

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL MİKRODALGA KAYNAKLARA MARUZ KALAN
DOKULARA İNDÜKLENEN ELEKTROMANYETİK ALANIN VE SICAKLIK
ARTIŞININ ÇÖZÜMLENMESİ**

Tuğrul AYDOĞMUŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2016

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL MİKRODALGA KAYNAKLARA MARUZ KALAN
DOKULARA İNDÜKLENEN ELEKTROMANYETİK ALANIN VE SICAKLIK
ARTIŞININ ÇÖZÜMLENMESİ**

Tuğrul AYDOĞMUŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 15/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman) Akdeniz Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi	
Prof. Dr. Mustafa MERDAN Süleyman Demirel Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi	
Yrd. Doç. Dr. Cumhur BAŞARAN Akdeniz Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi	

ÖZET

ENDÜSTRİYEL MİKRODALGA KAYNAKLARA MARUZ KALAN DOKULARA İNDÜKLENEN ELEKTROMANYETİK ALANIN VE SICAKLIK ARTIŞININ ÇÖZÜMLENMESİ

Tuğrul AYDOĞMUŞ

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Müh. Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Şükrü ÖZEN
(Haziran 2016, 48 sayfa)

Son yıllarda uydu yayın sistemleri, mikrodalga fırınlar, indüksiyon fırınları, polis ve ordu radar sistemleri, tıbbi görüntüleme gibi cihazların kullanımının hızlı bir şekilde artmasıyla insanlar sürekli elektromanyetik dalgalara maruz kalmaktadır. Özellikle endüstride kullanılan yüksek güçlü mikrodalga kaynakları insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır. İndüksiyon fırını ve buna benzer cihazların gerek hatalı kullanımı gerekse cihazlarda meydana gelen kaçaklar nedeniyle cihazı kullanan kişinin beyinde, gözünde ve deri dokusunda ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel mikrodalga kaynaklarının çalışma frekansları olan 915, 1800, 2100 ve 2450 MHz frekanslarında dokularda oluşan SAR değeri ve sıcaklık artışı, çok katmanlı doku modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Analitik ve nümerik analizler, CST Microwave Studio ve MATLAB programları yardımıyla ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, güvenlik limit değerleriyle karşılaştırılmış ve limitlerin altında olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Mikrodalga maruziyeti, SAR, Penne biyoyısı denklemi, çok katmanlı doku modeli, analitik çözüm, FDTD, sıcaklık artışı

JÜRİ: Doç. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)
Prof. Dr. Mustafa MERDAN
Yrd. Doç. Dr. Cumhur BAŞARAN

ABSTRACT

ANALYSIS OF TEMPERATURE RISING AND INDUCED ELECTROMAGNETIC FIELD ON TISSUES EXPOSED TO INDUSTRIAL MICROWAVE SOURCES

Tuğrul AYDOĞMUŞ

M.Sc. Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Şükrü ÖZEN

(June 2016, 48 pages)

In recent years, people are often exposed to electromagnetic waves because of increasing of using devices such as satellite broadcasting systems, microwave ovens, induction ovens, police and army radar systems and medical imaging. Particularly, the microwave sources which used in industry have extremely effects on human health. Because of inaccurate using of devices such as induction ovens etc. or leakage from from devices, serious damages can be occurred in the brain, eye and skin tissue of the person who uses the device. In this study, at the frequencies of 915, 1800, 2100, 2450 MHz which are operating frequencies of industrial microwave sources, the SAR value and temperature rising in the tissues was computed by using multi layered tissue model. Analytical and numerical analysis were made by using of CST Microwave Studio and MATLAB programs. The results were compared with safety limit values and observed that they are under the safety limits.

KEYWORDS: Microwave exposure, SAR, Penne's bioheat equation, multilayered human tissue, analytical solution, FDTD, temperature rising

COMMITTEE: Assoc. Prof. Şükrü ÖZEN (Supervisor)

Prof. Mustafa MERDAN

Ass. Prof. Cumhur BAŞARAN

ÖNSÖZ

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, mikrodalga maruziyetine karşı korunma amacıyla üretilecek olan kıyafet vb. ürünlerin tasarımı ve üretimi konularında çalışan araştırmacılara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın her aşamasında destek veren ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Şükrü ÖZEN' e, verdiği moral ve motivasyon için Araş. Gör. Mehmet ÇAKIR' a ve bana olan inancını hiçbir zaman yitirmemiş olan çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ	viii
GRAFİKLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Mikrodalgaların Kullanım Alanları.....	2
1.2. Mikrodalgaların Endüstriyel Uygulamaları.....	3
1.3. Mikrodalga Maruziyetinin Biyolojik Etkileri.....	4
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	5
2.1. Elektromanyetik Dalgalar.....	5
2.1.1. Enine elektrik (TE) modu.....	5
2.1.2. Enine manyetik (TM) modu.....	5
2.1.3. Enine elektromanyetik (TEM) modu	5
2.2. Maxwell Denklemleri.....	5
2.2.1. Gauss yasası	5
2.2.2. Manyetizma için gauss yasası	6
2.2.3. Faraday yasası	6
2.2.4. Amper yasası.....	6
2.3. Dalga Denklemi.....	6
2.4. Poynting Teoremi	7
2.5. Düzlem Dalgalar.....	7
2.5.1. Kayıplı ortamda düzlem dalgaların sınıra dik gelişi	8
2.5.2. Düzlem dalgaların çok katmanlı dokudaki davranışı.....	10
2.6. Penetrasyon (Nüfuz) Derinliği	11
2.7. Özgül Soğurulma Oranı (SAR)	11
2.8. Kaynak Taraması.....	13
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Penne Biyoyısı Denklemi ve SAR Analitik Çözümleri	17

4. BULGULAR.....	20
4.1. Düzlemsel Katmanlı Doku Modeli Çözümlenmeleri.....	20
4.1.1. Elektrik alan ve özgül soğurulma oranı (SAR).....	20
4.1.2. Sıcaklık değişimi analizleri (T °C).....	29
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	38
6. KAYNAKLAR	39
7. EKLER.....	42
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

μ	Manyetik Geçirgenlik
B	Manyetik Alan Şiddeti
C	Dokunun Öz Isısı
c_b	Kanın Öz Isısı
D	Elektrik Alan Şiddeti
ϵ	Dielektrik Sabit
E	Elektrik Alan
H	Manyetik Alan
J	Akım Yoğunluğu
K	Dokunun Termal İletkenliği
Q_m	Metabolizmanın Ürettiği Isı
Q_r	Spatial Kaynaktan Gelen Isı
T	Doku Sıcaklığı
T_a	Atardamar Sıcaklığı
α	Zayıflama Sabiti
β	Faz Sabiti
γ	Yayıma Sabiti
δ	Nüfuz Derinliği
η	Ortam Empedansı
ρ	Doku Yoğunluğu
ρ_b	Kanın Yoğunluğu
σ	Elektrik İletkenlik Sabiti
ω_b	Kan Perfüzyon Oranı

Kısaltmalar

ANSI	American National Standards Institute
ICNIRP	The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
SAR	Specific Absorption Rate

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Frekans spektrumu	1
Şekil 1.2. Modüler bantlı endüstriyel mikrodalga fırın.....	3
Şekil 2.1. Düzlem dalga gösterimi	7
Şekil 2.2. Düzlem dalganın yüzeye dik gelişi	8
Şekil 2.3. Düzlem dalganın çok katmanlı yapıdaki ilerleyişi.....	10
Şekil 3.1. Endüstriyel mikrodalga kaynağında sızıntı durumu	15
Şekil 3.2. Çok katmanlı doku modeli.....	15
Şekil 3.3. Çok katmanlı dokunun ve düzlem dalganın CST ortamındaki modellenmesi	16
Şekil 4.1. CST verilerine göre frekansa bağlı SAR değişimi a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz (t=1500 sn. ve P=10 W/m ²).....	20
Şekil 4.2. CST verilerine göre dokuda oluşan sıcaklık artışı (t=1500 sn. ve P=10 W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz.....	30

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. ICNIRP SAR limit değerleri.....	12
Tablo 2.2. ICNIRP elektrik ve manyetik alanlar limit değerleri.....	13
Tablo 3.1. Doku kalınlıkları (mm).....	16
Tablo 3.2. Dokuların termal özellikleri.....	16
Tablo 3.3. Dokuların dielektriksel özellikleri.....	17

GRAFİKLER DİZİNİ

Grafik 4.1. CST verilerine göre elektrik alanın doku içerisindeki değişimi ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz.....	22
Grafik 4.2. Analitik çözümlere göre elektrik alanın doku içerisindeki değişimi ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz.....	24
Grafik 4.3. CST verilerine göre doku içerisindeki SAR değişimi ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz	26
Grafik 4.4. Analitik çözümlere göre doku içerisindeki SAR değişimi ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz.....	28
Grafik 4.5. CST ve analitik çözümlerden elde edilen SAR _{max} değerleri	29
Grafik 4.6. CST verilerine göre doku içindeki sıcaklık artışı ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz.....	32
Grafik 4.7. Analitik çözümlere göre doku içindeki sıcaklık artışı ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m ²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz	34
Grafik 4.8. Sıcaklık artışının zamana bağlı değişimi a) $x=1$ mm'de b) $x=6$ mm'de c) $x=21$ mm'de	36
Grafik 4.9. CST ve analitik çözümlerden elde edilen sıcaklık artış değerleri.....	36

Mikrodalgaların üretilmesi ve yükseltilmesi için, özel amaçlara göre düzenlenmiş aygıtlara gereksinim vardır. Radyo dalgalarında olduğu gibi, burada da aygıtlar değişik bir elektrik akımı üretirler. Değişimin frekansı, istenen ışının frekansı ile aynıdır. Yüksek güçlü mikrodalga kaynakları, termoyonik valflerden geliştirilmiştir. 1910 yılından sonra haberleşme endüstrisinin yaygınlaşması, güçlü radyo vericilerinin yapımını zorunlu kılmış ve bu alanda yapılan çalışmalar sonucunda magnetron, klistron, hareketli dalga tüpü gibi termoyonik valfler geliştirilmiştir. Magnetronun tek başına bir megavattan daha büyük güçte sinyaller verebilen bir osilatör olmasına karşılık, klistron ve hareketli dalga tüpü yükseltici aygıtlardır. Birkaç kilovat gücünde çıkış verebilirler. Çok düşük güçlü mikrodalgalar elde etmek için ya küçük güçte klistronlar (yansıtmalı klistron) ya da mazerler kullanılır. Ayrıca, katı yapıli devrelerle de düşük güçlü mikrodalgalar oluşturulabilir. Bu düzeneklerin çalışma ilkesi Gunn olayına dayanır.

Bütün mikrodalga enerji kaynaklarının düzenlenmesinde ve yapımında, dalganın elektrik ve manyetik özelliklerine göre değişen çok özel devre tekniklerinin kullanılması gerekir. Klasik elektrik devrelerinde kullanılan bobin, kondansatör ve direnç gibi devre elemanları, mikrodalga frekansında titreşen akımlar geçtiği zaman temel elektrik özelliklerini koruyamazlar. Bu nedenle, mikrodalgalar için özel devrelerin yapılması zorunludur. Mikrodalga devreleri ile öteki devreler arasındaki en önemli fark, mikrodalga devrelerinde sinyallerin, bileşenler arasında dalga kılavuzlarıyla taşınmasıdır. Genellikle boru biçiminde olan dalga kılavuzları, elektrik iletkenliği çok yüksek olan metallere yapılır. İndüktans ya da sığa etkisi yaratma amacıyla dalga kılavuzlarının içine küçük çubuklar ya da çıkıntılar yerleştirilir. Bunların fiziksel boyutları ve dalga kılavuzları içinden geçen alan yapısına göre konumları, yaratacakları etkileri belirler. Mikrodalga antenleri, parabol biçimli yansıtma yüzeyi içerdiklerinden öteki antenlerden farklıdır. Dalga kılavuzlarıyla yansıtma yüzeyinin ortasına kadar getirilen sinyal, yönlendirilmiş bir ışınım demeti olarak yayınlanır.

1.1. Mikrodalgaların Kullanım Alanları

Radar sistemlerinin geliştirilmesi, mikrodalgaların çok farklı alanlarda kullanılmasına yol açmıştır. İkinci Dünya savaşından bu yana, hedeften yansıyıp gelen sinyal aracılığıyla cismin varlığını saptama ilkesi geliştirilmiş ve çok yüksek hızlarla hareket eden hedeflerin konumlarının, hızlarının ve biçimlerinin saptanabileceği hale getirilmiştir. Mikrodalga radarıyla ise 2 km uzaktan bir sineği bile algılamak olanaklıdır. Modern radarlar her tür hedefin gözlenmesinde kullanılabilir. Günümüzde dünyanın önemli limanları ve havaalanları, mikrodalga radarlarıyla donatılmıştır. Böylece, uzaktaki veya yakındaki hava ve deniz trafiği denetlenebilmektedir. Uçakların çoğunda bulunan mikrodalga radarları, yön seçme işlemlerinde ve kötü hava koşullarının saptanmasında kullanılır. Meteoroloji olaylarının konumlarının saptanması açısından da mikrodalga teknolojisi büyük yenilikler getirmiş, böylece yeni bir bilim dalı (radyo meteoroloji) gelişmiştir.

Dünyadaki haberleşme gereksiniminin hızla artması, kablolu ya da klasik radyo dalgalı haberleşme sistemlerine büyük yükler bindirmektedir. Bu amaçla geliştirilen mikrodalga yöntemleri, radyo istasyonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Daha yeni bir gelişme de, kıtalararası haberleşmelerde mikrodalgayla çalışan uydu istasyonlarıdır. Hareketli araçlara kolayca takılabilen mikrodalga sistemler, uzay araştırmalarında da kullanılmaktadır.

Mikrodalgalardan otomatik denetimde de yararlanır. Haberleşme ve radar tekniklerinin birleştirilmesi sonucu, kara taşıtları, uçaklar, vb. hareketli araçlar otomatik denetimle yönetilmektedir. Radyo altimetresinde (yüksekti ölçer) yükseklik ölçümü yerden geri yansıyan mikrodalgalarla yapılmaktadır. Kadastro ölçümlerinde, uzaklıkların duyarlı biçimde saptanmasında tellürometreler kullanılır. Laboratuvar çalışmalarındaysa, organik ve anorganik maddelerin fiziksel ve elektriksel özellikleri, genellikle mikrodalga teknikleriyle ölçülmektedir.

Mikrodalgaların günlük hayatta en çok kullanıldığı alanlardan birisi ise pişirme işlemidir. Organik maddelerin bu frekanstaki enerjiyi büyük ölçüde soğurması ilkesinden yararlanılarak yapılan fırın ve ocaklar, pişme süresini birkaç saniye ya da dakikaya indirir. Öteki ocaklardan çok üstün olan mikrodalga ocaklarında 2.45 GHz' de 500-1000 W' lık bir güç oluşturan magnetron tüp kullanılır. Dalga kılavuzuyla taşınan ışınımın aynı frekansla titreşecek olan bir ortam içine gönderilmesiyle, düzgün bir enerji dağılımı sağlanır.

1.2. Mikrodalgaların Endüstriyel Uygulamaları

Mikrodalgalar, gıda bilimi ve teknolojisinde son 50 yılın en önemli buluşlarından biri olarak değerlendirilmektedir. İlk kez 1950'li yıllarda patates cipsinin kurutulması amacıyla kullanılmıştır. Yüksek verimli ve diğer geleneksel yöntemlerden hızlı olması sebebiyle her geçen yıl kullanımı daha da yaygınlaşan mikrodalgalar, günümüzde marna, patates, balık, et, süt ve süt ürünleri gibi gıdaların pişirilmesi, haşlanması, pastörize edilmesi ve kurutulması gibi işlemlerde doğrudan kullanılmaktadır. Şekil 1.2'de örnek bir endüstriyel mikrodalga fırın gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Modüler bantlı endüstriyel mikrodalga fırın

1.3. Mikrodalga Maruziyetinin Biyolojik Etkileri

Mikrodalga maruziyeti ve bunun biyolojik etkileri üzerinde yapılmış birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Mikrodalga etkileşim mekanizması şu şekilde tanımlanmıştır; organlarda ya da vücutta 1°C den fazla sıcaklık artışına sebep olma durumu (yani termal etki) ve vücutta net bir sıcaklık artışına sebep olmama durumu (yani termal olmayan etki).

Yapılan çalışmalar sonucunda rapor edilen termal etkilerden bazıları şu şekildedir.

- Katarakt oluşumu
- Cenin anormallikleri
- Tiroit fonksiyonlarında azalma
- Reflekslerde azalma

Termal olmayan seviyelerde (<0,5°C) ise;

- Tiroit uyarımı,
- Bakteri fonksiyonlarına duyarlılıkta artış
- Beyaz kan hücrelerinde azalma gibi biyolojik etkiler gözlemlenmiştir. (Nageswari 2003)

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

2.1. Elektromanyetik Dalgalar

Yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucu oluşan ve birbirlerine dik elektrik alan, manyetik alan ve yayılım yönü olan, her ortamda yayılabilen, boşluktaki yayılma hızları ışık hızına eşit olan enine dalgalara elektromanyetik dalgalar adı verilir. Elektromanyetik dalgalar, yayılma (propagasyon) şekillerine göre üçe ayrılırlar.

