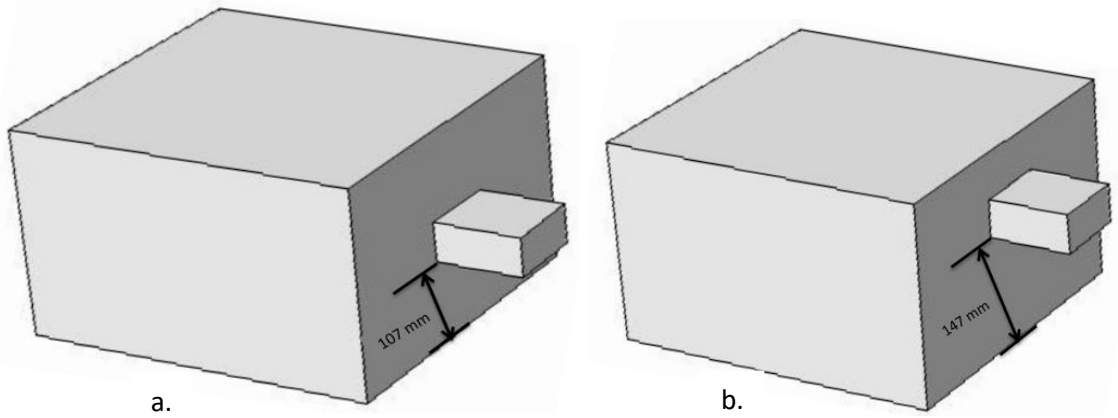


Şekil 4.14. Farklı çamur malzemeler için verim ve yansımaya katsayısı

Şekil 4.14, her bir malzeme için sistemin yansıma katsayısını ve güç verimliliğini göstermektedir. Şekilden malzemeler için maksimum verim sağlayan optimal pozisyonlar elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada, farklı dielektrik materyaller için optimal pozisyon, çok modlu rezonatörün tabanından itibaren 5 cm üzerinde olduğu bulunmuştur. Verimli bir mikrodalga tasarımı için dikkat edilmesi gereken diğer bir faktör ise yansıma katsayısıdır. Yansıma katsayısı sistem verimliliğinden hesaplanmıştır. Yansıma katsayısı maksimum olduğu durumda, magnetronun zarar görmesi neden olur ve sistem verimi azalır. Bu nedenle, yansıma katsayısını azaltacak önlemlerin alınmasıyla sistem ısıtma verimi en üst düzeye çıkarmak ve magnetronun ömrünü uzatmak mümkündür.

#### 4.6 Kaynağın Konumu

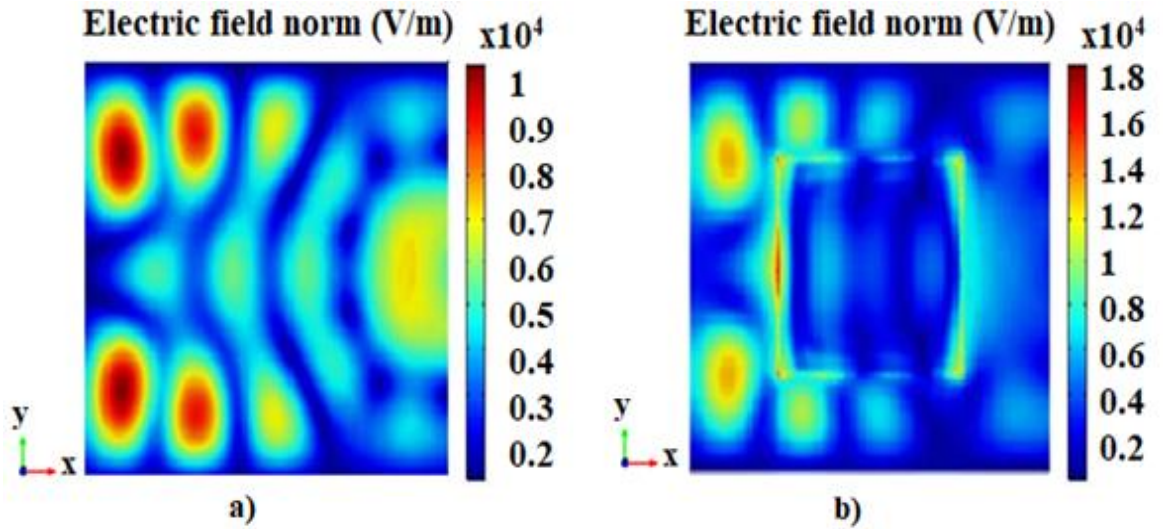
Mikrodalga ile ısıtılacak malzemenin performansını etkileyen faktörlerden biri de dalga kılavuzunun fırında üzerine konulacağı yerdir. Bu çalışmada dielektrik sabiti 59.99-j11.23 olan örnek 3 malzemenin uyarma kaynağının farklı düzlemlerine konulması durumunda 900 W giriş gücü verildiğinde etkisi incelenmiştir. Rezonatöründeki kaynağın konumu  $z = 107$  mm ve  $z = 147$  mm konulmuştur. Şekil 4.15'te rezonatörün yan tarafına konulmuş uyarma düzlemlerinin geometrisi gösterilmiştir. Her iki durumu için de simülasyon çalışmaları yapılmıştır.



