

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BAZ İSTASYONU KAYNAKLI ÖZGÜL SOĞURMA ORANI: ÖLÇÜMLER
VE DEĞERLENDİRMELER**

AHMET TURGUT

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAMSUN
2019**

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Ahmet TURGUT tarafından hazırlanan “**BAZ İSTASYONU KAYNAKLI ÖZGÜL SOĞURMA ORANI: ÖLÇÜMLER VE DEĞERLENDİRMELER**” adlı tez çalışması 21/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman Dr. Öğr. Üyesi Begüm KORUNUR ENGİZ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

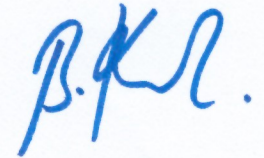
Başkan Doç. Dr. Levent SEYFİ
Konya Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Dr. Öğr. Üyesi Çetin KURNAZ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Dr. Öğr. Üyesi Begüm KORUNUR ENGİZ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım. .../.../2019

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

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

21/01/2019

Ahmet TURGUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAZ İSTASYONU KAYNAKLI ÖZGÜL SOĞURMA ORANI: ÖLÇÜMLER VE
DEĞERLENDİRMELER

Ahmet TURGUT

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Begüm KORUNUR ENGİZ

Özgül Soğurma Oranı olarak anten tasarım sürecinde önemli parametrelerden biridir. Bu yüksek lisans tezinde cep telefonlarından ayrı olarak baz istasyonlarının neden olduğu Özgül Soğurma Oranı değerleri, iki farklı frekansta kullanılan GSM Sinyal Üreteçleri yardımıyla standartlara uygun bir SAR laboratuvarında yapılan ölçümlerle elde edilmiştir. Bu laboratuvarın çalışma şekli ve ortam koşullarından standartlarla birlikte ayrıntılı bir şekilde bahsedilmiştir. CST STUDIO SUITE programında, laboratuvar ortamının benzetimi oluşturularak insan kafa bölgesinde bulunan farklı dokularda, farklı güçlerde oluşan Özgül Soğurma Oranı (SAR) değerleri gözlemlenmiştir. Bu değerler farklı hesaplamalı insan modellerinde tüm kafa bölgesi için ve deri, yağ, kas, beyin, göz dokuları için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Hesaplamalı insan modeli kullanılarak yapılan ölçümler sonrasında canlı denek veya kadavra kullanmaksızın BTK'nın belirlediği Elektrik Alan sınırlarının altında veya üzerindeki maruz kalma durumları SAR değeri açısından yapılan kıyaslamalarla değerlendirilmiştir.

Ocak 2019, 150 Sayfa

Anaktar Kelimeler: Elektrik Alan, Baz İstasyonu, CST STUDIO SUITE, SAR,
Fantom

ABSTRACT

Master's Thesis

MEASUREMENTS AND EVALUATIONS OF THE SAR VALUE FROM A BASE STATION

Ahmet TURGUT

Ondokuz Mayıs University

Graduate School of Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Assistant Professor BEGÜM KORUNUR ENGİZ

The specific absorption rate is one of the important parameters in the antenna design process. In this master thesis, specific absorption rate values which are caused by base stations separately from mobile phones were obtained by measurements made in a SAR laboratory according to standards with the help of GSM Signal Generators used in two different frequencies. The working conditions of this laboratory and the environmental conditions are discussed in detail together with the standards. In the CST STUDIO SUITE program, simulation of the laboratory environment was performed and specific absorption rate (SAR) values of different strengths were observed in different tissues in the human head region. These values were evaluated separately for whole head region and for skin, fat, muscle, brain and eye tissues in different computational human models. After the measurements made using the computational human model, exposure conditions below or above the boundaries of the Electric Field determined by the ICTA without the use of live subjects or cadavers were evaluated in terms of the SAR value.

January 2019, 150 Pages

Key Words: Electric Field, Base Station, CST STUDIO SUITE, SAR, Phantom

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimimin başlangıcından itibaren bilgisiyle yol gösteren, çalışmalarımın fikir aşamasında, planlanmasında ve gerçekleştirilmesinde vaktini ve emeğini esirgemeyen, önemli düşünce ve hayat tecrübelerinden sürekli olarak istifade ettiğim saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Sayın Dr.Öğr. Üyesi Begüm KORUNUR ENGİZ'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarımın başlangıcı ve gelişiminde, yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen ve desteğini her zaman hissettiğim değerli hocam Dr.Öğr. Üyesi Çetin KURNAZ'a,

Bilgilerinden ve çalışmalarından çokça istifade ettiğim Bilişim Uzmanı Yahya Emre GÜLERSOY'a,