2.1.1. Enine elektrik (TE) modu

Elektromanyetik dalganın, dalga kılavuzunun ekseni boyunca yayıldığı düşünülürse, TE modunda elektrik alan, kılavuz eksenine dik doğrultuda olup eksen boyunca herhangi bir elektrik alan bileşeni yoktur. Manyetik alanın hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik bileşenleri vardır.

2.1.2. Enine manyetik (TM) modu

TM modunda manyetik alanın kılavuz eksenine doğrultusunda bileşeni yoktur. Buna karşılık elektrik alanın hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik bileşenleri vardır.

2.1.3. Enine elektromanyetik (TEM) modu

TEM modunda elektrik ve manyetik alanların kılavuz eksenine boyunca yani yayılma yönünde bileşenleri yoktur. Dalga kılavuzlarında TEM dalgaları kılavuzlanamazlar.

2.2. Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik dalgalarla alakalı yük, akım, elektrik ve manyetik alanların arasındaki ilişki ve çeşitlilik Maxwell Denklemleri olarak isimlendirilen kurallarca tanımlanmıştır. Bu denklemler, birçok araştırmacı tarafından uzun yıllar süren araştırmalar sonucu elde edilmiş ve son halleri fizikçi ve matematikçi olan İskoç bilim adamı James Clerk Maxwell tarafından verilmiştir. Maxwell denklemleri diferansiyel ve integral formlarında yazılabilir. Bu denklemler aşağıda ifade edilmektedir.

2.2.1. Gauss yasası

Kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akısının, bu yüzey tarafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan toplam net yüklerle orantılı olduğunu ifade eder.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \rho \cdot dV \quad (2.1)$$

2.2.2. Manyetizma için gauss yasası

Kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akısının sıfır olduğunu ve dolayısıyla manyetik yüklerin var olmadığını belirtir.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2.2)$$

2.2.3. Faraday yasası

Bir kapalı eğri içinden geçen manyetik akı değişiminin bir gerilim indüklediğini belirtilir. Elektro motor kuvveti (e.m.k) olarak da ifade edilebilir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{M}, \quad \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.3)$$

2.2.4. Amper yasası

Manyetik alanın oluşabilmesi için elektrik akımının (gerçek Ampere Yasası) veya elektrik alanının zamanla değiştirilmesinin (Maxwell düzeltmesi) gerektiğini ifade eder.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad \oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.4)$$

2.3. Dalga Denklemi

Elektromanyetik dalga denklemi, dalgaların ortam boyunca veya bir vakum ortamı içerisinde yayılmasını açıklayan, ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemdir. Faraday ve amper yasalarının birleştirilmesi sonucu elde edilmiştir denklemdir. Dalga denklemi (elektrik ve manyetik alan için) en basit ifadeyle şu şekildedir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Ayrıca zamanla harmonik değişim gösteren elektromanyetik dalgalarla uyarılmış ortamlardaki alan dağılımını modellemek için Helmholtz denklemi kullanılır. Bu denklem indirgenmiş dalga denklemi olarak da bilinir. Helmholtz denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\nabla^2 u(x) + k^2(x)u(x) = 0, \quad x \in R^n \quad (2.7)$$

Burada $k(x)$ ortamın dalga sayısı, $u(x)$ dalga davranışını gösteren fonksiyondur.

2.4. Poynting Teoremi

Işıyan bir elektromanyetik dalgaya ilişkin güç ifadesi anlık *Poynting Vektörü* (\mathbf{P}) ile tanımlanır.

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.8)$$

Poynting vektörü bir güç yoğunluğunu temsil eder. Bu nedenle kapalı bir yüzeyden çıkan toplam güç (W), Poynting vektörünün normal bileşeninin bu yüzey üzerindeki integraliyle hesaplanır.

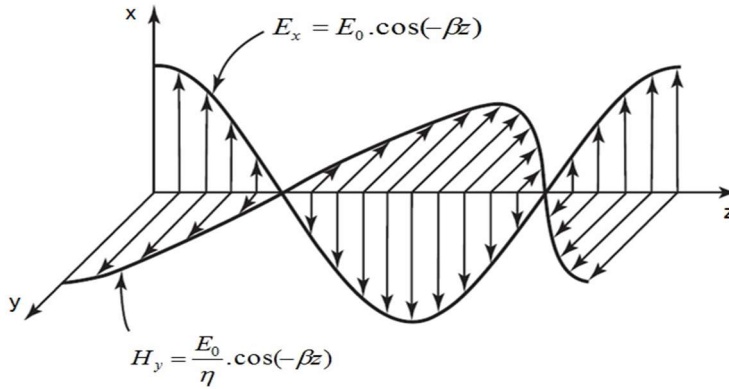
$$\mathbf{P}(t) = \oint_S \mathbf{S}(t) \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \vec{\mathbf{S}} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{a} \quad (W) \quad (2.9)$$

Elektromanyetik enerji iletimini ifade edebilmek için birim yüzeyden birim zamanda iletilen enerjiyi simgeleyen S niceliği kullanılır. Elektromanyetik dalganın en önemli özelliklerinden biri de enerji taşıyabilmesidir. Ortalama güç yoğunluğu ifadesi şöyledir.

$$\mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.10)$$

2.5. Düzlem Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alandan oluşur. Eğer bu iki alan, içinde bulunduğu ortamda hem birbirine hem de yayılma doğrultusuna daima dik hareket ediyorsa, bu elektromanyetik dalgaya düzlem elektromanyetik dalga denir. Düzlem dalganın gösterimi Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Düzlem dalga gösterimi

2.5.1. Kayıplı ortamda düzlem dalgaların sınıra dik gelişi

Düzlem dalganın bir ortama dik gelmesi durumu Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Kayıplı bir ortamda hareket eden düzlem dalganın genliği, ortamların dielektrik parametrelerine bağlı olarak değişmektedir.

Kayıplı ortamda yayılma sabiti,

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\epsilon\mu}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

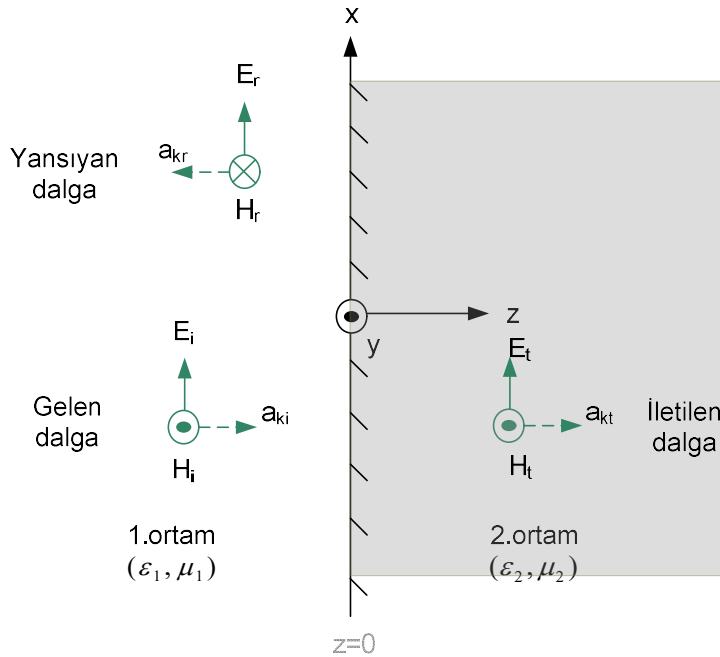
şeklinde ifade edilir. Burada α [Np/m] zayıflama sabiti, β [rad/m] ise faz sabitidir.

Ortam empedansı şu formülle hesaplanır.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.12)$$

Havada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ve $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ olduğuna göre havanın (boşluğun) empedansı şu şekilde ifade edilebilir.

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \quad (2.13)$$



Şekil 2.2. Düzlem dalganın yüzeye dik gelişi

$z=0$ 'daki ortam süreksizliğinden dolayı gelen dalganın bir kısmı 1. ortama geri yansıtılacak bir kısmı da 2. ortama iletilecektir.

Gelen dalganın elektrik ve manyetik alan şiddeti fazör gösterimleri şu şekildedir.

$$\mathbf{E}_i(z) = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot E_0 \cdot e^{-\alpha_1 z} \cdot e^{-\beta_1 z} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{H}_i(z) = \hat{\mathbf{a}}_y \cdot \frac{E_0}{\eta_1} \cdot e^{-\alpha_1 z} \cdot e^{-\beta_1 z} \quad (2.15)$$

Yansıyan dalganın elektrik ve manyetik alan şiddeti fazör gösterimleri şu şekildedir.

$$\mathbf{E}_r(z) = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot R \cdot E_0 \cdot e^{+\alpha_1 z} \cdot e^{+\beta_1 z} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{H}_r(z) = \hat{\mathbf{a}}_y \cdot R \cdot \frac{E_0}{\eta_1} \cdot e^{+\alpha_1 z} \cdot e^{+\beta_1 z} \quad (2.17)$$

Burada R yansıma katsayısıdır ve şu şekilde ifade edilir.

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.18)$$

İletilen dalganın elektrik ve manyetik alan şiddeti fazör gösterimleri şu şekildedir.

$$\mathbf{E}_t(z) = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot T \cdot E_0 \cdot e^{-\alpha_1 z} \cdot e^{-\beta_1 z} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{H}_t(z) = \hat{\mathbf{a}}_y \cdot T \cdot \frac{E_0}{\eta_1} \cdot e^{-\alpha_1 z} \cdot e^{-\beta_1 z} \quad (2.20)$$

Burada T iletim katsayısıdır ve şu şekilde ifade edilir.

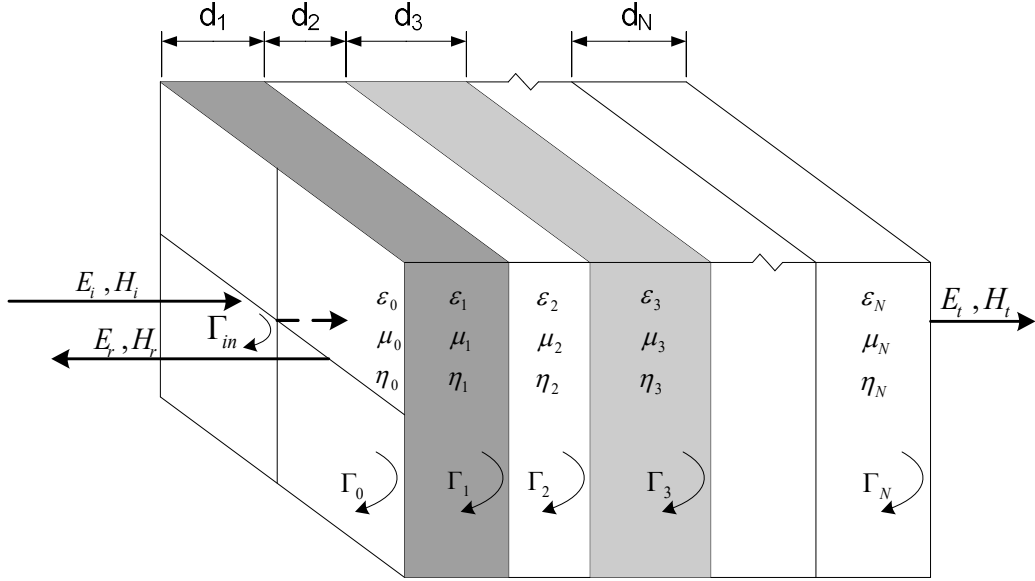
$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.21)$$

Yansıma ve iletim katsayıları arasındaki ilişki şu şekildedir.

$$T = R + 1 \quad (2.22)$$

2.5.2. Düzlem dalgaların çok katmanlı dokudaki davranışı

Her birinin kendine özgü dielektrik katsayıları ve kalınlıkları olan birbirine bitişik N adet dokuya uygulanan düzlem dalganın, katmanlar içerisindeki davranışını (yansıma ve iletim) incelemek için tüm katmanları kapsayan yaklaşık yansıma ve iletim katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Bu yöntem basit olsa da biraz külfetli bir yöntemdir. Katmanlı doku modelinin yapısı Şekil 2.3'teki gibidir.



Şekil 2.3. Düzlem dalganın çok katmanlı yapıdaki ilerleyişi

Öncelikle denklem (2.11) yardımıyla yayılma sabiti hesaplanır. Ardından aşağıdaki formül ile faz sabiti elde edilir.

$$\beta = \text{imag}(\gamma) \quad (2.23)$$

Aşağıdaki formül ile her bir doku katmanına ait empedans bulunur.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}}} \quad (\Omega) \quad (2.24)$$

Burada σ ve ϵ değerleri sırasıyla her bir dokuya ait olan iletkenlik katsayısı ve dielektrik sabitidir.

Örnek olarak dört farklı ortam için ($N=4$) dokular arası geçişteki empedans dönüşüm ifadesi şu şekilde ifade edilebilir. (İlk katman hava katmanıdır.)

$$\eta_{34} = \eta_3 \frac{\eta_4 + j\eta_3 \tan(\beta_3 d_3)}{\eta_3 + j\eta_4 \tan(\beta_3 d_3)} \quad (2.25)$$

$$\eta_{234} = \eta_2 \frac{\eta_{34} + j\eta_2 \tan(\beta_2 d_2)}{\eta_2 + j\eta_{34} \tan(\beta_2 d_2)} \quad (2.26)$$

Buradan her bir ortam için ayrı ayrı iletim katsayıları aşağıdaki formülle bulunur.

$$T = \frac{2\eta_{234}}{\eta_{234} + \eta_{hava}} \quad (2.27)$$

Ortama gelen elektrik alan ifadesi E_0 olarak ifade edilirse, denklem (2.19) yardımıyla iletilen elektrik alan ifadesi şu şekilde elde edilir.

$$\mathbf{E}_t(z) = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot \frac{2\eta_{234}}{\eta_{234} + \eta_{hava}} \cdot E_0 \cdot e^{-\beta_1 z} \quad (V/m) \quad (2.28)$$

2.6. Penetrasyon (Nüfuz) Derinliği

Elektromanyetik dalganın yoğunluğunun yüzeyde başlangıç durumuna göre %37 ($1/e$), Poyting vektörünün de ($1/e^2$) azaldığı mesafe olarak tanımlanır ve şu şekilde ifade edilir.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu \cdot \sigma \cdot f}} \quad (m) \quad (2.29)$$

Burada; μ (H/m) manyetik geçirgenliği, σ (S/m) ise elektrik iletkenliğini ifade eder.

Nüfuz derinliği, maruz kalınan elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak değişir. Uygulanan dalganın frekans değeri çok küçük olduğu takdirde nüfuz derinliği çok büyük olacak yani dalga, doku içerisinde daha derin kısımlara ilerlemektedir. Eğer dalganın gücü de çok yüksekse bu durumda dokuda çok ciddi hasarlar meydana gelmektedir.

2.7. Özgül Soğurulma Oranı (SAR)

Özgül soğurma oranı yani SAR, İngilizcedeki ‘‘Specific Absorption Rate’’ kelimelerinin baş harflerinin kısaltmasıyla ifade edilmektedir. Kilogram doku başına soğrulan elektromanyetik gücü gösterir. SAR değeri, tüm beden üzerinde ya da küçük bir örnek hacim (1 g veya 10 g) üzerinden ortalaması olarak alınır. Genel ifadesi şu şekildedir.

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E_{\max}^2}{2 \cdot \rho} \quad (\text{W/kg}) \quad (2.30)$$

Burada; E (V/m) dokuya uygulanan dalganın elektrik alanını, ρ (kg/m^3) dokunun yoğunluğunu, σ (S/m) ise dokunun iletkenliğini ifade eder.