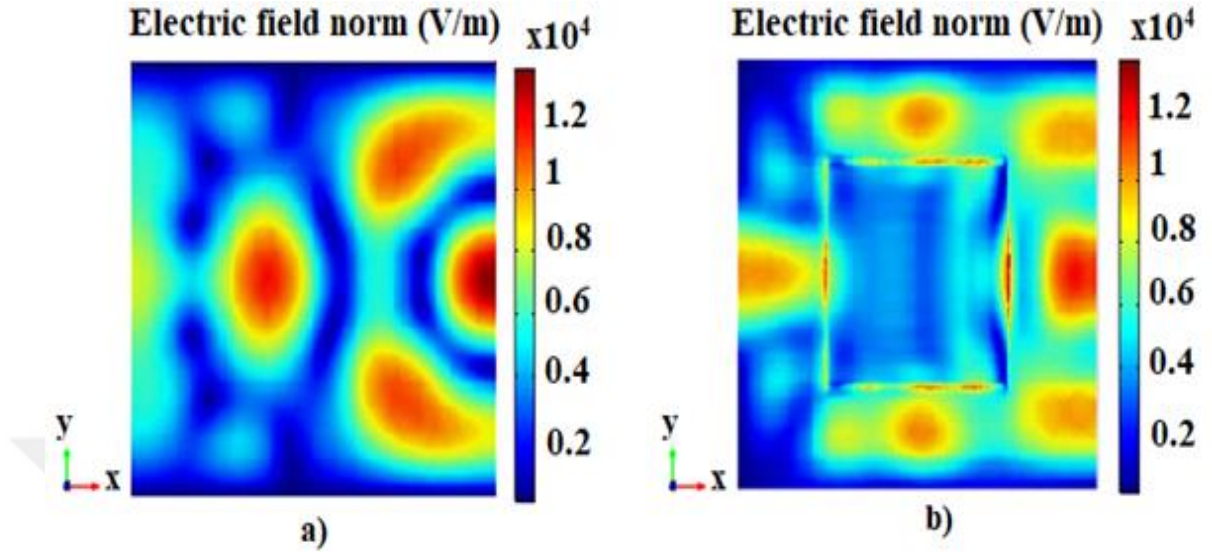
**Şekil 4.15.** Uyarma kaynağının rezonatör üzerindeki konumu: a)  $z = 107$ mm b)  $z = 147$ mm

Şekil 4.16'te mikrodalga ısıtma işlemi sırasında dalga kılavuzunun rezonatörün yan yüzeyinin orta noktasına yerleştirilmesi durumunda ( $z = 107$  mm) fırın boşken ve malzeme yüklü iken fırın içerisinde oluşan alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.16a'da fırın boşken elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Şekil 4.16b'de dalga kılavuzu  $z = 107$  mm düzleninin orta noktasına konulduğunda fırındaki ve malzemenin üzerindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Numune tarafından absorbe edilen güç  $406$  W'tir. Hesaplanan verim ise %  $45,1$ 'tir.