Tüm hayatım boyunca her durumda bana güvenen, üzerimde büyük emekleri olan ve maddi manevi her anlamda desteklerini esirgemeyen anneme ve babama,

Bu yolda üzerimde emekleri olan ve beni destekleyen tüm iş arkadaşlarıma ve sevdiklerime çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, PYO.MUH.1904.18.008 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

Ocak 2019, Samsun

Ahmet TURGUT

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	15
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....	17
3. TEORİ VE METOD.....	41
4. ÖZGÜL SOĞURMA ORANI DENEYLERİ.....	44
4.2. REHBER DÖKÜMANLAR VE SAR LİMİTLERİ.....	44
4.2.1. IEEE C95.1-2005.....	44
4.2.2. ICNIRP REHBERİ.....	49
4.3. SAR Standardları.....	51
4.3.1. IEC Standardları.....	51
4.3.2. CENELEC Standardları.....	52
4.3.3. IEEE Standardları.....	53
4.4. Türkiye’de Mevcut Standardlar ve Limit Değer.....	54
4.4.1. Türkiye’nin SAR Laboratuvarı Açısından Mevcut Durumu.....	54
4.4.2. PGM SAR Laboratuvarı Kapasitesi.....	55
4.4.2.1. Hazırlık Deneyleri.....	55
4.4.2.2. SAR Deneyi (900 MHz).....	55
4.5. SAR Değerlerinin Ölçülmesi.....	56
4.5.1. SAR Sistemi Ölçüm Elemanları.....	57
4.5.1.1. Yazılım.....	57
4.5.1.2. Veri Alma Sistemi.....	58
4.5.1.3. Tarama Sistemi.....	60
4.5.1.4. Fantom ve Cihazların Hizalanması.....	61
4.5.1.5. Sıvı Kalibrasyon Ölçümü.....	62
4.5.1.6. Sistem Kontrol ve Doğrulama Deneyi.....	65
4.5.1.7. Deney şartlarının kontrolü.....	66
4.5.1.8. Numune cihazın haberleşmesi.....	66
4.5.1.9. SAR Odası.....	67
4.5.2. SAR Hazırlık Deneyleri.....	68
4.5.2.1. Sıvı Kalibrasyon Deneyi.....	68
4.5.2.2. Gürültü Deneyi.....	70
4.5.2.3. Sistem Kontrol ve Doğrulama Ölçümü.....	70
4.5.3. SAR Deneyi.....	71
4.5.3.1. Baş Ölçümleri.....	71
4.5.3.2. SAR Deneyinin Sonuç Değerleri ve Değerlendirilmesi.....	75
4.5.4. Vücut Ölçümleri.....	76
5. 900 MHZ VE 1800 MHZ’DE GSM SİNYAL ÜRETECİ İLE YAPILAN SAR ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	78
5.1. 900 MHz’de Çalışan GSM Sinyal Üretici SAR Ölçümü.....	78

5.1.1. 900 MHz ve 1800 MHz’de Çalışan GSM Sinyal Üreteçleri için Sıvı kalibrasyon deneyi	79
5.1.2. 900 MHz ve 1800 MHz’de Çalışan GSM Sinyal Üreteçleri için Doğrulama deneyi.....	80
5.1.3. 900 MHz ve 1800 MHz GSM Sinyal Jeneratötörü SAR Değeri Sonuçları	84
5.1.4. 1800 Mhz GSM Simülatörü SAR Değeri Sonuçları	87
6. CST PROGRAMI	90
6.1. Zaman Alanında Elektromanyetik Alan Simülasyonu Algoritması.....	90
6.1.1. Maxwell Denklemleri ve Sonlu Entegrasyon Tekniği	90
6.2. CST STUDIO SUITE Programında PGM SAR Laboratuvar Ortamının Gerçekleştirilmesi	97
6.2.1. CST STUDIO SUITE Programında Kullanılan Antenler	98
6.2.1.1. 900 MHz Monopol Anten	98
6.2.1.2. 1800 MHz Monopol Anten	99
6.2.2. 900 MHz ve 1800 MHz SAM.....	99
6.2.3. CST STUDIO SUITE Programında SAR Ölçüm Düzenekinin Kurulması	102
6.2.4. Hesaplamalı İnsan Modelleri	103
6.2.4.1. Voxel Tabanlı İnsan Modelleri	105
6.2.4.2. Biyolojik Dokuların Dielektrik Özellikleri	107
7. HESAPLAMALI İNSAN MODELİ KULLANILARAK SAR HESAPLAMA. 109	
7.1. Sabit Güçte Laboratuvarda Oluşturulan Benzetim	111
7.2. Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi İhmal Edildiğinde Beyin Dokusu SAR Değerleri.....	113
7.3. Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi Dikkate Alınarak Beyin Dokusu SAR Değerleri.....	115
7.5.Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi Dikkate Alınarak Gustav’daki Farklı Dokularda SAR Değerleri	120
7.6. Altı Farklı Güç Değerinde Diğer Dokuların Etkisi İhmal Edildiğinde Gustav Deri Dokusu SAR Değerleri	122
7.7. Altı Farklı Güç Değerinde Diğer Dokuların Etkisi Dikkate Alınarak Gustav Deri Dokusunda SAR Değerleri.....	124
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	144