SAR değeri, insan dokusu üzerinde önemli bir etken olduğu için uluslararası birçok kuruluş tarafından belirli limit değerleri belirlenmiştir. Bu belirlenen değerler, insan dokusunda hasar oluşturmayacak maksimum değerleri ifade eder. Artık günümüzde cep telefonu gibi birçok elektronik cihazın etiketinde kullanım sırasında vücutta ne kadar SAR indüklendiği bilgisi yer almaktadır. Tablo 2.1’de ICNIRP’ nin belirlemiş olduğu insan bedenindeki bölgesel SAR limit değerleri gösterilmiştir. Tablo 2.2’de ise SAR değerlerinin yanı sıra uygulanan elektromanyetik dalgaya ait elektrik alan, manyetik alan ve güç yoğunluğu sınır değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. ICNIRP SAR limit değerleri

Maruziyet Karakteristiği	Frekans Aralığı	Ortalama SAR (W/kg)
İş Yerlerinde	1 Hz e kadar	-
	1-4 Hz	-
	4 Hz-1 kHz	-
	1-100 kHz	-
	100 kHz-10 MHz	10
	10 MHz-10 GHz	10
Yaşam Alanlarında	1 Hz e kadar	-
	1-4 Hz	-
	4 Hz-1 kHz	-
	1-100 kHz	-
	100 kHz-10 MHz	2
	10 MHz-10 GHz	2

Tablo 2.2. ICNIRP elektrik ve manyetik alanlar limit değerleri

Maruziyet Karakteristiği	Frekans Aralığı	Elektrik Alan (V/m)	Manyetik Alan (A/m)	Düzlem Dalga Güç Yoğunluğu S_{eq} (W/m ²)
İş Yerlerinde	1 Hz e kadar	-	1.63×10^5	-
	1-8 Hz	20000	$1.63 \times 10^5/f^2$	-
	8-25 Hz	20000	$2 \times 10^4/f$	-
	0.025–0.82 kHz	500/f	20/f	-
	0.82–65 kHz	610	24.4	-
	0.065–1 MHz	610	1.6/f	-
	1–10 MHz	610/f	1.6/f	-
	10–400 MHz	61	0.16	10
	400–2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	f/40
	2–300 GHz	137	0.36	50
Yaşam Alanlarında	1 Hz e kadar	-	3.2×10^4	-
	1-8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4/f^2$	-
	8-25 Hz	10000	4000/f	-
	0.025–0,8 kHz	250/f	4/f	-
	0.8–3 kHz	250/f	5	-
	3–150 kHz	87	5	-
	0.15–1 MHz	87	0.73/f	-
	1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	0.73/f	-
	10–400 MHz	28	0.073	2
	400–2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	f/200
2–300 GHz	61	0.16	10	

2.8. Kaynak Taramaları

Literatürde, insanların mikrodalga kaynaklara maruziyeti ve bu maruziyetin incelenmesi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir.

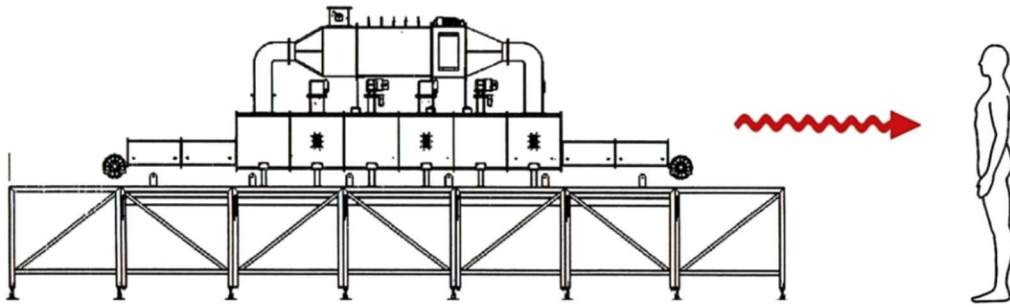
Yayınlanan bir çalışmada, 915 ve 2450 MHz frekanslarındaki elektromanyetik alan maruziyetinin insan vücudunda oluşturduğu SAR'ın ve sıcaklık artışının analizleri yapılmıştır (Wessapan et al 2011). Analizler insan vücut modeli üzerinde COMSOL programında FEM yöntemiyle yapılmıştır. Dalga maruziyet süresi t=1 dk. ve dalga güç yoğunlukları 5 mW/m², 10 mW/m², 50 mW/m² olarak belirlenmiştir. Analizler sonunda elde edilen veriler neticesinde en yüksek SAR değerlerinin deri dokusunda ve 2450 MHz frekansında olduğu, sıcaklık artışının da 915 MHz de daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine benzer bir çalışmada (Teerapot Wessapan, Aralık 2010), 300, 915, 1300 ve 2450 MHz frekanslarında 100 W gücündeki bir elektromanyetik dalganın t=20 sn. boyunca

maruziyetinin insan vücudunda oluşturduğu SAR'ın ve sıcaklık artışının analizleri yapılmıştır. Ancak bu çalışmada analizler elektromanyetik dalganın yayılım yönlerine göre (TE ve TM) farklı farklı yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre TE modunda en yüksek SAR değeri 915 MHz frekansında deri dokusunda meydana gelirken TM modunda ise 300 MHz frekansında yağ dokusunda meydana gelmiştir.

Yayınlanan bir başka çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak gelen elektromanyetik dalganın vücuda sadece dik açıyla gelmesi durumu değil farklı açılarda gelmesi durumu ele alınmıştır (Sabbah et al 2011). 900, 1800 ve 2400 MHz frekanslarında yapılan bu çalışmada yine çok katmanlı doku modeli kullanılmıştır. Analizler ise FDTD metodu kullanılarak yapılmıştır. 300 V/m elektrik alan şiddetine sahip bir anten insan kafa modeline 2 cm mesafeye yerleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, en büyük SAR ifadesi 900 MHz frekansında ve 0° açıda meydana geldiği, frekans ve elektromanyetik dalganın geliş açısı arttıkça, dokularda indüklenen SAR değeri azaldığı görülmüştür.

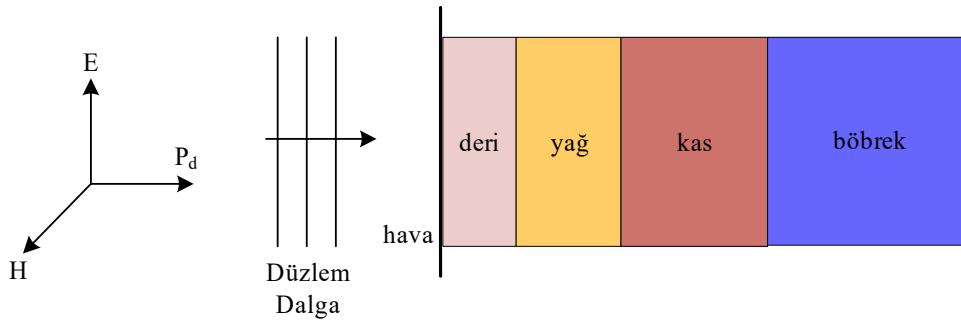
3. MATERYAL VE METOT

Mikrodalga kaynaklarının kullanıldığı tesislerde özellikle cihazı kullanan operatörler risk altında bulunmaktadır. Kullanım hataları, güvenlik tedbirlerinin yeterince alınmamış olması veya cihazda meydana gelen bir sızıntı durumunda, cihaz etrafında bulunan kişiler doğrudan mikrodalgalara maruz kalırlar. Maruz kalınan dalganın frekansına ve gücüne bağlı olarak kişinin vücudunda oluşan SAR neticesinde sıcaklık ($T^{\circ}\text{C}$) artışı meydana gelir. Mikrodalga kaynağından insan vücuduna gelen elektromanyetik dalganın ilerleyişi Şekil 3.1’de sembolize edilmiştir.



Şekil 3.1. Endüstriyel mikrodalga kaynağında sızıntı durumu

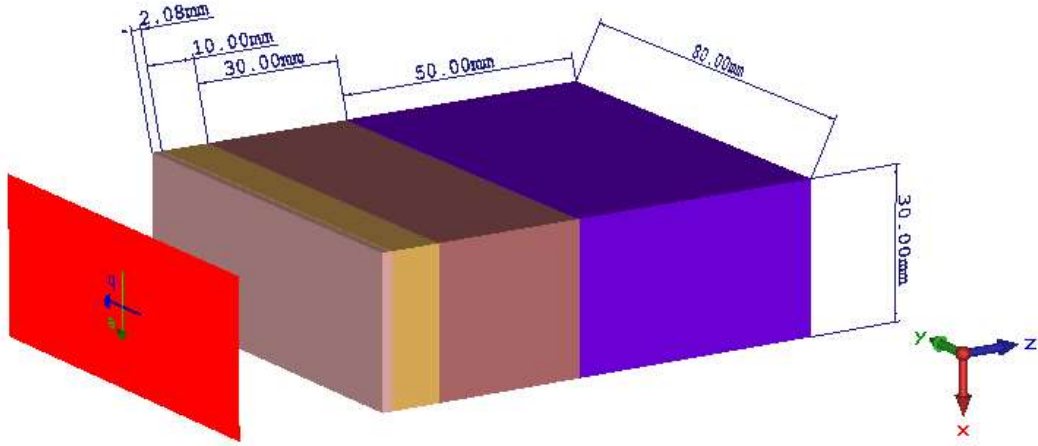
Mikrodalga maruziyeti nedeniyle vücutta meydana gelen sıcaklık artışının incelenmesi için çok katmanlı doku modeli ele alınmıştır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te katmanlı dokuda yer alan doku tipleri ve uygulanan düzlem dalga ile bu yapının CST Microwave programındaki tasarımı gösterilmiştir. Tablo 3.1’de ise dokulara ait kalınlıklar verilmiştir.



Şekil 3.2. Çok katmanlı doku modeli

Tablo 3.1. Doku kalınlıkları (mm)

	<i>En (X)</i>	<i>Boy (Y)</i>	<i>Kalınlık (Z)</i>
Deri	30	80	2,08
Yağ	30	80	10
Kas	30	80	30
Böbrek	30	80	50



Şekil 3.3. Çok katmanlı dokunun ve düzlem dalga'nın CST ortamındaki modellenmesi

Şekil 3.3'te kırmızı renkle gösterilmiş olan düzlem dalga, 3 cm mesafeden 1500 saniye süreyle katmanlı dokuya uygulanmıştır. Uygulanan dalga'nın güç yoğunluğu 10 W/m^2 'dir.

İnsan dokularına ait dielektrik ve termal özelliklerin belirlenmesinde sayısız birçok araştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ölçülen dokunun kalınlıklarının ve doku sıcaklıklarının farklı olması gibi değişen parametrelerden dolayı birbirinden farklıdır. Bu çalışmada, C. Gabriel tarafından belirlenmiş dielektriksel özellikler kullanılmıştır. Dokuların termal özellikleri ise CST Microwave Studio programından elde edilmiştir. Dokulara ait termal ve dielektriksel özellikler sırasıyla Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Dokuların termal özellikleri

Doku	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$K \text{ (W/m.K)}$	$C \text{ (J/K/Kg)}$	$Q_m \text{ (W/m}^3\text{)}$
Deri	1100	0,293	3500	1620
Yağ	910	0,201	2500	300
Kas	1041	0,53	3546	480
Böbrek	1020	0,499	3900	48000

Tablo 3.3. Dokuların dielektriksel özellikleri

Doku	915 MHz		1800 MHz		2100 MHz		2450 MHz	
	σ (S/m)	ϵ_r	σ (S/m)	ϵ_r	σ (S/m)	ϵ_r	σ (S/m)	ϵ_r
Deri	0.8717	41.329	11.847	38.872	13.075	38.431	14.640	38.007
Yağ	0.0514	54.596	0.0784	53.494	0.0898	53.169	0.1045	52.801
Kas	0.9481	54.997	13.410	53.549	15.135	53.163	17.388	52.729
Böbrek	14.007	58.556	19.495	54.426	21.623	53.586	24.295	52.742

3.1. Penne Biyosı Denklemi ve SAR Analitik Çözümleri

Dokulara ait dielektriksel özellikler formül (2.24)'te yerine yazılarak dokulara ait empedans değerleri elde edilir. Bu empedans değerleriyle her bir ortam için geçiş empedansları formül (2.25) ile elde edilir. 1.ortama gelen dalgaya ait elektrik alanın 2.ortama geçiş değerini hesaplamak için iletim katsayısı (T) formül (2.27) ile bulunur. Dokular arası geçişte elektrik alan ifadeleri formül (2.30) yardımıyla aşağıdaki gibidir elde edilir.

$$E_{deri} = \frac{2\eta_{2345}}{\eta_{2345} + \eta_{hava}} \cdot E_{hava} \cdot e^{-\beta_1 z} \quad (V/m) \quad (3.1)$$

$$E_{yağ} = \frac{2\eta_{345}}{\eta_{345} + \eta_{deri}} \cdot E_{deri} \cdot e^{-\beta_2 z} \quad (V/m) \quad (3.2)$$

$$E_{kas} = \frac{2\eta_{45}}{\eta_{45} + \eta_{yağ}} \cdot E_{yağ} \cdot e^{-\beta_3 z} \quad (V/m) \quad (3.3)$$

$$E_{böbrek} = \frac{2\eta_5}{\eta_5 + \eta_{kas}} \cdot E_{kas} \cdot e^{-\beta_4 z} \quad (V/m) \quad (3.4)$$

Gelen elektrik alanın her bir doku içerisindeki büyüklüğü bulunduktan sonra formül (2.30) yardımıyla dokulardaki SAR ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAR_{deri} = \frac{\sigma_{deri} \cdot E_{deri}^2}{2 \cdot \rho_{deri}} \quad (W/kg) \quad (3.5)$$

$$SAR_{yağ} = \frac{\sigma_{yağ} \cdot E_{yağ}^2}{2 \cdot \rho_{yağ}} \quad (W/kg) \quad (3.6)$$

$$SAR_{kas} = \frac{\sigma_{kas} \cdot E_{kas}^2}{2 \cdot \rho_{kas}} \quad (W/kg) \quad (3.7)$$

$$SAR_{böbrek} = \frac{\sigma_{böbrek} \cdot E_{böbrek}^2}{2 \cdot \rho_{böbrek}} \quad (W/kg) \quad (3.8)$$

Mikrodalgalara maruziyet sırasında dokudaki sıcaklık dağılımı, ısı iletimi ve kan perfüzyonu gibi parametreleri içeren biyo ısı denklemi kullanılarak tespit edilebilir. Dokunun geometrik ve termal özelliklerinin yanı sıra, mikrodalganın dokuda oluşturduğu SAR dağılımının da incelenmesi gerekir. Penne H.H. tarafından metabolizma ve kan perfüzyonunun, doku içindeki enerji dengesi üzerindeki etkilerini inceleyen bir model önerilmiştir. Genelleştirilmiş 1-D Penne biyoısı denklemi şu şekildedir.

$$\rho.C.\frac{\partial T}{\partial t} = K.\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \omega_b.\rho_b.c_b(T_a - T) + Q_m + Q_r(x,t) \quad (3.9)$$

Burada;

- ρ = dokunun yoğunluğu (kg/m^3)
- C = öz ısı
- K = dokunun termal iletkenliği (W/m.K)
- ρ_b = kanın yoğunluğu (kg/m^3)
- c_b = kanın öz ısısı
- ω_b = kan perfüzyon oranı ($1/\text{s}$)
- T_a = atardamar sıcaklığı (sabit)
- T = doku sıcaklığı
- $Q_r(x,t)$ = İndüklenen dalganın oluşturduğu ısı
- Q_m = metabolizmanın ürettiği ısı (W/m^3) dir.

Penne biyoısı denklemi kullanılarak dokuda meydana gelen sıcaklık artışının hesaplanması için bu denklemin, başlangıç ve sınır şartları yardımıyla analitik olarak çözülmesi gerekmektedir. Penne biyoısı denkleminin analitik çözümler sonucunda sadeleştirilmiş hali şu şekildedir. (Liu et al 1999)

$$\theta(x,t) = \frac{Q_r}{W_b C_b} + \frac{\left(\theta_0 - \frac{Q_r}{W_b C_b} \right) ch \left[\sqrt{\frac{W_b C_b}{K}} (x-L) \right]}{ch \left(\sqrt{\frac{W_b C_b}{K}} L \right)} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp \left\{ -\alpha \left[\frac{(2n-1)^2}{4L^2} \pi^2 + \frac{W_b C_b}{K} \right] t \right\} \times \sin \frac{\left(n - \frac{1}{2} \right) \pi}{L} x \quad (3.10)$$

Burada;

$$A_n = -\frac{4Q_r}{W_b C_b (2n-1)\pi} - \frac{(2n-1)\left(\theta_0 - \frac{Q_r}{W_b C_b}\right)\pi}{\frac{W_b C_b}{K} L^2 + \left(\frac{2n-1}{2}\pi\right)^2} \quad (3.11)$$

$$Q_r = n.P.\exp(-n.x) \quad (3.12)$$

Q_r ifadesinde P güç yoğunluğu, x ise doku kalınlığını tanımlar.