Şekil 4.17'de mikrodalga ısıtma işlemi sırasında dalga kılavuzunun rezonatörün yan yüzeyinde yerleştirilmesi durumunda ( $z = 147$  mm) fırın boşken ve malzeme yüklü iken fırın içerisinde duran alan dağılımını göstermektedir. Şekil 4.17a, dalga kılavuzu  $z = 147$  mm'ye yerleştiğinde, boş fırındaki elektrik alan dağılımını gösterilmiştir. Şekil 4.17b dalga kılavuzu  $z = 147$  mm'ye yerleştirdiğinde malzeme üzerine ve fırındaki elektrik alan dağılımını gösterilmiştir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç  $658$  W'tir. Hesaplanan verim ise %  $73,1$ 'tir. Çizelge 4.8'de ise dalga kılavuzunun yerleştirme durumlarının malzeme tarafından absorbe edilen güce ve sistem verimine etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 4.16.** Uyarma kaynağının konumunun  $z = 107$  cm iken elektrik alan dağılımına etkisi  
 $z = 3$ cm; a) fırın boşken b) malzeme varken



**Şekil 4.17.** Uyarma kaynağının konumunun  $z = 147$  cm iken elektrik alan dağılımına etkisi  $z = 3$ cm; a) fırın boşken b) malzeme varken

**Çizelge 4.8.** Uyarma kaynağı konumunun absorbe edilen güç ve sistem verimine etkisi

Kaynağın konumu $z$ (mm)	Absorbe edilen Güç (W)	Verim (%)
107	406	45.1
147	657	73.1

Bu çalışmada, şekil 4.16 ve 17’de ve çizilge 4.8’te görüldüğü gibi, kaynağın fırın üzerindeki yeri elektrik alan dağılımını ve absorbe edilen gücü etkilemektedir. Simülasyon sonuçları, dalga kılavuzunun konumu değişikçe elektrik alan dağılımının değiştirdiğini göstermektedir. Kaynağın yerinin değişmesi rezonatör içerisinde uyarılan mod sayısını etkileyip malzemenin ısınmasını etkilenmektedir. Mikrodalga fırın tasarım sürecinde kaynağın konumunu belirlemek önemlidir.

## 5. SONUÇ

Bu tezde endüstriyel amaçlı bir mikrodalga fırının tasarım ve optimizasyon adımları belirlenip analizleri yapılmıştır. Mikrodalga fırının tasarım modellemesi için COMSOL Multiphysics yazılımı programı kullanılmıştır.

Mikrodalga ısıtma sürecinde sistemin verimini ve performansını etkileyen faktörler incelenmiştir. Malzeme tarafından absorbe edilen güç kullanılarak performans ve verim hesaplanmıştır.

Mikrodalga ısıtmayı verimli bir hale getirebilmek için ilk olarak mikrodalga rezonatörü analiz edilip fırın boşken oluşabilecek maksimum mod sayısı ve rezonans frekansları hesaplanmıştır.

Dielektrik malzeme yüklü bir mikrodalga fırındaki elektrik alan dağılımı ve verimi etkileyen faktörlerden malzemenin dielektrik ve fiziksel özellikleri, malzemenin fırındaki yerleşim alanı, çalışma frekansı, giriş gücü ve kaynağını konumu incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzeme endüstriyel atık çamurudur. Mikrodalga rezonatördeki elektrik alan dağılımınının simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen simülasyon sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

İlk olarak ısıtılacak malzemenin fiziksel özellikleri incelenmiştir. Malzeme geometresi değiştirilerek fırın içindeki elektrik alan dağılımına ve sistem verimine etkileri incelenmiştir. Dikdörtgen ve silindirik geometrili örnek 1 (90-j4.25) malzemenin mikrodalga ısıtma performansına etkisi deneysel ve simülasyon olarak incelenmiştir. Dikdörtgen şekilli malzemenin daha yüksek verime sahip olduğu bulunmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda da malzemenin geometrisi değiştirildiğinde fırın içindeki ve malzemenin üzerindeki sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Beklendiği gibi, dikdörtgen şekilli malzemede yüksek elektrik alan büyüklüğü gösteren yerlerde yüksek sıcaklık elde edilmiştir.