SİMGELER VE KISALTMALAR

σ	Electric Conductivity (İletkenlik Sabiti)
ϵ	Dielectric Constant (Dielektrik Sabiti)
E	Electric Field (Elektrik Alan)
ρ	Mass Density (Kütlesel Yoğunluk)
W	Power (Güç)
r	Relative Component (Bağıl Bileşen)
ω	Angular Frequency (Açısal Frekans)
3G	Third Generation Mobile Service (Üçüncü Nesil Mobil Hizmetler)
AB	Avrupa Birliği
ASA	American Standards Association (Amerikan Standardlar Birliği)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ANSI	American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standardlar Enstitüsü)
BTK	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (Information Technologies and Communication Authority)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Avrupa Elektroteknik Standardlar Komitesi)
CAS	Chemical Abstract Service (Kimyasal içerik Hizmeti)
DGBE	Diethylene Glykol Monobutyl Ether
EA	European Accreditation (Avrupa Akreditasyon Birliği)
EMC	Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)
EMF	Electro Magnetic Field (Elektromanyetik Alan)
EN	European Norm (Avrupa Normu)

FCC	Federal Communications Commission (ABD Federal Komünikasyon Komisyonu)
FDTD	Finite-difference time-domain (Sonlu-Fark Zaman Domeni)
GSM	Global System for Mobile Communications (Küresel Mobil İletişim Sistemi)
IEC	International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
ICNIRP	International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (Uluslararası İyonlaşmayan Radyasyon Korunma Komisyonu)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IT	Information Technology (Bilgi Teknolojisi)
ICES	International Committee on Electromagnetic Safety (Uluslararası Elektromanyetik Güvenlik Komitesi)
IRPA	International Radiation Protection Association (Uluslararası Radyasyon Korunma Birliği)
NCRP	National Council on Radiation Protection (Ulusal Radyasyon Koruma Konseyi)
OET	Office of Engineering and Technology (FCC Mühendislik ve Teknoloji Ofisi)
PDA	Personal Digital Assistant (Kişisel Sayısal Yardımcı)
PGD	PGD Market Surveillance and Inspection (MSI)
PTT	Push To Talk (Bas Konuş)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekans)
RPG	Radiation Protection Guide (Radyasyon Korunma Rehberi)
RFPG	Radio Frequency Protection Guides (Radyofrekans Korunma Rehberleri)
SA	Specific Absorption (Özgül Soğurma)
SAR	Specific Absorption Rate (Özgül Soğurma Oranı)
SAM	Specific Anthropomorphic Mannequin (Özgül İnsan Biçiminde Model)

TSE	Türk Standardları Enstitüsü (Turkish Standards Institution)
TC	Technical Committee (Teknik Komite)
US	Uyumlaştırılmış Standard
USAS	Unieted Stades of America Standards (ABD Standardları)
VNA	Vector Network Analyzer (Vektör Şebeke Analizörü)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. SAR sistemi yazılım bağlantılar.....	59
Şekil 4.2. (a) E alan prob lar (b) Robot-panel-prob-voltmetre.....	60
Şekil 4.3. E alan probu iç yapısı.....	60
Şekil 4.4. (a) Dipol Sensör, (b) E alan probu	61
Şekil 4.5. (a) (x, y, z) Eksenlerinde robot ve fantom ölçüm düzeneği (b) PGM Laboratuvarı tarama sisteminin genel görüntüsü	61
Şekil 4.6. (a) İkiz fantom modeli, (b) Tam kafa fantom modeli	62
Şekil 4.7. İkiz fantom modeli alttan görünüş.....	63
Şekil 4.8. Cihaz hizalanması.....	63
Şekil 4.9. Triton X-100 kimyasal gösterimi.....	64
Şekil 4.10. DGBE kimyasal gösterimi.....	64
Şekil 4.11. 1,2 Propanediol kimyasal gösterimi.....	65
Şekil 4.12. Vektör Network Analizör.....	65
Şekil 4.13. Dipol anten.....	66
Şekil 4.14. Doğrulama deneyi elemanları (Sinyal Üretci, 2.Amplifier, 3.Kuplör, 4.Güçmetre ve Güçsensörü, 5. Dipol Anten).....	66
Şekil 4.15. PGM SAR sisteminde kullanılan problu termometre.....	67
Şekil 4.16. SAR odası ve sistemin genel görünüşü.....	68
Şekil 4.17. Fantoma konulan sıvı derinliği.....	70
Şekil 4.18. SAR ölçüm düzeneği.....	71
Şekil 4.19. 900MHz ve 1800 MHz’de çalışan GSM Sinyal Üreteçleri.....	72
Şekil 4.20. GSM Sinyal Jenaratörü anteninin fantoma hizalanması.....	73
Şekil 4.21. SAR sıvısı sıcaklık kontrolü.....	73
Şekil 4.22. Yazılımdaki tarama yolları ve menüler.....	74