Sıcaklık artışının hesaplanması için öncelikle dokulardaki elektrik alan ifadeleri elde edilmelidir. Formül 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'te elde edilen elektrik alan ifadeleri kullanılarak her bir dokudaki güç yoğunluğu ifadeleri (P) elde edilir.

$$P_{deri} = \frac{E_{deri}^2}{\eta_{deri}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.13)$$

$$P_{yağ} = \frac{E_{yağ}^2}{\eta_{yağ}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.14)$$

$$P_{kas} = \frac{E_{kas}^2}{\eta_{kas}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.15)$$

$$P_{böbrek} = \frac{E_{böbrek}^2}{\eta_{böbrek}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.16)$$

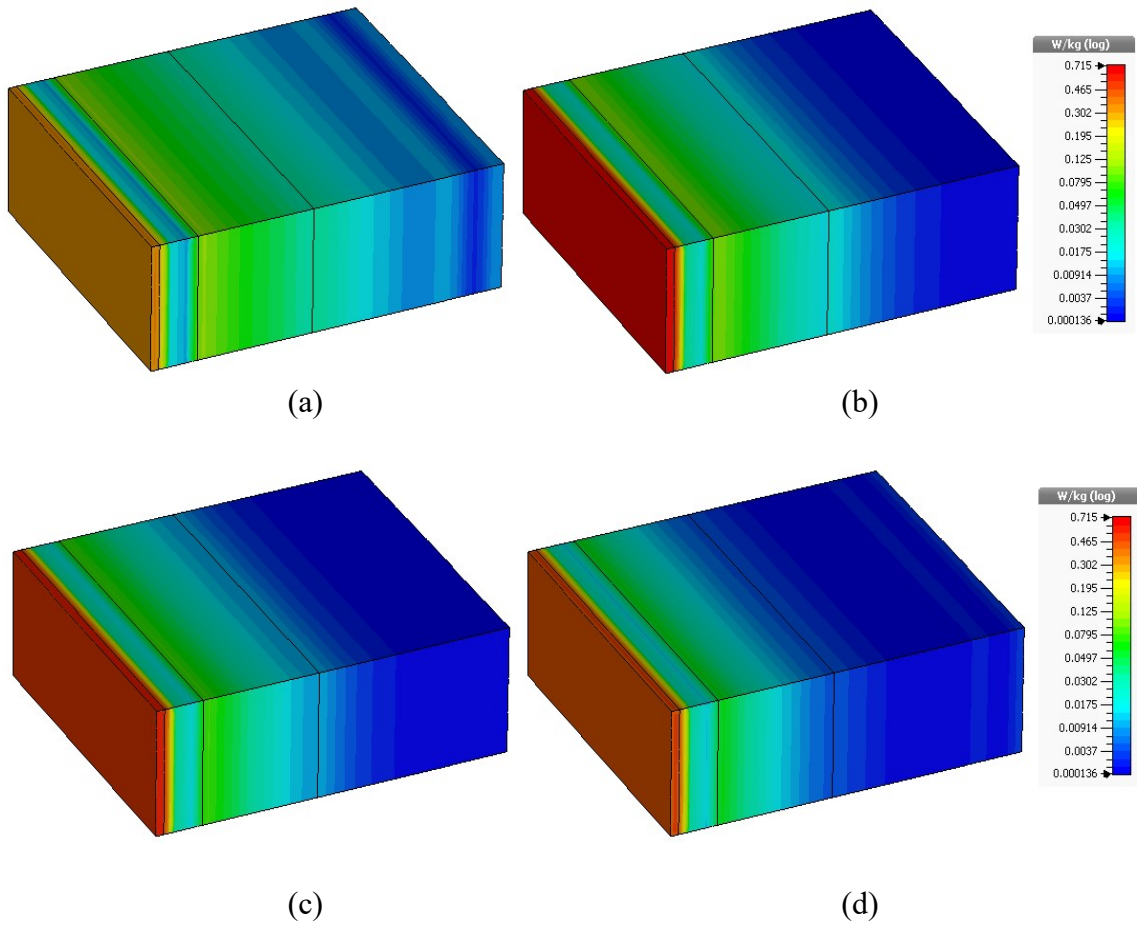
Elde edilen güç yoğunluğu ifadeleri formül (3.12)'de yerine yazılarak Q_r ifadesi bulunur. Ardından dokulara ait dielektriksel ve termal özellikler formül (3.10)'da yerine yazılarak tüm dokulardaki sıcaklık artışları elde edilmiş olur.

4. BULGULAR

4.1. Düzlemsel Katmanlı Doku Modeli Çözümlenmeleri

4.1.1. Elektrik alan ve özgül soğurulma oranı (SAR)

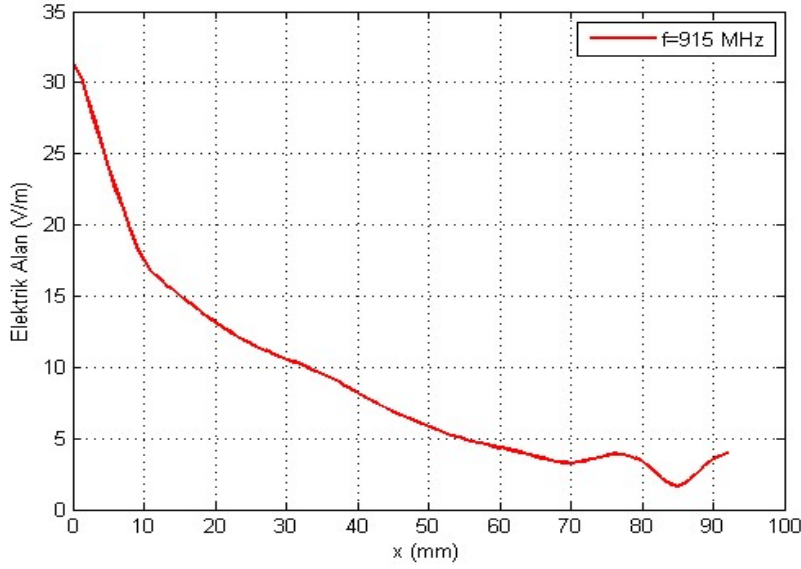
CST Microwave Studio ortamında yapılan simülasyon neticesinde, $t=1500$ sn. boyunca güç yoğunluğu $P=10$ W/m² olan mikrodalga maruziyeti durumunda 915-1800-2100 ve 2450 MHz frekansları için dokularda meydana gelen SAR değerleri ve doku içerisindeki dağılımı Şekil 4.1'deki gibi elde edilmiştir.



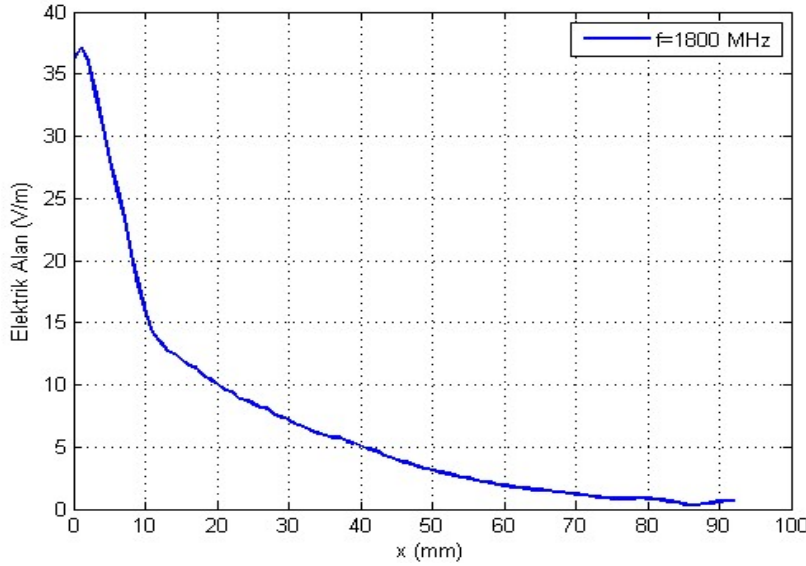
Şekil 4.1. CST verilerine göre frekansa bağlı SAR değişimi a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m²)

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere 915 MHz frekansında tüm dokularda SAR meydana gelirken, 2450 MHz frekansında böbrek dokusunun bir kısmında SAR meydana gelmiştir. Bunun sebebi, düşük frekanslarda elektromanyetik dalganın nüfuz etkisi fazla iken yüksek frekanslarda bu etkinin az olmasıdır.

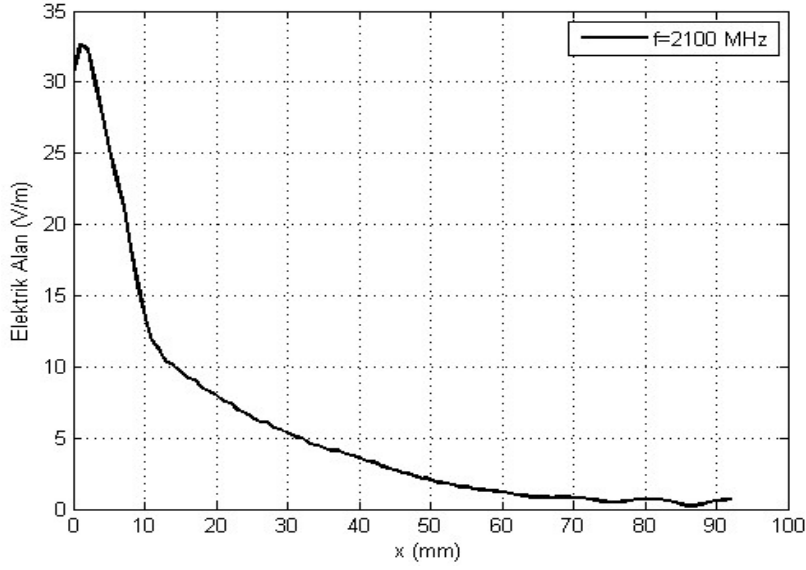
Katmanlı doku için CST programında yapılan simülasyon sonucundan elde edilen verilere göre $E_0=61,40$ V/m olan elektrik alanın doku içerisindeki değişimi Grafik 4.1’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde dokuya gelen elektrik alan, deri dokusuna girdiği anda bir miktar artış gösterdikten sonra azalarak dokudan çıkmaktadır. Böbrek dokusunda en büyük elektrik alan ifadesi 915 MHz değerinde elde edilmiştir. Bunun sebebi, düşük frekanslı dalganın nüfuz etkisinin yüksek frekanslı dalganinkinden fazla olmasıdır.



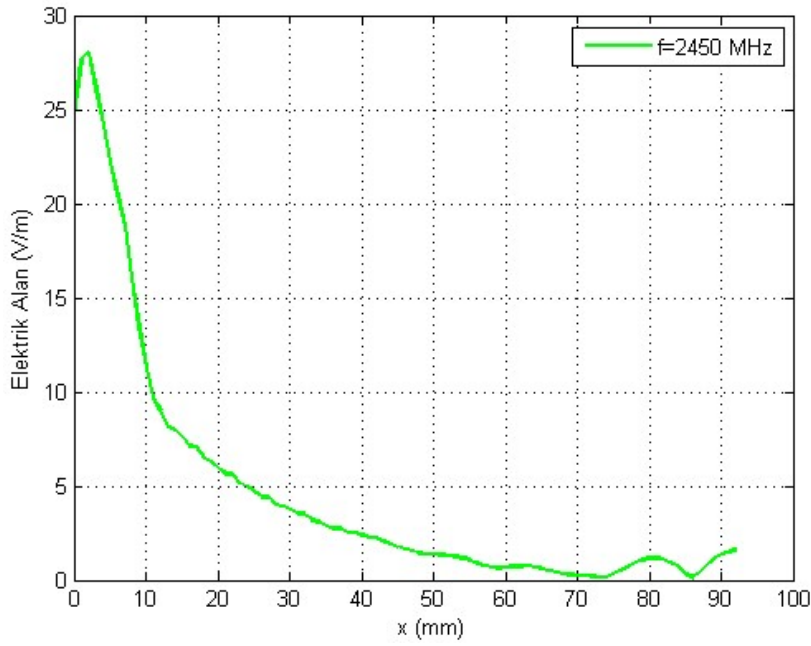
(a)



(b)



(c)

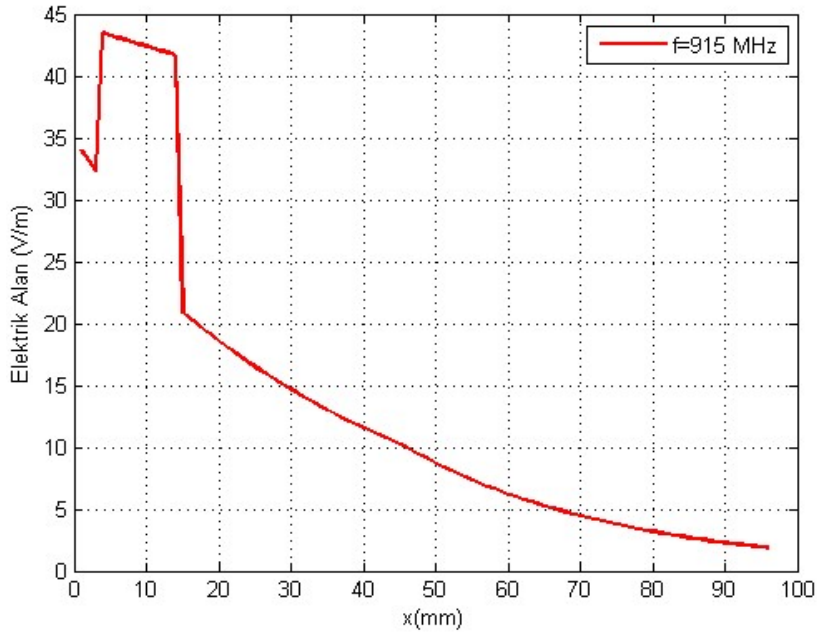


(d)

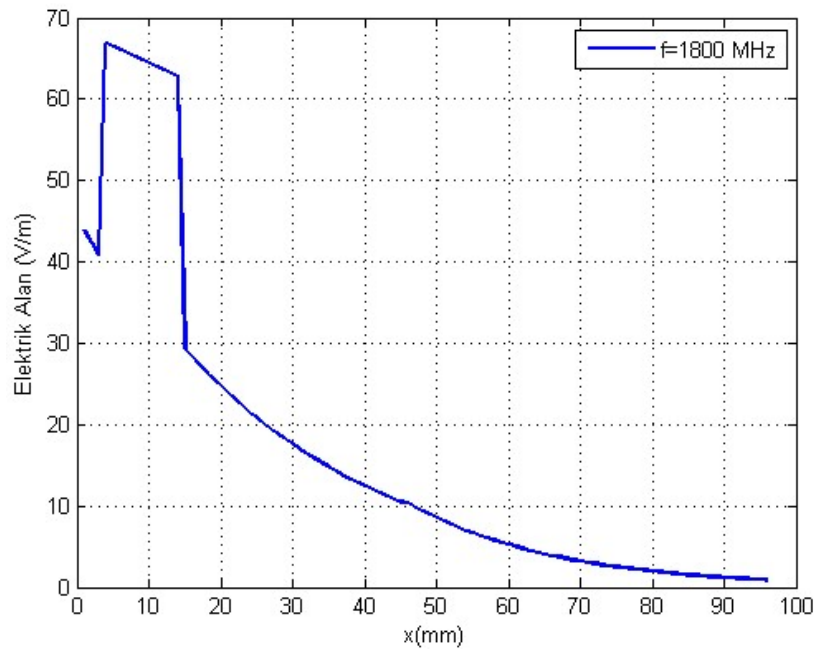
Grafik 4.1. CST verilerine göre elektrik alanının doku içerisindeki değişimi ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

Katmanlı doku için yapılan analitik çözümlerden elde edilen verilere göre $E_0=61,40$ V/m olan elektrik alanının doku içerisindeki değişimi Grafik 4.2’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde yine CST simülasyon sonuçlarına benzer bir şekilde dokuya

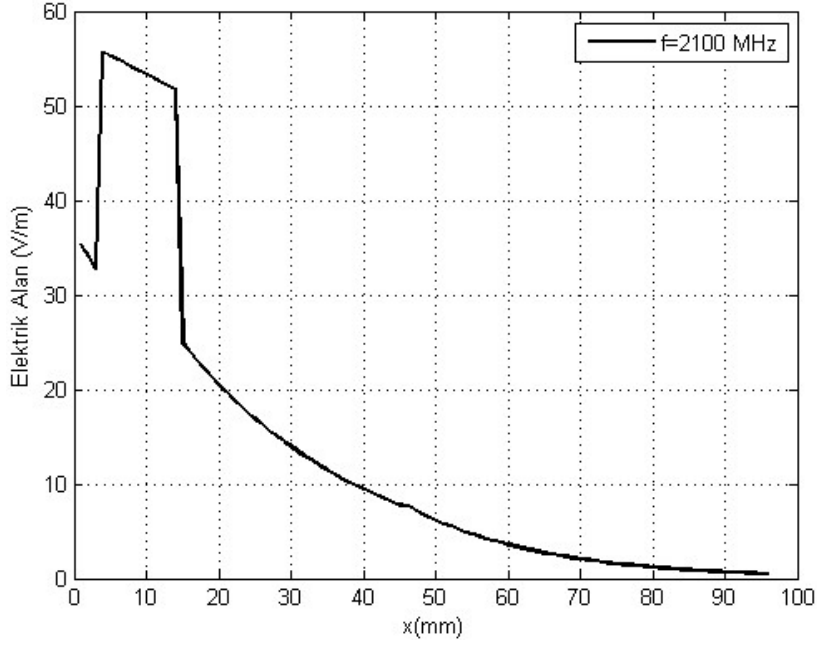
gelen elektrik alan, deri dokusuna girdiği anda bir miktar artış gösterdikten sonra azalarak dokudan çıkmaktadır.