İkinci olarak mikrodalga fırın içine yerleştirilmiş malzemenin dielektrik özelliklerinin ısıtma üzerine etkisi incelenmiştir. Mikrodalga fırın içindeki elektrik alan dağılımı içine yerleştirilen malzemenin dielektrik özelliklerinin bir fonksiyonu olarak değişecektir. Dielektrik özellikleri farklı iki malzeme (77.10-9.19 ve 59.99-j11.23) kullanılarak, dielektrik özelliklerin mikrodalga ısıtmasına olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlardan yüksek dielektrik kayba sahip olan malzemelerin veriminin ve performansının yüksek olduğu gözlenmiştir. Beklendiği gibi, malzeme tarafından absorbe edilen gücün malzemenin dielektrik kaybı ile ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca ısıtılacak malzeme üzerine ek dielektrik malzeme konularak rezonatördeki elektrik alan etkisini incelenmiştir. Isıtılacak dielektrik malzeme üzerine konulmuş malzeme kestamid olarak seçilmiştir. Kestamid ısıtılacak malzemenin üstüne yerleştirildikten sonra mikrodalga veriminin % 15 oranla yükseldiğini görülmüştür.

Üçüncü olarak mikrodalga gücünü değiştirerek ısıtma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Giriş gücü ne kadar yüksek ise ısıtılacak malzeme tarafından absorbe edilen güç o kadar yüksek olacaktır ve giriş gücü yüksek olursa malzeme hızlı şekilde ısıtılacaktır. Dolayısıyla giriş gücünün değişmesi mikrodalga ile işlenecek malzeme tarafından absorbe edilen gücün değişmesine neden olacaktır. Bu çalışmada 600 W ve 900 W giriş gücü kullanılmıştır. 600 W giriş gücü verildiğinde absorbe edilen güç, 900 W giriş gücü verildiğinde absorbe edilen güçten daha azdır, fakat sistem verimi değişmemiştir.

Dördüncü olarak malzemenin fırın içerisindeki yeri değiştirilerek performansa etkisi incelenmiştir. Örnek 3 malzemesi (59.99-j11.23) kullanılarak fırın içerisindeki konumu değiştirilerek elektrik alan dağılımını ve dolayısıyla malzeme tarafından absorbe edilen güç hesaplanmıştır. Dolayısıyla fırın tasarımı yaparken malzemenin konumuna dikkat edilmelidir. Ayrıca rezonatörün boyutlarını ve kaynağın konumunu sabit tutarak malzeme konumu ile mikrodalga fırının tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Farklı dielektrik özelliklere sahip olan üç malzeme (90-j4.25, 77.10-j9.19 ve 59.99-j11.23) kullanılarak maksimum verimin elde edildiği malzemenin konumu bulunmuştur. Malzemeler için mikrodalga fırının içerisinde elde edilen elektrik alan dağılımı, absorbe edilen güç ve

sistem verimi değerleri analizi yapılmıştır. Dolayısıyla rezonatörün tabandan 5 cm yükseklikte yüksek verim bulunmuştur.