Şekil 4.23. 3 boyutlu küp taramasında izlenen yollar.....	75
Şekil 4.24. Deney sonrası SAR yoğunluğunun kesit olarak gösterimi.....	75
Şekil 4.25. Z eksenini boyunca SAR değerleri.....	76
Şekil 4.26. Vücut SAR ölçümü deney düzeneği.....	78
Şekil 4.27. Vücut SAR ölçümü düz fantom tarama yolları.....	78
Şekil 5.1. SAR Ölçümünde kullanılan OpenSAR yazılımı Arayüzü.....	80
Şekil 5.2. Doku fantom sıvısından numune alınması.....	81
Şekil 5.3. 900 MHz ve 1800 MHz de yapılan sıvı kalibrasyonu sonuçları.....	81
Şekil 5.4. Labaoratuvarında bulunan dipol antenlerin genel görüntüsü.....	82
Şekil 5.5. Dipol anten mesafe ayrı.....	82
Şekil 5.6. PGM SAR Laboratuvarında 900 MHz, 1800 MHz ve 2000 MHz Frekanslarında Kullanılan Dipol Antenler	83
Şekil 5.7. Ölçümlerden elde edilen hacim taraması görüntüsü.....	84
Şekil 5.8. Ölçümlerden elde edilen yüzey taraması görüntüsü.....	84
Şekil 5.9. 500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	85
Şekil 5.10. 1000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	85
Şekil 5.11. 1500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	86
Şekil 5.12. 2000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	86
Şekil 5.13. 3000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	87
Şekil 5.14. 4000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	87
Şekil 5.15. 250 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	88
Şekil 5.16. 500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	88
Şekil 5.17. 1000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	89
Şekil 5.18. 1250 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	89
Şekil 5.19. 1500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	90
Şekil 5.20. 2000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri.....	90

Şekil 6.1. Altı yüzlü ızgara hücresi.....	94
Şekil 6.2. Bir n yüzeyinde gösterilen Faraday yasasının ayrıklaştırılması.....	95
Şekil 6.3. Bir n ikili ızgara yüzeyinde Ampere yasasının ayrıklaştırılması.....	96
Şekil 6.4. Gauss'un manyetizma yasasının birincil bir ızgara hücresinde ayrıklaştırılması.....	97
Şekil 6.5. Gauss yasasının çift ızgaralı bir hücreye ayrılması.....	98
Şekil 6.6. 900 MHz de yapılan simülasyonlarda kullanılan monopo anten.....	99
Şekil 6.7. 900 MHz monopol anten s_{11} parametresi.....	99
Şekil 6.8. 1800 MHz de yapılan simülasyonlarda kullanılan monopol anten....	100
Şekil 6.9. 1800 MHz monopol anten s_{11} parametresi.....	100
Şekil 6.10. 900 MHz ve 1800 MHz de SAM 'in bağıl geçirgenlik grafiği.....	101
Şekil 6.11. 900 MHz ve 1800 MHz de SAM 'in elektrik iletkenlik değerleri...	101
Şekil 6.12. CST STUDIO SUITE Programında kullanılan SAM örneği.....	102
Şekil. 6.13. 900 MHz de Monopol anten ve SAM fantomu ile kurulan deney düzeneği.....	103
Şekil.6.14. 1800 MHz de Monopol anten ve SAM fantomu ile kurulan deney düzeneği.....	104
Şekil 6.15. Farklı voksel şekillerini içeren Voxel tabanlı insan kafa fantomları.....	105
Şekil 6.16. Görünür insan erkek- donuk kesit ve dondurulduktan sonra yapılan CT taraması.....	108
Şekil 6.17. CST Voksel Ailesi.....	108
Şekil 7.1. Gustav hesaplamalı isan modelinin kafa bölgesinin vücuttan ayrılması.....	111
Şekil 7.2. 900 MHz 'de Gustav, Laura, Child , Baby için, tüm kafa SAR (10 gr) hesaplamaları.....	113
Şekil 7.3. 1800 MHz 'de Gustav, Laura , Child, Baby için, tüm kafa SAR (10 gr) hesaplamaları.....	114