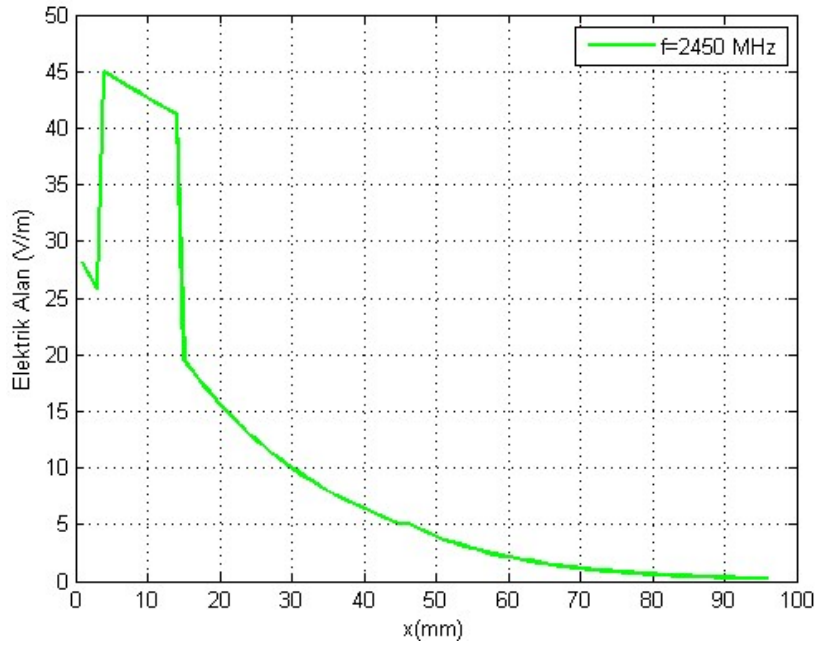
(a)



(b)



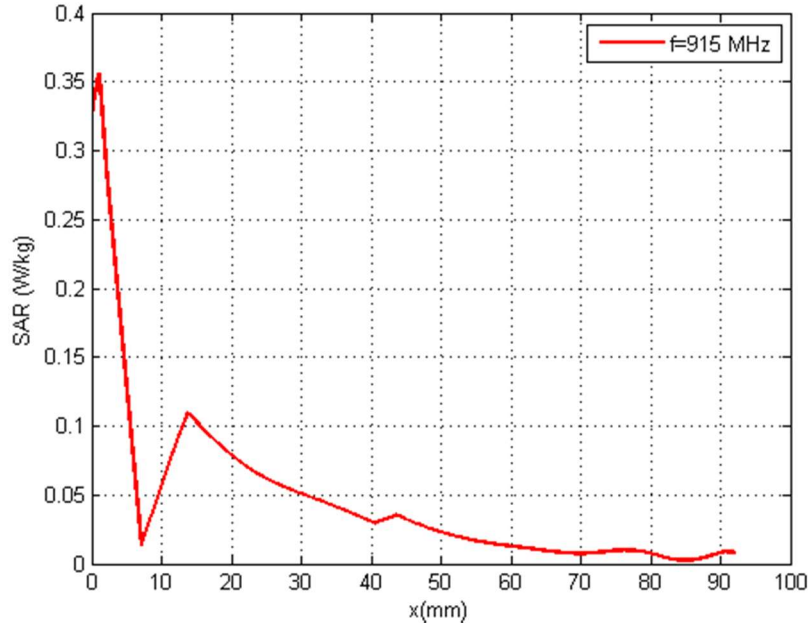
(c)



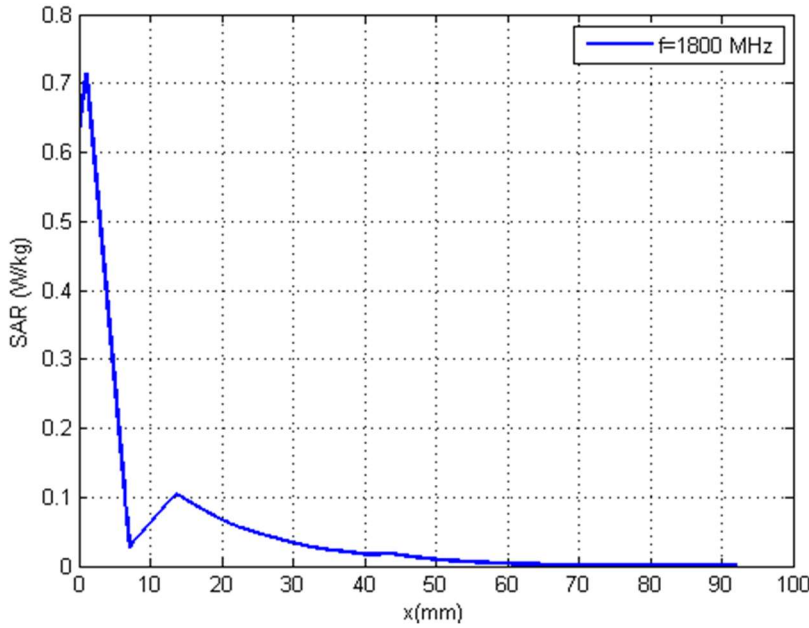
(d)

Grafik 4.2. Analitik çözümlere göre elektrik alanının doku içerisindeki değişimi (t=1500 sn. ve P=10 W/m²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

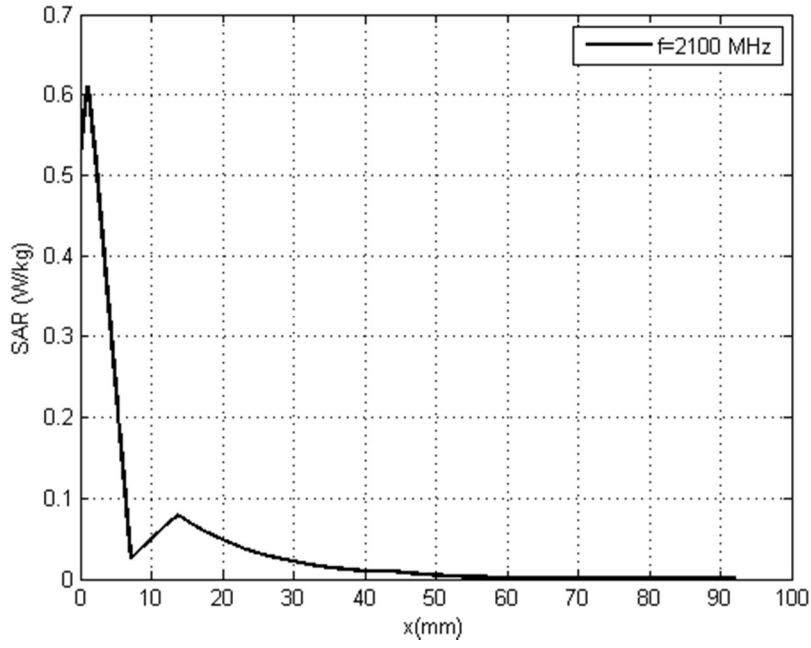
CST simülasyonu sonucundan elde edilen verilere göre dokuda meydana gelen SAR değişimi Grafik 4.3’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde en yüksek SAR değerlerinin hepsinin deri dokusunda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yağ dokusunda ise çok küçük değerlerde SAR meydana gelmiştir. Bu durum, dokuların dielektriksel özelliklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



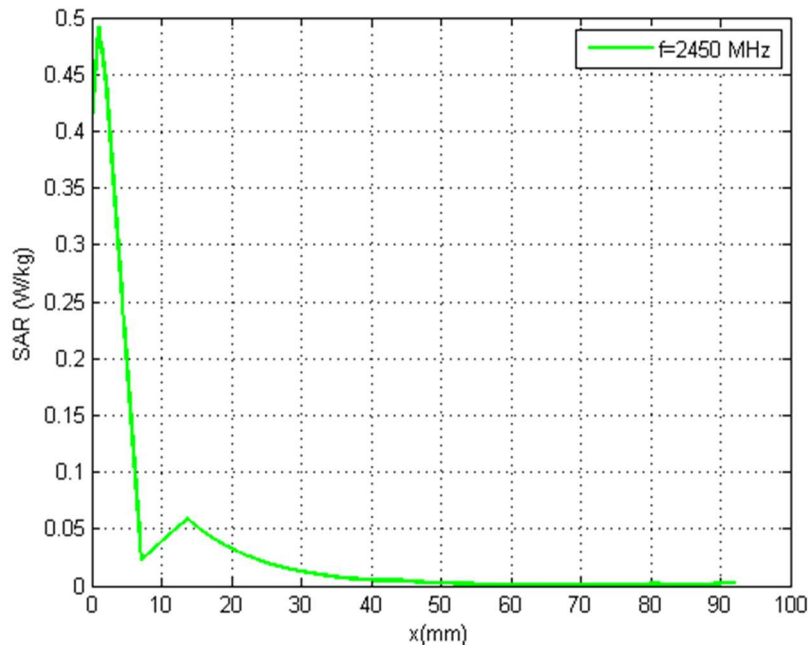
(a)



(b)



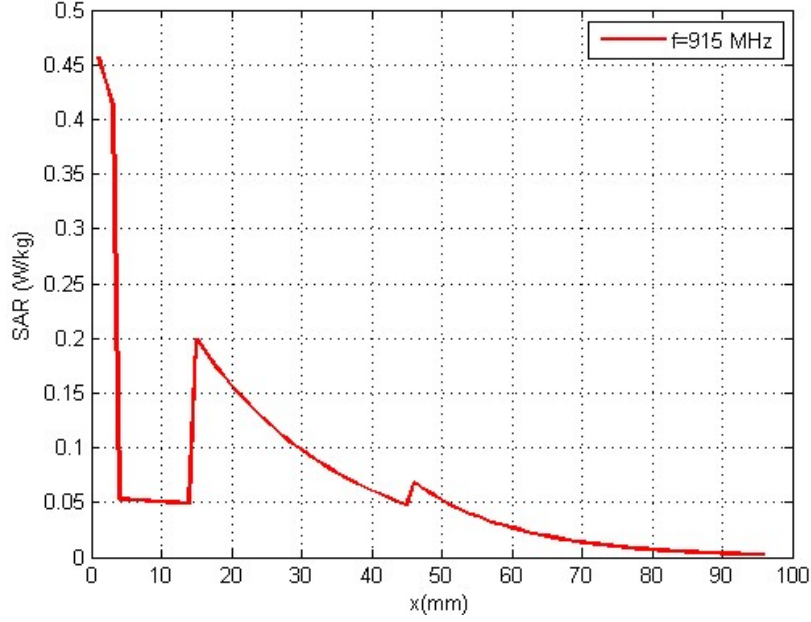
(c)



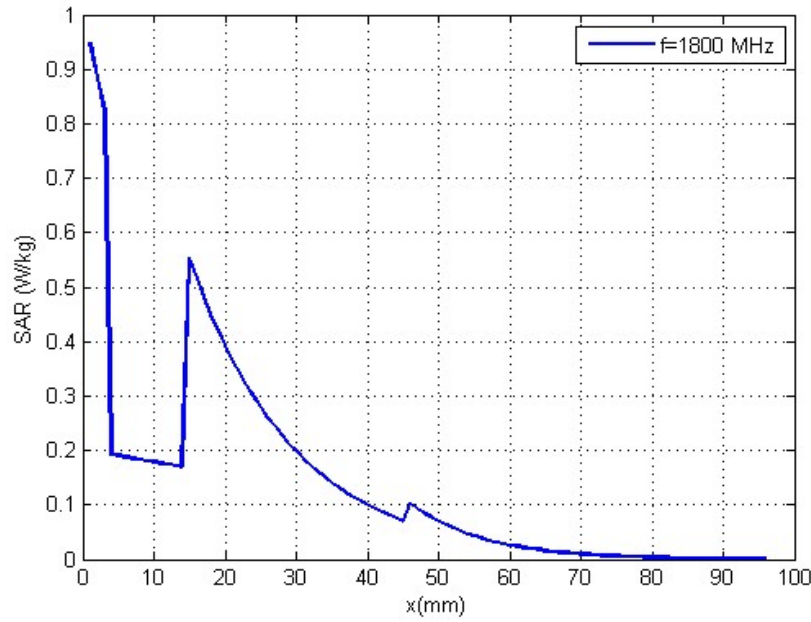
(d)

Grafik 4.3. CST verilerine göre doku içerisindeki SAR değişimi (t=1500 sn. ve P=10 W/m²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

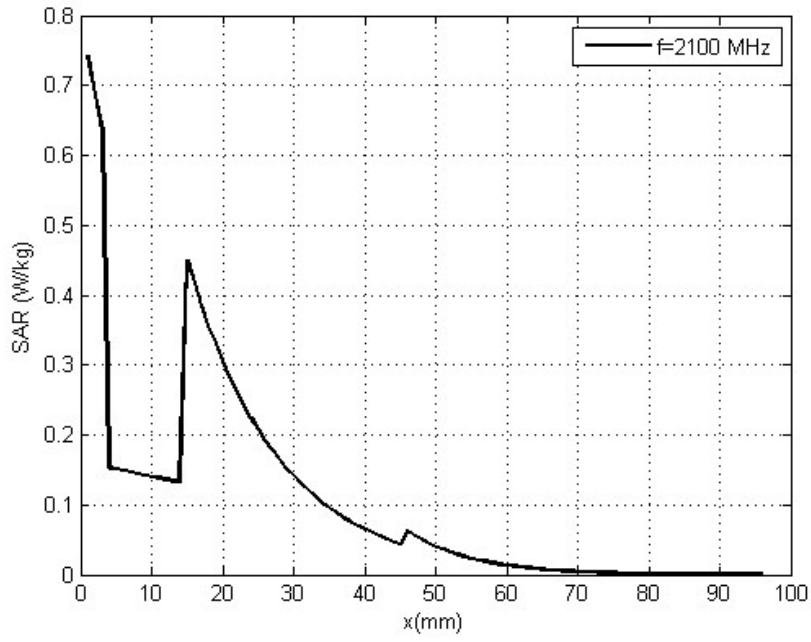
Analitik çözümlerden elde edilen verilere göre dokuda meydana gelen SAR değişimi Grafik 4.4'te gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde yine CST verilerine benzer bir şekilde en yüksek SAR değerlerinin deri dokusunda meydana geldiği, yağ dokusunda ise çok küçük değerlerde SAR meydana geldiği gözlemlenmiştir.



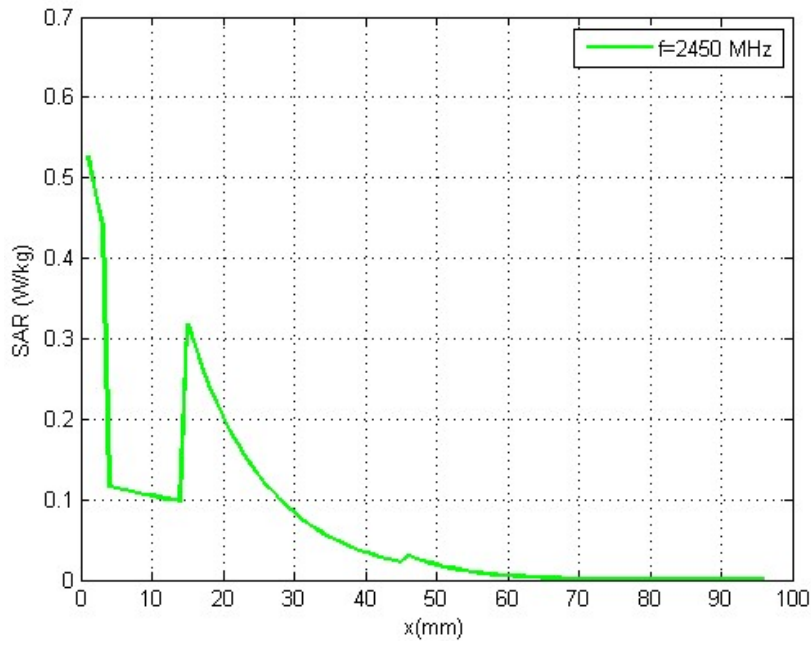
(a)



(b)

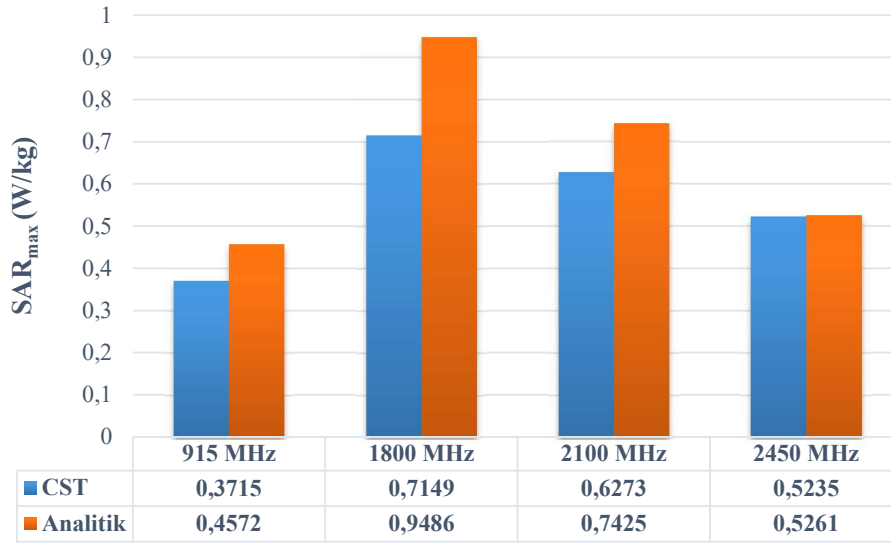


(c)