Son olarak olarak mikrodalga fırının çalışma frekansının ısıtma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Frekansta küçük bir değişiklik, özellikle düşük kayıplı bir dielektrik ile yüklendiğinde rezonatör içindeki alan dağılımında büyük değişikliklere yol açabilmektedir. Çalışma frekansı 2.40 GHz, 2.45 GHz ve 2.5GHz olduğunda rezonatördeki elektrik alan dağılımı ve malzeme tarafından absorbe edilen güç miktarının değiştiği görölmüştür. Dolayısıyla, mikrodalga fırın tasarımı sırasında çalışma frekansında olabilecek kaymaların engellenmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Adamski, W., Kitlinski, M. 2001.** On measurements applied in scientific researches of microwave heating processes. *Measurement science review*, 1(1): 199-203.
- Anonim, 1993.** Industrial microwave heating applications, 1993. Electric Power Research institute, 4 (3): EPRI Center for Materials Fabrication, Palo Alto, California, USA.
- Banik, S., Bandyopadhyay, S., Ganguly, S. 2003.** Bioeffects of microwave- a brief review. *Bioresource Technol*, 87: 155-159.
- Cabrera, J. M., Morcillo, A. D., Molina, J. L. P., Hernandez, D. S. 2004.** A new method for load matching in multimode microwave heating applicators based on the use of dielectric layer superposition. *Microwave Opt Technol Lett*, 40: 318–322.
- Chan, T. V., & Reader, H. C. 2000.** Understanding Microwave Heating Cavities. Artech House, Boston, USA, 275pp.
- Chaum, Waraporn., Rattanadecho, Phadungsak., Pakdee, Watit. 2009.** Experimental analysis of microwave heating of dielectric materials using a rectangular wave guide (MODE: TE<sub>10</sub>) (Case study: Water layer and saturated porous medium), *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33: 472–481.
- Cheng, D. K. 1989.** Field and Wave Electromagnetics. Addison-Wesley, Boston, USA, 703pp.
- Datta, A., Prosetya, H., Hu, W. 1992.** Mathematical modeling of batch heating of liquids in a microwave cavity. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 27(1): 38–48.
- Dharmendra, S. R., Rahul, C. 2014.** Design of Multimode Microwave Cavity for Materials Processing. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), 12-14 December, 2014, Assam, India.
- Dharmendra, S. R., Rahul, C. 2016.** Design Optimization of Two Input Multimode Applicator for Efficient Microwave Heating. *International Journal of Advances in Microwave Technology (IJAMT)*, 1(3).
- Dibben, D. 2001.** Electromagnetics: Fundamental Aspects and Numerical Modeling. In: Handbook of Microwave Technology for Food Applications, Datta A.K. and Anantheswaran R.C. (Editors), Marcel Dekker, pp. 1-30, New York.
- Ekin, S. 2013.** Mikrodalga-fan destekli konveksiyon ısıtma ile kurutma. *Yüksek lisans tez*, pamukkale üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Pamukkale.
- Elsa, D.T., Cabrera, J. M., Morcillo, A. D. 2005.** Load matching in microwave heating applicators by means of genetic algorithm optimization of dielectric multilayer structures. *Microwave Opt Technol Lett*, 47: 426–430.
- Fuller, B. A. J. 1979.** Microwaves: An Introduction to Microwave Theory and Techniques. Pergamon Press, New York, USA, 326pp.
- Giguere, R. J., Bray, T. L., Duncan, S. M., Majetich, G. 1986.** Application of commercial microwave ovens to organic synthesis. *Tetrahedron Letters*, 27 (41): 4945–4948.
- Gonzalez, A. M., Cabrera, J. M., Escalante, J., Morcillo, A. D., Hernandez, D. S. 2004.** load matching in multimode microwave heating applicators based on the use of

dielectric layer moulding with commercial materials. *Microwave and optical technology letters*, 41(5).

**Gölcü, M., Şen, F. 2014.** Mikrodalga ile ıslak viyolün kurutulabilirliğinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4):111-115.

**Heddleson, R. A., Doores, S. 1993.** Factors Affecting Microwave Heating of Foods and Microwave Induced Destruction of Foodborne Pathogens. *J Food Protect*, 57 (11): 1025-1037.

**Hernandez, D. S., Gonzalez, P. P., Cabrera, J. M., Civera, J. M. C. 2005.** Effect of Mode-Stirrer Configurations on Dielectric Heating Performance in Multimode Microwave Applicators. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 53(5), .

**Hill, D.A. 2009.** Electromagnetic fields in cavities: Deterministic and Statistical Theories. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 300pp.

**Hong, J.Y., Wu T. Y., Wu, L., Liao, Y., Zhu, H., Yang Y., Huang, K. 2017.** Model Stirrer Based on a Multi-Material Turntable for Microwave Processing Materials. *Materials*, 10(2), 95.

**Idris A. A. 2016.** Effect of load on the heating efficiency and temperature uniformity in multi-mode cavity applicators. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 50(2): 123-137.

**Klinbun, W., Rattanadecho, P., Pakdee, W. 2011.** Microwave heating of saturated packed bed using a rectangular waveguide (TE<sub>10</sub> mode): Influence of particle size, sample dimension, frequency, and placement inside the guide, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 1763–1774

**Konak, Ü.İ., Certel, M., Helhel, S. 2009.** Applications of Microwaves in the Food Industry. *Electronic Journal of Food Technologies*, 4(3): 20-31

**Lin, B.Q., Hong, Y.d., Li, H., Dai, H. M., Zhu, C.J., Yao, H. 2016.** Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters. *Applied Thermal Engineering*, 93: 1145–1154

**Metaxas, A. C. 1991.** Microwave Heating. *IEE Power Engineering Journal*, 5(5): 12pp.

**Metaxas, A. C., Meredith, R. J. 1983.** Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd, London, 378pp.

**Mehrdad, M. 2009.** Microwave/RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing and Plasma Generation: A Guide. William Andrew, Elsevier Inc., Norwich, USA, 394pp.