Şekil 7.4. 900 MHz ‘de Gustav, Laura, Child , Baby için, beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplamaları.....	115
Şekil 7.5. 900 MHz ‘de Gustav, Laura, Child, Baby için, beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplamaları.....	116
Şekil 7.6. 900 MHz ‘de Gustav, Laura, Child, Baby için, diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında alınan beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	117
Şekil 7.7. 1800 MHz ‘de Gustav, Laura, Child, Baby için, diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında alınan beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	118
Şekil 7.8. 900 MHz ‘de Gustav hesaplamalı insan modelinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınmayarak elde edilen beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	119
Şekil 7.9. 1800 MHz ‘de Gustav hesaplamalı insan modelinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınmayarak elde edilen beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu, deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	120
Şekil 7.10. 900 MHz ‘de ve Sabit güç değerinde diğer dokuların etkisi hesaba katılarak Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan, beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu, deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	121
Şekil 7.11. 1800 MHz ‘de ve Sabit güç değerinde diğer dokuların etkisi hesaba katılarak Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu, deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	122
Şekil 7.12. 900 MHz ‘de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate almayarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	124
Şekil 7.13. 1800 MHz ‘de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate almayarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	125
Şekil 7.14. 900 MHz ‘de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate alınarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	126
Şekil 7.15. 1800 MHz ‘de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate alınarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri.....	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. ANSI C95.1-1982 ile NCRP Raporu 86 Değer Tablosu.....	49
Çizelge 4.2. ICNIRP ile IEEE C95.1-2005 Değer Tablosu.....	51
Çizelge 4.3. Dünya genelinde halk maruz kalımı için kullanılan SAR limitleri...	52
Çizelge 4.4. 2019 yılı itibariyle geçerli standartlar, kapsam ve durumları	55
Çizelge 4.5. PGM SAR laboratuvarında kullanılan SAR sıvısı bileşenleri....	64
Çizelge 4.6. PGM SAR Sistemi Ekipmanlar.....	68
Çizelge 4.7. Frekansa bağlı dielektrik sabiti ve iletkenlik	70
Çizelge 4.8. Ortam ve tek bir cihaz için belirlenen sınır değerler.....	77
Çizelge 5.1. 500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	85
Çizelge 5.2. 1000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	85
Çizelge 5.3. 1500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	86
Çizelge 5.4. 2000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	86
Çizelge 5.5. 3000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	87
Çizelge 5.6. 4000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	87
Çizelge 5.7. 250 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	88
Çizelge 5.8. 500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	88
Çizelge 5.9. 1000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	89
Çizelge 5.10. 1250 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	89
Çizelge 5.11. 1500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	90
Çizelge 5.12. 2000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri.....	90

Çizelge 6.1. 900 MHz ve 1800 MHz’de SAM’in bağıl geçirgenlik ve iletkenlik değerleri.....	101
Çizelge 6.2. 900 MHz’de Laboratuvarda kullanılan doku örnek sıvısının ve SAM’in bağıl geçirgenlik değerleri.....	102
Çizelge 6.3. 1800 MHz’de Laboratuvarda kullanılan doku örnek sıvısının ve SAM’in bağıl geçirgenlik değerleri.....	102
Çizelge 6.4. 900 MHz ve 1800 MHz’de Laboratuvarda kullanılan doku örnek sıvısının ve SAM’in iletkenlik değerleri.....	103
Çizelge 6.6. CST voksel ailesi karakteristikleri.....	108
Çizelge 7.1. 900 MHz’de SAR Laboratuvarında ölçülen SAR değerleri ve bu değerlere karşılık gelen E değerleri	110
Çizelge 7.2. 1800 MHz’de SAR Laboratuvarında ölçülen SAR değerleri ve bu değerlere karşılık gelen E değerleri	110

1. GİRİŞ

Kablosuz cihazların kullanımının ciddi bir şekilde artmasıyla, buna paralel olarak ürünlerin, kullanıcıları zararlı seviyelere maruz bırakmadıklarından emin olma ihtiyacı da giderek artmaktadır. Söz konusu cihazların çalıştığı frekanslarda, sağlık etkisi doku ısınması olarak bilinmekte ve bu ısınma etkisinin ölçüsü ise Özgül Soğurma Oranı (SAR) olarak tanımlanmaktadır.