(d)

Grafik 4.4. Analitik çözümlere göre doku içerisindeki SAR değişimi ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m²) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

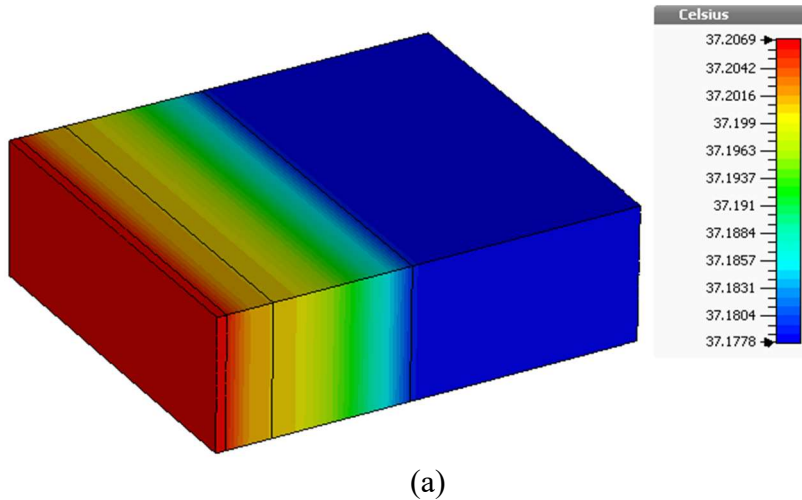


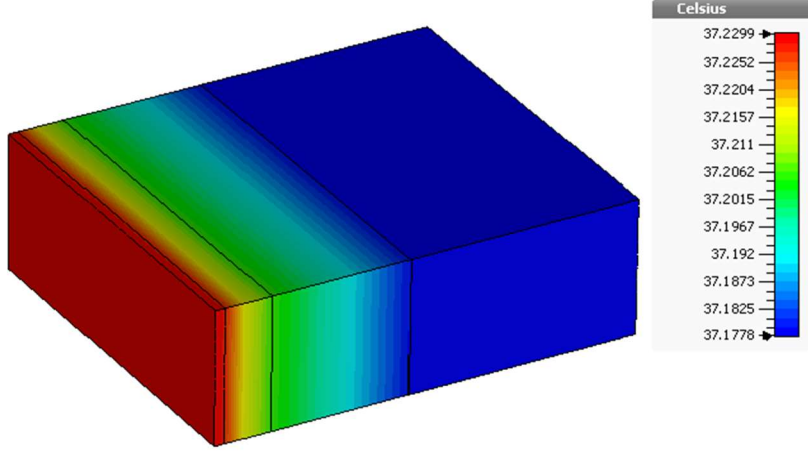
Grafik 4.5. CST ve analitik çözümlerden elde edilen SAR_{max} değerleri

Grafik 4.5'te analitik ve nümerik olarak yapılan çözümler sonucunda dokuda oluşan SAR_{max} değerlerinin karşılaştırıldığında 2450 MHz frekansında birbirine çok yakın değerler elde edilmesine karşın diğer frekanslarda sapmalar tespit edilmiştir. Bunun sebebi, nümerik ve analitik çözümlerin yöntem farklılıklarının olması ve çözüm aşamasında yapılan bazı kabullerin yapılmasıdır.

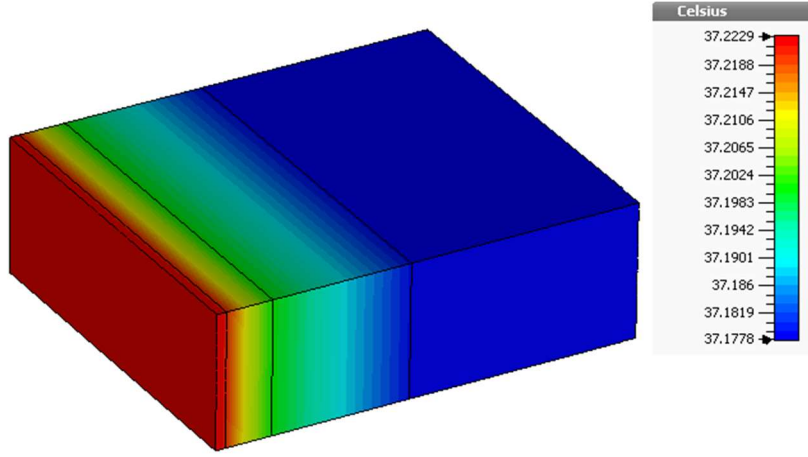
4.1.2. Sıcaklık değişimi analizleri (T °C)

CST Microwave Studio ortamında yapılan simülasyon neticesinde, t=1500 sn. boyunca güç yoğunluğu P=10 W/m² olan mikrodalga maruziyeti durumunda 915-1800-2100 ve 2450 MHz frekanslarında dokularda meydana gelen T(°C) sıcaklık artışları Şekil 4.2'deki gibi elde edilmiştir.

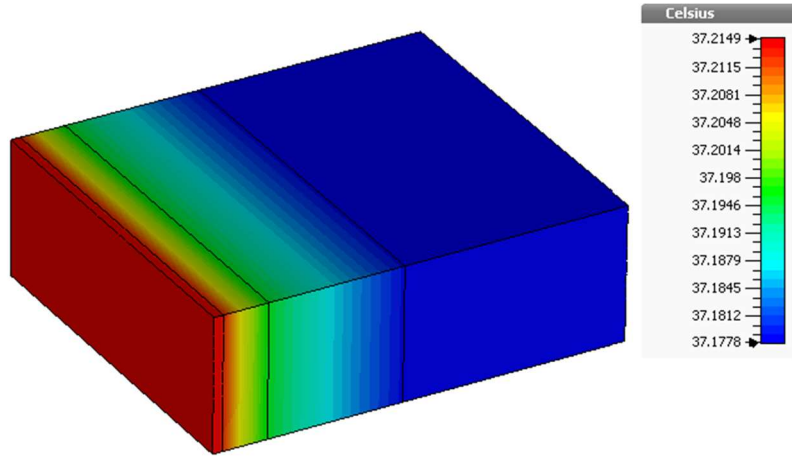




(b)



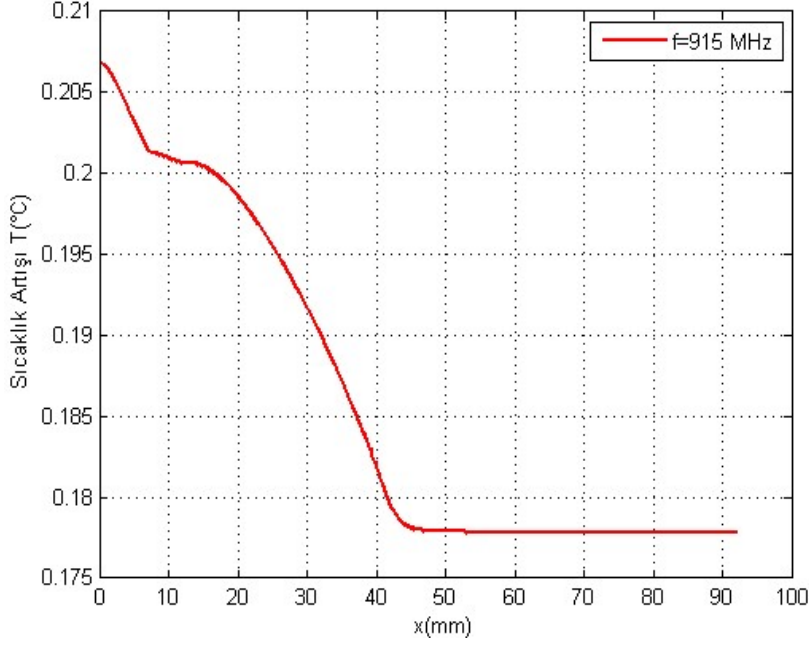
(c)



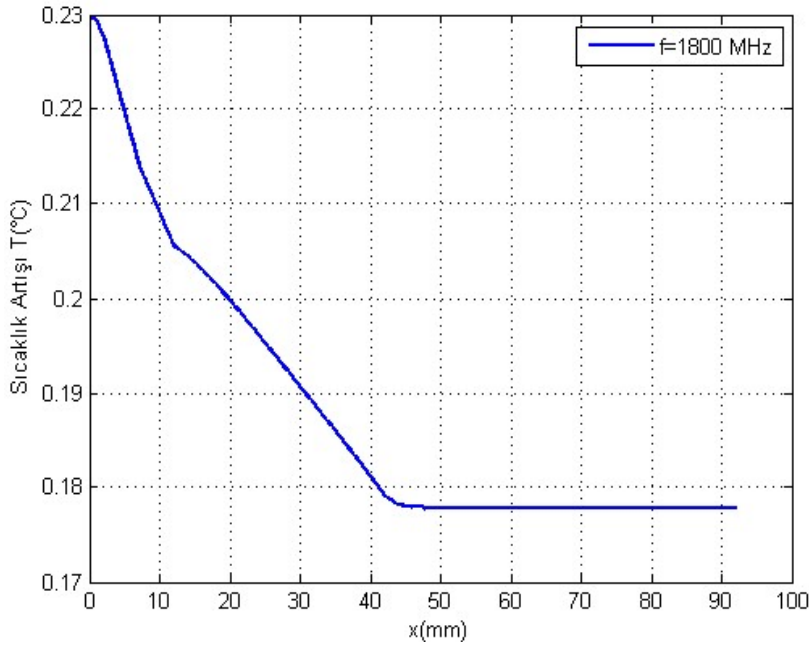
(d)

Şekil 4.2. CST verilerine göre dokuda oluşan sıcaklık artışı ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m²)
a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

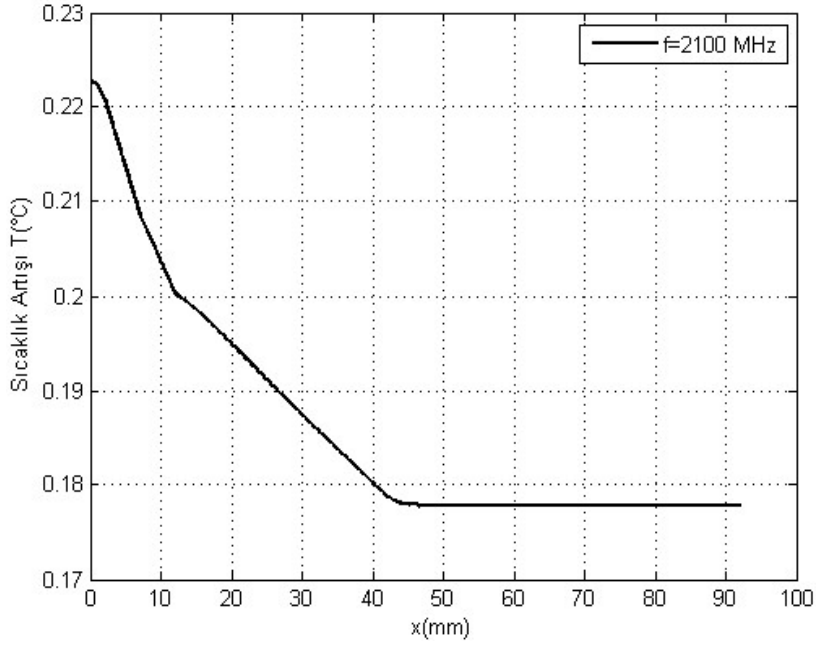
Şekil 4.5 incelendiğinde uygulanan dört farklı frekans değerinde oluşan sıcaklık artışının en yüksek olduğu dokunun deri dokusu olduğu oldukça nettir. Deriden içeriye doğru ilerledikçe (özellikle kas dokusunda) sıcaklık artışı, kılcal damarların çok olmasından ve dolayısıyla kan akışının fazlalığından dolayı azalmakta ve doku sıcaklığı kabul edilmiş vücut sıcaklığı olan 37 °C ye çok yaklaşmaktadır. Şekil 4.5'teki bilgiler ışığında doku içerisinde meydana gelen sıcaklık artışı Grafik 4.6'da gösterilmiştir.



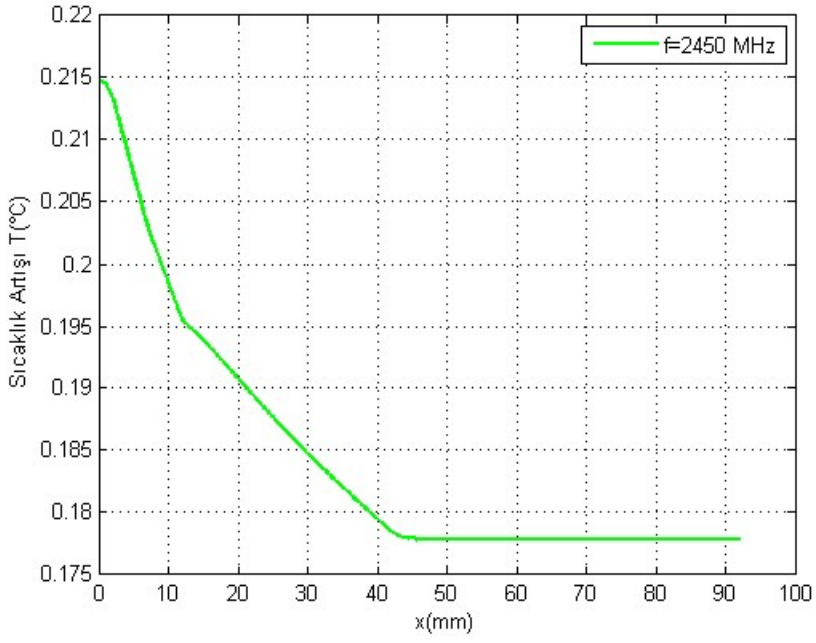
(a)



(b)



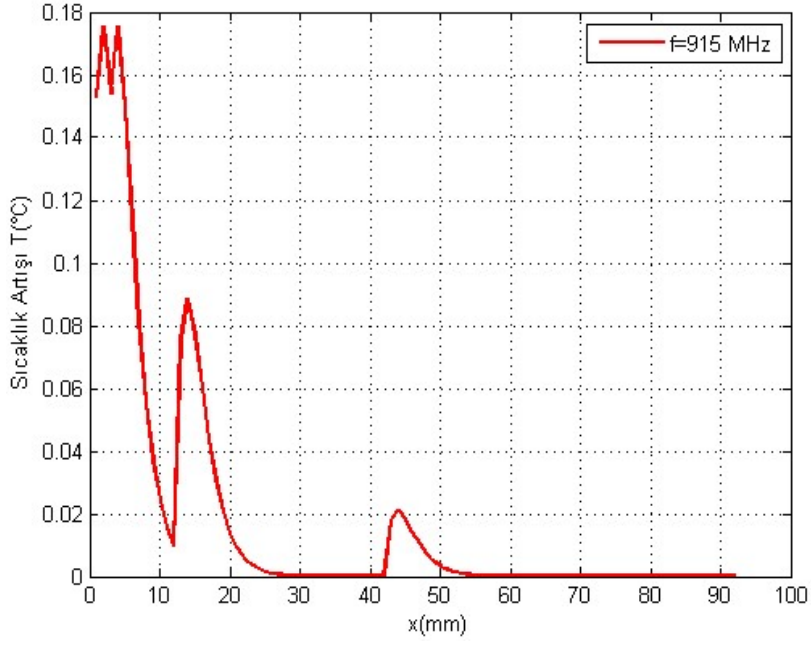
(c)



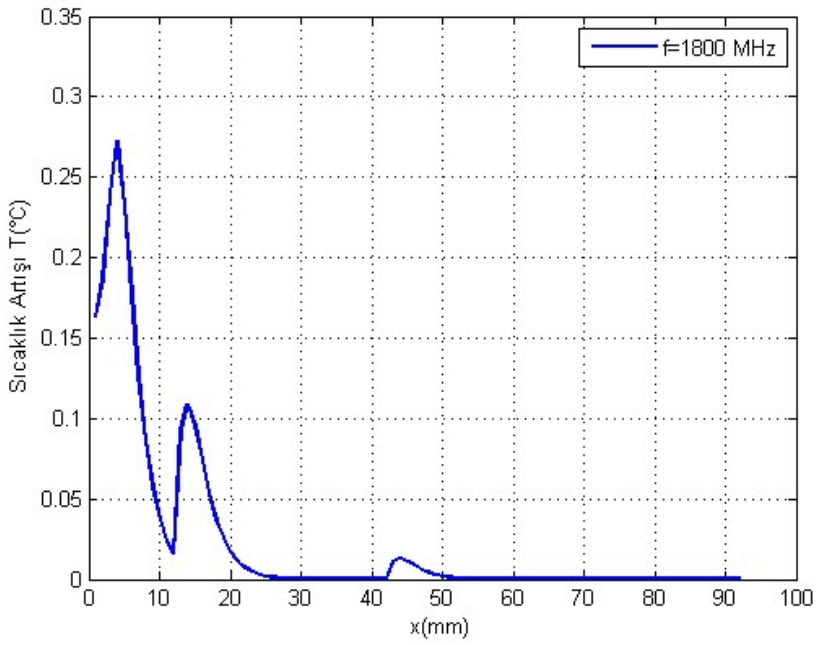
(d)

Grafik 4.6. CST verilerine göre doku içindeki sıcaklık artışı ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m²)
a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

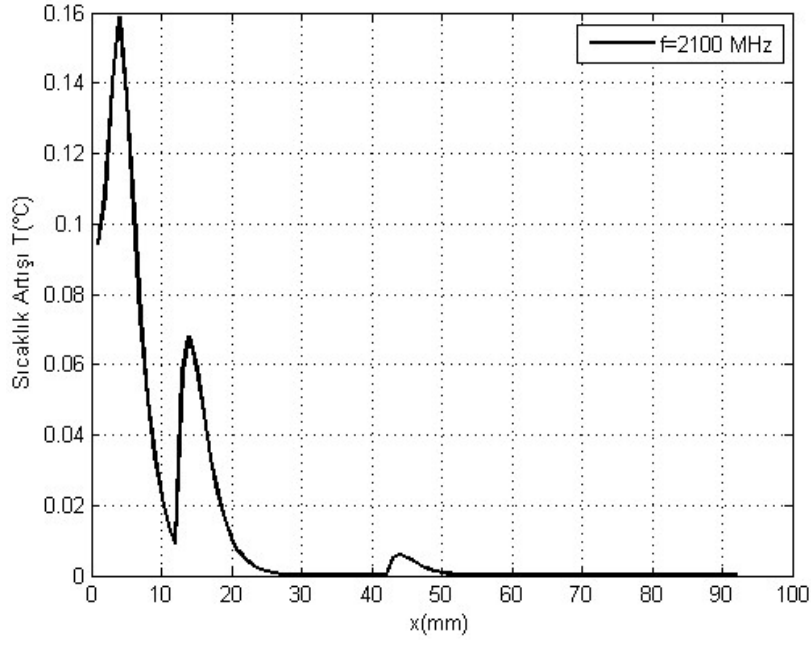
Analitik çözümlerden elde edilen verilere göre dokuda meydana gelen sıcaklık artışı Grafik 4.7’de gösterilmiştir.