**Meredith, R.J. 1998.** Engineers handbook of industrial microwave heating. The Institute of Electrical Engineers, London, UK, 363pp.

**Molina, J.L. P., Cabrera, J. M., Pinzolas, M. 2007a.** A new procedure for power efficiency optimization in microwave ovens based on thermographic measurements and load location search. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34: 564–569.

**Molina, J.L. P., Cabrera, J. M., Pinzolas., Civera, J. M. C. 2007b.** Sample movement optimization for uniform heating in microwave heating ovens. *Journal International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 17(2): 142–152.

**Narumitbowonkul, U., Keangin, P., Rattanadecho, P. 2015.** Numerical and Experimental Analysis of Temperature Distribution and Electric Field in a Natural Rubber

Glove during Microwave Heating, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 9(3):

**Pedreno, M. J. L., Cabrera, M. J., Pinzolas, M., Perez, R. M. E. 2005.** A new predictive neural architecture for modelling electric field patterns in microwave-heating processes, *Int. J. Materials and Product Technology*, 0(0/0): 0000-000.

**Perez, M. E. R., Molina, J. L. P., Cabrera, J. M., Morcillo, A. D. 2005.** Multimode Cavity Efficiency Optimization by Optimum Load Location-Experimental Approach. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 53(6), 2114 – 2120pp.

**Pitarch, J., Canos, A.J., Foix, F.L. P., Civera, J. M. C., Balbastre, J. V. 2003.** Synthesis of uniform electric-field distributions in microwave multimode applicators by multifeed techniques. 9th Int Conf Microwave and High-Frequency Heating, Loughborough, U.K., 2003, pp. 221–224

**Prado, M. P., Perez, M. E. R., Molina, J.L. P., Cabrera, J. M., Morcillo, A. D., Hernandez, D. S. 2004.** Load matching in multimode microwave-heating applicators by load location optimization. 34th European Microwave Conference, 12-14 October, 2004, Amsterdam, The Netherlands.

**Pozar, D. M. 2005.** Microwave Engineering. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 700pp.

**Schiffmann, R. F. 1986.** Food product development for microwave processing. *Food Technology*, 40(6): 94-98.

**Tijana, R., Jugoslav, J., Bratislav, M. 2005.** Modelling of Microwave Applicators with an Excitation through the Waveguide Using TLM Method. *Serbian Journal Of Electrical Engineerin*, 2 (2): 137-146.

**Toraman, Ö. Y., Depçi, T. 2007.** Kömürde mikrodalga ile önışlem uygulamaları. *Madencilik*, 46(3): 43-53.

**Zhao, X; Yan, L; Huang, K. 2011.** Review of Numerical Simulation of Microwave Heating Process. In: Grundas, S Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. InTech.

**Zhao, H; Turner, I. W. 1996.** An analysis of the finite-difference time-domain method for modelling the microwave heating of dielectric materials within a three-dimensional cavity system. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 31 (4): 199-214.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sofiya Ali MEKONNEN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Dessie, Etiyopya/ 23.12.1987  
Yabancı Dili : İngilizce, Habeşçe

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Memhir Akalewold Higher Education  
Preparatory School (2003-2007)  
Lisans : Adama Science And Technology Üniversitesi  
(2007-2010)  
Yüksek Lisans : Jimma Üniversitesi (2013- )  
: Uludağ Üniversitesi (2014- )

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : JIMMA ÜNİVERSİTESİ / 18.10.2010-19.09.2014

İletişim (e-posta) : sofia.ali654@yahoo.com ve 6alisofia@gmail.com

Yayımları :

**Mekonnen, S. A., Yenikaya, S., Yenikaya, G., Yılmaz, G. 2018.** Effects of Dielectric Properties of the Material located inside Multimode Applicator on Microwave Heating Efficiency. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 3 (3), 61-66.

**Mekonnen, S. A., Yenikaya, S., Yenikaya, G. 2018.** Numerical and Experimental Analysis of the Heating Performance of A Microwave Applicator Loaded with Sludge Material. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*, (Kabul edilmiş)

**Mekonnen, S. A., Yenikaya, S., Yenikaya, G., Yılmaz, G. 2017.** Effects of sample's dielectric property on the performance of microwave heating. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 30 kasım – 2 Aralık 2017, 1440 - 1443 ,Bursa, Turkey.