SAR değerlerinin ölçülmesi için Dünya’da geniş boyutta çalışmalar yapılmış, ilk dönemler canlı denek hayvanlar kullanılırken, zaman içerisinde gelişen teknoloji ile insan ve hayvan blok modelleri üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Bunun sonucu olarak, Uluslararası İyonlaşmayan Radyasyon Korunma Komisyonu (ICNIRP) ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) Uluslararası kurumlarınca SAR limit değerleri belirlenmiştir.

Türkiye’de ise SAR değeri limitleri Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) tarafından belirlenmektedir. BTK SAR limitleri için ICNIRP nin standartlarını uygulamakta, Piyasa Gözetim Laboratuvarı Müdürlüğü (PGM) kapsamında bulunan SAR laboratuvarında mobil telefonlara, AB standartlarına göre yapılan deneyler uygulayarak ve Avrupa Birliği (AB) Konsey Kararıyla kabul edilmiş ICNIRP limitlerine uygun olup olmadığı denetlenmektedir.

PGM SAR Laboratuvarı’nın Türkiye için önemi oldukça büyüktür. Zira, Türkiye’de iki adet SAR Laboratuvarı bulunmaktadır. Bu laboratuvarlardan biri, BTK bünyesinde bulunan PGM SAR laboratuvarıdır. Birçok ülke otoritesinin SAR laboratuvarına sahip olmaması, Dünya’da üreticilerin mobil telefonları için SAR değerlerinin ölçümüne gereksinim duymaları, kamuoyunun SAR konusunda artan bilgi ihtiyacı, PGM SAR laboratuvarının önemini daha da artırmaktadır.

İyonlaştırıcı olmayan ışıyım kaynaklarından olan baz istasyonları, cep telefonu iletişimi için gerekli radyo bağlantısını sağlayan temel radyo verici ve alıcılardır. Bunlar, televizyon ve radyo yayınındaki kullanıma benzer şekilde radyo işaretleri kullanan, bir direk veya bina üzerinde kurulan antenlere sahiptir. Bu antenlerin yaydığı işaretlerin erişebildiği alana, kapsama alanı denilmektedir. Cep telefonu kullanıcıları kapsama alanı içindeki çağrılarını antenlerin yaydığı veya aldığı elektromanyetik dalga vasıtasıyla birbirlerine iletmektedir. Hücresel Haberleşme Sisteminde; Tüm

kapsama alanı hücre denilen küçük fiziksel alanlara bölünmüştür. Her bir hücrede haberleşmeyi sağlayan baz istasyonu bulunmaktadır.

Baz istasyonlarından kaynaklı EM ışınımın etkisi ısı etki ve ısı olmayan etki olarak ikiye ayrılmaktadır. Isıl etki; iletkenliğe bağlı olarak insanlarda ve diğer canlılarda vücudun, cansızlarda ise yapının ısınmasına neden olmaktadır. Isıl etki bilimsel olarak doğrulandığı için EM ışınımın büyüklüğü konusunda sınırlamalar getirilmiştir. Genel halk sağlığı için insanların maruz kalabileceği elektromanyetik ışınımın sınır değeri ICNIRP tarafından 900 MHz GSM frekansında Elektrik Alan Şiddetinin E (V/m) sınır değeri tek cihaz için 8.25 V/m, 1800 MHz için 11.66 V/m, olarak belirlenmiştir. BTK “Elektronik Haberleşme Cihazlarına Güvelik Sertifikası Düzenlenmesine İlişkin Yönetmelik” ile Türkiye’deki sınır değerleri 2001 yılından beri belirlemektedir. Buna göre baz istasyonlarından yayılan EM alan seviyesinin, uluslararası kılavuzlarda (ICNIRP) belirtilen elektrik alan seviyelerinden cihaz başına 4 kat daha düşük olmasını şart koşmaktadır. Ancak yapılan ölçümlerde bu değerlerin üzerinde Elektromanyetik Alan (EMA) değerleri görülebilmektedir.

Yukarıda belirtilen limit seviyeler çok fazla aşıldığı takdirde, EM alanın yoğunluğuna ve maruz kalma zamanına bağlı olarak insan sağlığına olumsuz etkilerin olabileceği belirtilmektedir.