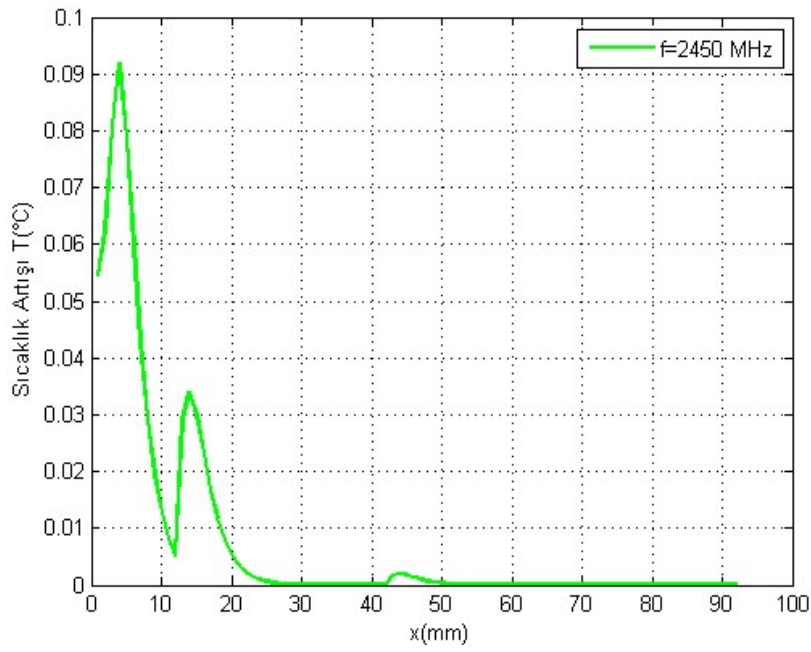
(a)



(b)



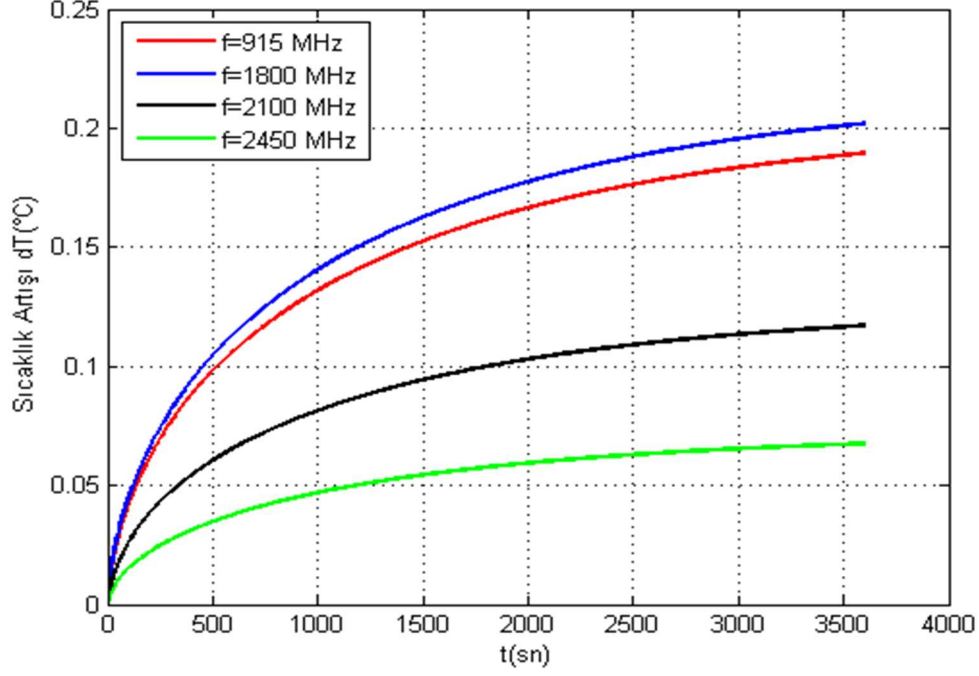
(c)



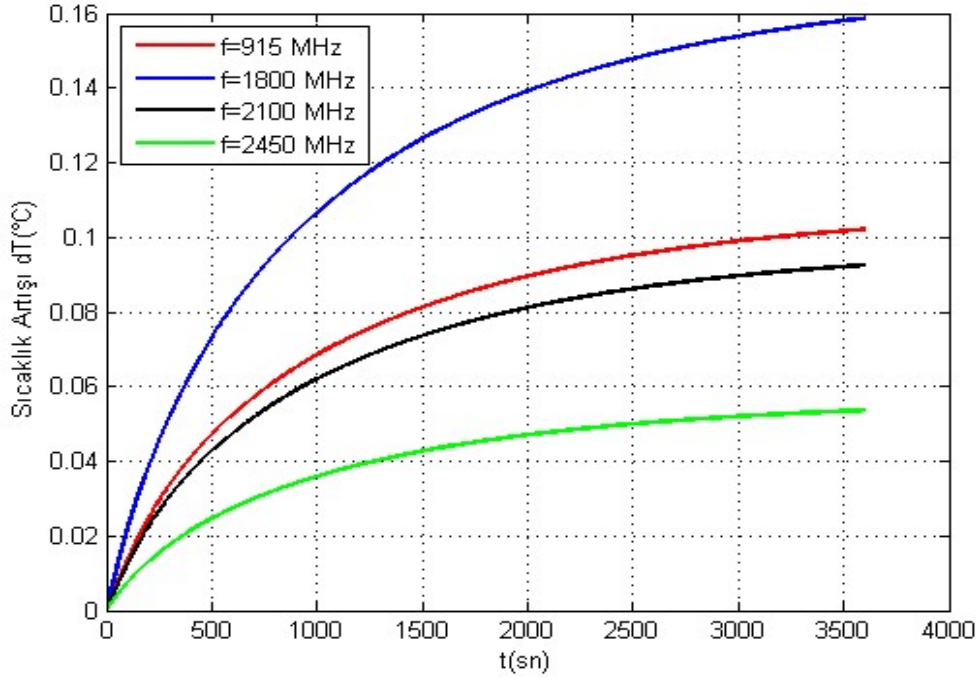
(d)

Grafik 4.7. Analitik çözümlere göre doku içindeki sıcaklık artışı ($t=1500$ sn. ve $P=10$ W/m^2) a) 915 MHz b) 1800 MHz c) 2100 MHz d) 2450 MHz

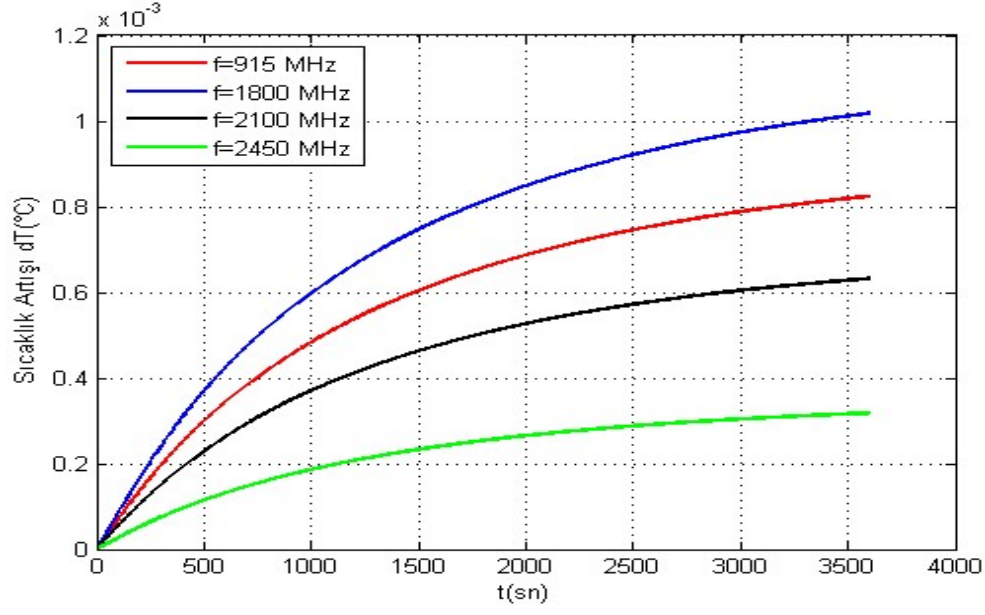
Analitik ve nümerik hesaplamalar yapılırken mikrodalga maruziyet süresi 1500 sn. olarak alınmıştır. Ancak bu maruziyet süresinin daha uzun olması durumunda deri dokusunda meydana gelen sıcaklık artışının zamanla değişimi Grafik 4.8’de gösterilmiştir.



(a)



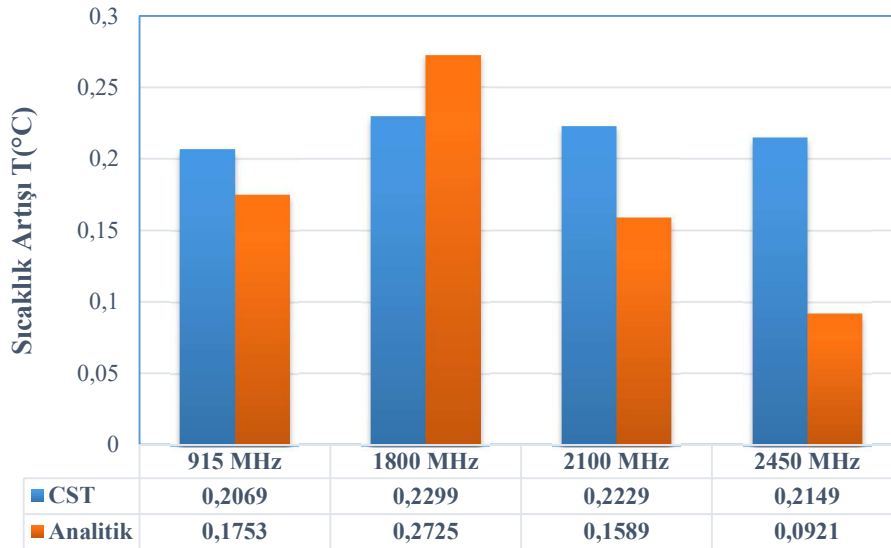
(b)



(c)

Grafik 4.8. Sıcaklık artışının zamana bağlı değişimi a) $x=1$ mm'de b) $x=6$ mm'de c) $x=21$ mm'de

Grafik 4.8'de görüldüğü üzere sıcaklık belirli bir süreye kadar lineer olarak artmakta, bu sürenin üzerine çıktığında ise sıcaklık artışı sabit kalmaktadır. Bunun sebebi doku içerisindeki kılcal damarların çok olması, dolayısıyla kan akışı yardımıyla sıcaklık artışının vücut ısıyla dengelenmesidir.



Grafik 4.9. CST ve analitik çözümlerden elde edilen sıcaklık artış değerleri

Grafik 4.9’da görüldüğü üzere dokuda meydana gelen sıcaklık artışına dair yapılan nümerik ve analitik çözümler karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar paralellik gösterse de sıcaklık değerlerinde farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebi nümerik ve analitik çözümlerin metot farklılıklarının olmasıdır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, endüstriyel mikrodalga kaynaklarına ait 915, 1800, 2100 ve 2450 MHz frekanslarında olası sızıntı durumlarında dokuda oluşabilecek SAR değeri ve sıcaklık artışı, çok katmanlı doku modeli üzerinde incelenmiştir. Hesaplamalar hem analitik olarak hem de nümerik olarak CST Microwave Studio ortamında yapılmıştır. Çok katmanlı doku modeli üzerinde yapılan simülasyon sonuçlarına göre 915 MHz frekansında meydana gelen bir mikrodalga sızıntısı, doku içine daha fazla nüfuz ederken yüksek frekanslarda deri yüzeyinde sınırlı kalmıştır. Dokularda indüklenen SAR değeri 1800 MHz frekansına kadar artmış ancak frekans arttıkça azalmaya başlamıştır. Sıcaklık artış değerleri ise çok fazla değişkenlik göstermemekle birlikte frekans artışıyla doğru orantılı olarak arttığı, maruziyet süresinin uzaması halinde kan akışına bağlı olarak sıcaklık artışının değişmediği gözlemlenmiştir. Elde edilen SAR ve sıcaklık artış değerleri ICNIRP, IEEE vb. kuruluşların belirlemiş olduğu limit değerlerle kıyaslanmış ve çıkan sonuçların limitlerin altında olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, ülkemizde endüstriyel mikrodalga tesislerinde çalışan işçileri mikrodalga maruziyetine karşı koruyan herhangi bir uygulama olmadığı gerçeği göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma, işçilerin can güvenliğini sağlayacak bir kıyafet veya buna benzer bir güvenlik önleminin “İş Sağlığı ve Güvenliği Yasası” kapsamında incelenmesi hususunda yardımcı bir kaynak olacaktır. İlerleyen çalışmalarda, mikrodalga frekans bölgesinde ve daha yüksek güç yoğunluğuna sahip elektromanyetik dalgalara maruziyet durumunda ne gibi koruyucu önlemler alınması gerektiği konuları tartışılacaktır.

6. KAYNAKLAR

- ABDULRAZZAQ, S.A. and AZIZ, J.S. (2013). SAR simulation in human head exposed to rf signals and safety precautions. *Int. J. Comput. Sci. Eng. Technol*, 3(9), 334-340.
- AHLBOM, A. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Phys*, 74.4, 494-522.
- AHMADIKIA, H., FAZLALI, R. and MORADI, A. (2012). Analytical solution of the parabolic and hyperbolic heat transfer equations with constant and transient heat flux conditions on skin tissue. *International communications in heat and mass transfer*, 39(1), 121-130.
- CHAKAROTHAI, J., KANAKO, W. and WATANABE, S. (2015, May). Evaluation of EM absorption characteristics in realistic adult and child models in vicinity of wireless power transfer systems. In *2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)* (pp. 448-451). IEEE.
- CHRIST, A., KLINGENBOCK, A. and KUSTER, N. (2005). Energy absorption in layered biological tissues in the near-and far-fields of the antennas of body-mounted devices. *Proc. General Assembly Int. URSI, Programme Oral Presentations*, New Dehi, India.
- DENG, Z. S. and LIU, J. (2002). Analytical study on bioheat transfer problems with spatial or transient heating on skin surface or inside biological bodies. *Journal of biomechanical engineering*, 124(6), 638-649.
- FENG, Q., ZHAO-YAN, H., ZHENG-KANG, Z. and LI-XING, S. (2006, January). The establishment of the mathematical model of the 2nd degree burn injury of human tissues and its application. In *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference* (pp. 2918-2921). IEEE.
- GABRIEL, C. (1996). *Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies*. King's College London (UK) Dept. Of Physics.
- GUSTRAU, F. and BAHR, A. (2002). W-band investigation of material parameters, SAR distribution, and thermal response in human tissue. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(10), 2393-2400.

- LIU, J., CHEN, X. and XU, L.X. (1999). New thermal wave aspects on burn evaluation of skin subjected to instantaneous heating. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46(4), 420-428.
- MASON, P.A., MURPHY, M.R. and PETERSEN, R.C. (2001). IEEE EMF health & safety standards. *Proc Asian Ocean Reg EMF Sci Meet*, 1-6.
- NAGESWARI, K.S. and SECTOR, B. (2003, October). Biological effects of microwaves and mobile telephony. In *Proceeding of the international conference on Non-Ionizing radiation (ICNIR 2003)* (pp. 20-22).
- NYBORG, W.L. (1988). Solutions of the bio-heat transfer equation. *Physics in medicine and biology*, 33(7), 785.
- OSEPCHUK, J.M. (2002). Microwave power applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 975-985.
- OZEN, S., HELHEL, S. and CEREZCI, O. (2008). Heat analysis of biological tissue exposed to microwave by using thermal wave model of bio-heat transfer (TWMBT). *Burns: journal of the International Society for Burn Injuries*, 34(1), 45-49.
- PENNES, H.H. (1948). Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of applied physiology*, 1(2), 93-122.
- SABBAH, A.I., DIB, N.I. and AL-NIMR, M.D.A. (2010). SAR and temperature elevation in a multi-layered human head model due to an obliquely incident plane wave. *Progress In Electromagnetics Research M*, 13, 95-108.
- SABBAH, A.I., DIB, N.I. and AL-NIMR, M.A. (2011). Evaluation of specific absorption rate and temperature elevation in a multi-layered human head model exposed to radio frequency radiation using the finite-difference time domain method. *IET microwaves, antennas & propagation*, 5(9), 1073-1080.
- SHARMA, P.R. ALI, S. and KATIYAR, V.K. (2009). Transient heat transfer analysis on skin surface and inside biological tissue. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 5(5), 36-47.
- SHIH, T.C., YUAN, P., LIN, W.L. and KOU, H.S. (2007). Analytical analysis of the Pennes bioheat transfer equation with sinusoidal heat flux condition on skin surface. *Medical Engineering & Physics*, 29(9), 946-953.

- SIRIWITPREECHA, A., RATTANADECHO, P. and WESSAPAN, T. (2013). The influence of wave propagation mode on specific absorption rate and heat transfer in human body exposed to electromagnetic wave. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 423-434.
- WESSAPAN, T., SRISAWATDHISUKUL, S. and RATTANADECHO, P. (2011). The effects of dielectric shield on specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave energy. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(2), 255-262.
- WESSAPAN, T., SRISAWATDHISUKUL, S. and RATTANADECHO, P. (2011). Numerical analysis of specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage electromagnetic field at 915 MHz and 2450 MHz. *Journal of Heat Transfer*, 133(5), 051101.
- XUAN, Y. and ROETZEL, W. (1997). Bioheat equation of the human thermal system. *Chemical engineering & technology*, 20(4), 268-276.
- ZHU, F. L. and ZHANG, W.Y. (2006). Evaluation of thermal performance of flame-resistant fabrics considering thermal wave influence in human skin model. *Journal of fire sciences*, 24(6), 465-485.

7. EKLER

SAR Analizi Matlab Kodları

```
%KATMANLI DOKU DÜZLEM DALGA SAR HESABI SKIN-FAT-MUSCLE-KIDNEY  
%SAR CALCULATION OF MULTILAYERED TISSUE WITH PLANE WAVE  
%SKIN-FAT-MUSCLE-KIDNEY
```

```
clear all  
clc  
Eo=61.4;%V/m  
f=915e6; %Hz
```

```
%Dokuların dielektrik ve iletkenlik sabitleri
```

```
ep_air=1;  
sig_air=0;
```

```
ep_skin=41.329;  
sig_skin=0.871733;
```

```
ep_fat=5.4596;  
sig_fat=0.051398;
```

```
ep_muscle=54.996933;  
sig_muscle=0.948091;
```

```
ep_kidney=58.557178;  
sig_kidney=1.400791;
```

```
%resolution for plotting  
res=0.001;  
%distance to center of tissue  
total_dist=0.09208;  
%distance to antenna from head  
dist_ant=0.03;
```

```
%d_skin  
d2=0.00208;  
%d_fat  
d3=0.01;  
%d_muscle  
d4=0.03;  
%d_kidney  
d5 =0.05;
```

```
w=2*pi*f;  
mu=1;  
muo=4*pi*1e-7;  
epo=8.854e-12;
```

```
gamma2 = sqrt(1i*w*mu*muo*(sig_skin+1i*w*ep_skin*epo));  
gamma3 = sqrt(1i*w*mu*muo*(sig_fat+1i*w*ep_fat*epo));  
gamma4 = sqrt(1i*w*mu*muo*(sig_muscle+1i*w*ep_muscle*epo));
```

```

gamma5 = sqrt(1i*w*mu*muo*(sig_kidney+1i*w*ep_kidney*epo));

Beta2 = imag(gamma2);
Beta3 = imag(gamma3);
Beta4 = imag(gamma4);
Beta5 = imag(gamma5);

%eta_air
eta1=377;
%eta_skin
eta2 = sqrt((mu*muo)/(ep_skin*epo-1i*(sig_skin/w)));
%eta_fat
eta3 = sqrt((mu*muo)/(ep_fat*epo-1i*(sig_fat/w)));
%eta_muscle
eta4 = sqrt((mu*muo)/(ep_muscle*epo-1i*(sig_muscle/w)));
%eta_kidney
eta5 = sqrt((mu*muo)/(ep_kidney*epo-1i*(sig_kidney/w)));

%Transformed Impedance

eta45=eta4*(eta5+1i*eta4*tan(Beta4*d4))/(eta4+1i*eta5*tan(Beta4*d4));
eta345=eta3*(eta45+1i*eta3*tan(Beta3*d3))/(eta3+1i*eta45*tan(Beta3*d3));
eta2345=eta2*(eta345+1i*eta2*tan(Beta2*d2))/(eta2+1i*eta345*tan(Beta2*d2));

etaeff=(eta2345-eta1)/(eta2345+eta1);

%iletim katsayıları

T1=(eta2345*2)/(eta2345+eta1);
T2=(eta345*2)/(eta345+eta2);
T3=(eta45*2)/(eta45+eta3);
T4=(eta5*2)/(eta5+eta4);

%Electric Field in layers...
z=[0:.0001:dist_ant];
E_air=Eo*ones(1,length(z));

z=[0:res:d2];
E_skin=(abs(T1)*E_air(end))*exp(-real(gamma2*z));

z=[0:res:d3];
E_fat= E_skin(end)*abs(T2)*exp(-real(gamma3*z));

z=[0:res:d4];
E_muscle= E_fat(end)*abs(T3)*exp(-real(gamma4*z));

z=[0:res:d5];
E_kidney= E_muscle(end)*abs(T4)*exp(-real(gamma5*z));

%SAR Values in Layers

S_air = sig_air*abs(E_air).^2./2.408;
S_skin =sig_skin*abs(E_skin).^2./2200;
S_fat=sig_fat*abs(E_fat).^2./1820;

```

```

S_muscle =sig_muscle*abs(E_muscle).^2./2082;
S_kidney=sig_kidney*abs(E_kidney).^2./2040;

S = [S_skin S_fat S_muscle S_kidney ];

plot(S,'r','linewidth',1.5);

grid;
%title('Relative Magnitude of Power in DEW');
xlabel('distance z[mm]');
ylabel('SAR [W/kg]');
hold on;

%title('Frekanssa Göre SAR Değişimi');
xlabel('x (mm) ');
ylabel('SAR (W/kg) ');

```

Sıcaklık Analizi Matlab Kodları

```

clear
clc

Eo=61.4;%V/m
f=915e6; %Hz

%Dielectric and Thermal Properties of Tissues

ep_air=1;
sig_air=0;

ep_skin=41.329;
sig_skin=0.871733;
Wb1=0.5; %kg/m3.s
Cb1=4200; %J/kg.°C
K1=0.293; %W/m.°C
L1=0.092; %dokunun toplam kalınlığı
p1=1100; %kg/m3
alfa1=K1/(p1*Cb1);

ep_fat=11.327779;
sig_fat=0.110212;
Wb2=0.5; %kg/m3.s
Cb2=4200; %J/kg.°C
K2=0.201; %W/m.°C
L2=0.092; %dokunun toplam kalınlığı
p2=910; %kg/m3
alfa2=K2/(p2*Cb2);

ep_muscle=56.844746;
sig_muscle=1.001017;
Wb3=0.5; %kg/m3.s
Cb3=4200; %J/kg.°C

```

```

K3=0.53; %W/m.°C
L3=0.092; %dokunun toplam kalınlığı
p3=1041; %kg/m3
alfa3=K3/(p3*Cb3);

ep_kidney=58.557178;
sig_kidney=1.400791;
Wb4=0.5; %kg/m3.s
Cb4=4200; %J/kg.°C
K4=0.499; %W/m.°C
L4=0.092; %dokunun toplam kalınlığı
p4=1020; %kg/m3
alfa4=K4/(p4*Cb4);

t=1500;
nu=500; %m^(-1)
q0=0; %deri yüzeyi sıcaklık yükselişi °C
N=100;

%resolution for plotting
res=0.001;
%distance to center of tissue
total_dist=0.09208;
%distance to antenna from head
dist_ant=0.03;

%d_skin
d2=0.00208;
%d_fat
d3=0.01;
%d_muscle
d4=0.03;
%d_kidney
d5 =0.05;

w=2*pi*f;
mu=1;
muo=4*pi*1e-7;
epo=8.854e-12;

gamma2 = sqrt(li*w*mu*muo*(sig_skin+li*w*ep_skin*epo));
gamma3 = sqrt(li*w*mu*muo*(sig_fat+li*w*ep_fat*epo));
gamma4 = sqrt(li*w*mu*muo*(sig_muscle+li*w*ep_muscle*epo));
gamma5 = sqrt(li*w*mu*muo*(sig_kidney+li*w*ep_kidney*epo));

Beta2 = imag(gamma2);
Beta3 = imag(gamma3);
Beta4 = imag(gamma4);
Beta5 = imag(gamma5);

%eta_air
eta1=377;
%eta_skin
eta2 = sqrt((mu*muo)/(ep_skin*epo-li*(sig_skin/w)));
%eta_fat
eta3 = sqrt((mu*muo)/(ep_fat*epo-li*(sig_fat/w)));

```



```

%eta_muscle
eta4 = sqrt((mu*muo)/(ep_muscle*epo-li*(sig_muscle/w)));
%eta_kidney
eta5 = sqrt((mu*muo)/(ep_kidney*epo-li*(sig_kidney/w)));

%Transformed Impedances

eta45=eta4*(eta5+li*eta4*tan(Beta4*d4))/(eta4+li*eta5*tan(Beta4*d4));
eta345=eta3*(eta45+li*eta3*tan(Beta3*d3))/(eta3+li*eta45*tan(Beta3*d3)
);
eta2345=eta2*(eta345+li*eta2*tan(Beta2*d2))/(eta2+li*eta345*tan(Beta2*
d2));

etaeff=(eta2345-eta1)/(eta2345+eta1);

%Transmission Coefficients

T1=(eta2345*2)/(eta2345+eta1);
T2=(eta345*2)/(eta345+eta2);
T3=(eta45*2)/(eta45+eta3);
T4=(eta5*2)/(eta5+eta4);

%Electric Field in layers...

z=[0:.0001:dist_ant];
E_air=Eo*ones(1,length(z));

z=[0:res:d2];
E_skin=(abs(T1)*E_air(end))*exp(-real(gamma2*z));

z=[0:res:d3];
E_fat=E_skin(end)*abs(T2)*exp(-real(gamma3*z));

z=[0:res:d4];
E_muscle=E_fat(end)*abs(T3)*exp(-real(gamma4*z));

z=[0:res:d5];
E_kidney=E_muscle(end)*abs(T4)*exp(-real(gamma5*z));

%Power Density in Layers

P_skin=max(E_skin)^2/abs(eta2);
P_fat=max(E_fat)^2/abs(eta3);
P_muscle=max(E_muscle)^2/abs(eta4);
P_kidney=max(E_kidney)^2/abs(eta5);

% T(x,t)
% _____

A1=zeros(0,N);
A2=zeros(0,N);
A3=zeros(0,N);
A4=zeros(0,N);
T_skin=zeros(0,10000);
T_fat=zeros(0,10000);

```

```

T_muscle=zeros(0,10000);
T_kidney=zeros(0,10000);

for x=1:2

for n=1:N

A1(n)=((-4*(nu*abs(P_skin)*exp(-nu*x*(10^-3))))./(Wb1*Cb1*(2*n-1)*pi)-(2*n-1)*(q0-(nu*abs(P_skin)*exp(-nu*x*(10^-3))))./(Wb1*Cb1))*pi./((Wb1*Cb1*L1.^2)./K1+((2*n-1)/2*pi).^2)*exp(-alfa1*((2*n-1).^2/(4*L1.^2)*pi.^2+(Wb1*Cb1)./K1)*t)*sin((n-0.5)*pi./L1*x*(10^-3));

end

T_skin(x)=(nu*abs(P_skin)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb1*Cb1)+(q0-(nu*abs(P_skin)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb1*Cb1))*cosh(sqrt((Wb1*Cb1)/K1)*(x*(10^-3)-L1))/cosh(sqrt(Wb1*Cb1/K1)*L1)+sum(A1);

end

for x=1:10

for n=1:N

A2(n)=((-4*(nu*abs(P_fat)*exp(-nu*x*(10^-3))))./(Wb2*Cb2*(2*n-1)*pi)-(2*n-1)*(q0-(nu*abs(P_fat)*exp(-nu*x*(10^-3))))./(Wb2*Cb2))*pi./((Wb2*Cb2*L2.^2)./K2+((2*n-1)/2*pi).^2)*exp(-alfa2*((2*n-1).^2/(4*L2.^2)*pi.^2+(Wb2*Cb2)./K2)*t)*sin((n-0.5)*pi./L2*x*(10^-3));

end

T_fat(x)=(nu*abs(P_fat)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb2*Cb2)+(q0-(nu*abs(P_fat)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb2*Cb2))*cosh(sqrt((Wb2*Cb2)/K2)*(x*(10^-3)-L2))/cosh(sqrt(Wb2*Cb2/K2)*L2)+sum(A2);

end

for x=1:30

for n=1:N

A3(n)=((-4*(nu*abs(P_muscle)*exp(-nu*x*(10^-3))))./(Wb3*Cb3*(2*n-1)*pi)-(2*n-1)*(q0-(nu*abs(P_muscle)*exp(-nu*x*(10^-3))))./(Wb3*Cb3))*pi./((Wb3*Cb3*L3.^2)./K3+((2*n-1)/2*pi).^2)*exp(-alfa3*((2*n-1).^2/(4*L3.^2)*pi.^2+(Wb3*Cb3)./K3)*t)*sin((n-0.5)*pi./L3*x*(10^-3));

```

```

end

T_muscle(x)=(nu*abs(P_muscle)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb3*Cb3)+(q0-
(nu*abs(P_muscle)*exp(-nu*x*(10^-
3)))/(Wb3*Cb3))*cosh(sqrt((Wb3*Cb3)/K3)*(x*(10^-3)-
L3))/cosh(sqrt(Wb3*Cb3/K3)*L3)+sum(A3);

end

for x=1:50

for n=1:N

A4(n)=((-4*(nu*abs(P_kidney)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb4*Cb4*(2*n-
1)*pi)-(2*n-1)*(q0-(nu*abs(P_kidney)*exp(-nu*x*(10^-
3)))/(Wb4*Cb4))*pi./((Wb4*Cb4*L4.^2)/K4+((2*n-1)/2*pi).^2))*exp(-
alfa4*(2*n-1).^2/(4*L4.^2)*pi.^2+(Wb4*Cb4)/K4)*t)*sin((n-
0.5)*pi./L4*x*(10^-3));

end

T_kidney(x)=(nu*abs(P_kidney)*exp(-nu*x*(10^-3)))/(Wb4*Cb4)+(q0-
(nu*abs(P_kidney)*exp(-nu*x*(10^-
3)))/(Wb4*Cb4))*cosh(sqrt((Wb4*Cb4)/K4)*(x*(10^-3)-
L4))/cosh(sqrt(Wb4*Cb4/K4)*L4)+sum(A4);

end

%x=[T_fat];
x=[T_skin T_fat T_muscle T_kidney ];
plot(x,'r','linewidth',1.5);

xlabel('x(mm)');
ylabel('Sıcaklık Artışı dT(°C)');
grid on;
hold on;

```

ÖZGEÇMİŞ

Tuğrul AYDOĞMUŞ 1991 yılında Anamur' da doğdu. İlk ve orta öğretimini Sivas'ta tamamladı. 2009 yılında girdiği Akdeniz Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği'nden 2013 yılında mezun oldu. 2013-2014 yılları arasında 07 PANELSAN Elektrik Pano İmalat ve Montaj Ltd. Şti.' de proje mühendisi olarak görev yaptı. 2014-2015 yılları arasında askerlik hizmetini yaptıktan sonra MABEL Mühendislik firmasında elektrik-elektronik mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen burada görev yapmaktadır.