Bu Yüksek Lisans Tezi’nde, baz istasyonlarından kaynaklı olan SAR değeri gerçek laboratuvar koşullarında ölçülerek, CST (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi) nin CST STUDIO SUITE programı ile laboratuvar ortamının benzetimi oluşturulmuştur. CST STUDIO SUITE programı tarafından birçok sayısal yöntem kullanılabilmektedir ancak bu çalışmada sayısal yöntem olarak Sonlu Entegrasyon Tekniği yöntemi (FIT) kullanılmıştır. Bu yöntemle birlikte sayısal insan modelleri kullanılarak SAR hesabı; farklı cinsiyet, yaş, boy ve kiloda tüm kafa için ve kafada bulunan beş farklı doku için, altı farklı güç değerinde, ayrı ayrı yapılmıştır. Bunun sonucunda, hem farklı insan modellerinde bulunan aynı dokularda hem de tek bir birey için, bireyde bulunan farklı dokularda elektromanyetik alandan etkilenme durumu SAR değeri açısından incelenmiştir. Bununla birlikte SAR ölçümü yapılan laboratuvar ve kullanılan hesaplamalı insan modelleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

(Gong vd, 2017)'de Hong Kong Çin Üniversitesi'ndeki ilk Çin Elektromanyetik İnsan Modelinin (CEMHM) gelişiminden bahsedilmiştir. Model, kablosuz bir cihazın RF radyasyonundan kaynaklanan pratik biyolojik etkiyi ortaya çıkarmak için herhangi bir elektromanyetik simülasyon aracında kullanılabilir. CEMHM kullanılarak SAR dağılımının ön sayısal çalışması sunulmuştur. CEMHM kullanılarak hesaplanan maksimum SAR değerinin Semi Antropomorphic Mannequin (SAM) modeli kullanılarak elde edilen değerin altında olduğu bulunmuştur.

(Ojerinde vd, 2009)'de yarı çerçeveli gözlükler ve polarize kaynaklar nedeniyle yüzdeki sar değişimleri GSM900 ve GSM1800'de incelenmiştir. Yarı çerçeveli gözlüklerin kafa içindeki özgül soğurma oranlarına olan etkilerini inceleyen bir çalışmanın deneysel ve simüle edilmiş sonuçları sunulmaktadır. 900 MHz ve 1800 MHz'de CW dipol kaynakları kullanılarak 14 farklı yarı çerçeveli gözlük için 1g SAR kaydedilmiştir. Simülasyonlar ayrıca sayısallaştırılmış SAM kafası ve bir çift gözlük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

(Chamma ve Kashyap, 2002)'de, bir sırt telsizi taşıyan bir insan vücudu modelinde elektromanyetik enerji, sonlu fark zaman alanı (FDTD) yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. İnsan vücudunun anatomisini doğru şekilde temsil etmek için yirmi üç doku grubundan oluşan bir insan vücudu modeli kullanılmaktadır. 20, 30, 60, 80, 100 ve 150MHz frekanslarında kuru ve % 13.77 ıslak tınlı toprak koşullarında duran vücut modeli için özgül soğurma oranı ve iletim akımı büyüklükleri hesaplanmıştır.

(Kordzadeh ve Zanche, 2017)'da, yüksek geçirgenlikli bir dielektrik astarın varlığında sekiz kanallı bir gönderme / alma dizisi için bir dekaplaj stratejisi açıklanmıştır. Elemanlar, bitişik elemanlar arasındaki kapasitif köprüler kullanılarak ayrıştırılmıştır. Astandan kaynaklanan daha yüksek karşılıklı empedansa rağmen, hem karşılıklı direnç hem de reaktans, bitişik elemanlar arasında (izolasyon 30 dB'den daha iyi) çıkarılabilir ve bitişik olmayan elemanlar arasındaki bağlantı 15 dB'nin altında tutulur. Dekuplajın, dizinin yüksek geçirgenlikli gömleklerin varlığında iletim performansı üzerindeki etkileri, kaplin, manyetik alan şiddeti, SAR ve iletim verimleri açısından incelenmiştir.

(Gong vd, 2017)'de Hücre Telefonu Radyasyonuna İlişkin İki Yıllık NTP Kanseri Biyolojik Deneyi için Reverberasyon Odalarında Ortaya Çıkan Fareler ve Sıçanlarda Yaşam Süresi Dozimetrik Değerlendirmesi yapılmıştır.

(Park vd, 2017)'de Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) için meme doku genişletici cihazının RF güvenlik değerlendirmesi sayısal simülasyon ve deneylerle yapılmıştır. Bunun yanında bir meme genişletici cihazın güvenlik sınır değerleri SAR değeri ölçülerek değerlendirilmiştir.

(Tang vd, 2017b)'de 28 GHz, düzlemsel, çok katmanlı, elektriksel küçük, geniş taraflı yayılan, Huygens kaynak anteni incelenmiştir ve bu antenlerin SAR değerinin Vücut üstü uygulamalarda etkinliğini doğrulamak için, hem LP hem de CP Huygens kaynak antenlerinin özgül emilim oranı (SAR) değerleri değerlendirilmiş ve çok düşük olarak bulunmuştur.

(Amrani vd, 2017)'de problematik olan, SAR parametresinin hesaplamasından biri olan elektrik alanın, zamanla değişmesini insan vücudunun bir coğrafi alanda maruz kaldığı alanların somut bir değerini belirlememizi engellediğinden bahsedilmiştir. Bu yazının amacı, bu alandaki elektrik alanlarının ölçülen değerlerini bulanık sistemlerle modellemek suretiyle, ağırlıklı elektrik alanının değerini ve bir coğrafi alandaki spesifik absorpsiyon oranını belirlemektir.

(Bahrami vd, 2016)'de implante edilebilir sinirsel kayıt sistemleri için esnek, ve değişik polarizasyonlarda ultra geniş bantlı (UWB) antenler incelenmiştir. Bu çalışmada tek ve çift polarizasyonlu antenler homojen olmayan insan kafa modelinde denenmiştir. Oluşturulan antenlerin ortalama SAR değerleri HFSS programında hesaplanmıştır.

(Han vd, 2016)'de anten boyutunu küçültebilmek ve SAR değerinin azaltılması amacıyla manyeto-dielektrik nanokompozit malzemenin incelemesi yapılmıştır. Manyeto-dielektrik nanokompozit malzemenin (MDNC) antende kullanılmasıyla insan kafasına olan etkileri incelenmiştir ve antenden kaynaklanan SAR değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

(Khan vd, 2016b)'de kortikal implantların kablosuz olarak verimli bir şekilde güçlendirilmesi için iki dönüşlü manyetik çekirdekli döngü anten karakterize edilmiştir ve bu antenle güç aktarılmasında görülmüştür ki tek sarımlı döngü antenlere göre hem SAR değerinde azalma hem de %11 daha fazla güç aktarımı sağlanmıştır.

(Agarwal vd, 2016)'de iletişim için lateks substrat üzerine yerleştirilmiş giyilebilir AMC (yapay manyetik iletken) destekli yakın uçlu anten incelenmiştir. Sıfır derece yansıma açılı tek katmanlı AMC ve Çift katmanlı AMC yüzeyleri emilen radyasyonu azaltmak ve sonuç olarak 2.4 GHz frekans bandı için en yüksek özgül emilim oranını en aza indirmek için önerilmektedir.

(Ibrahim ve Kiani, 2016)'de milimetre ölçekli biyomedikal implantların indüktif güç aktarım bağlantılarının tasarım ve optimizasyonu için bir başarımlı ölçüsü incelenmiştir. Bu makale PTE (güç aktarımı verimliliği) ile SAR kısıtlamalarının altında maksimum verilen güç arasında bir denge sağlayarak endüktif kuplaj yoluyla en uygun kablosuz güç iletimi yapan mm ölçülerindeki implantlar için yeni bir değer katsayısı (Fom) ve bir tasarım metodolojisi sunulmaktadır.

(Bakogianni ve Koulouridis, 2016b)'de tıbbi cihazlar için radyo haberleşmesi bandında (401-406 MHz) çalışan yeni bir implante edilebilen dipol anten önerilmiştir. Buna ek olarak yansıma katsayısı frekans yanıtı uzak alan kazancı ve özgül emilim oranı dahil olmak üzere tasarım detayları ve sonuçları sunulmuştur.

(Liu vd, 2016b)'de vücut dışı iletişimi için kullanılan yapay manyetik iletken ile donatılmış yel değirmeni şeklinde geniş bant anten incelenmiştir. SAR ve sıcaklık performansı AMC ile entegre edilmiş antenin radyasyon güvenliğini göstermiştir.

(Yan ve Vandenbosch, 2016)'de metamateriyal yapısına dayalı radyasyon paterni ayarlanabilen giyilebilir anten incelenmiştir. Antenin SAR değerleri CST simülasyonu kullanılarak tahmin edilmiştir ve simüle edilen SAR değerleri 0,005 ve 0.01 W/kg olarak 2W/kg olan Avrupa standard eşik değerinin çok altında elde edilmiştir.

(Campi vd, 2017)'de LCC (bobin-kondansatör-kondansatör) kompanzasyonu kullanan kablosuz güç transfer sisteminde yakın alan azaltma ile ilgilidir. Çalışmada kısa mesafeli elektrikli bir aracın aküsünü şarj etmek için uygulanan kablosuz güç aktarma teknolojisi ele alınmaktadır. LCC kompanzasyonunda verimlilik ve manyetik alan emisyonu arasındaki en iyi uyumu sağlamak ve özellikle elektromanyetik alan güvenlik uyumu için kompanzasyon ağına parametrelerinin ayarlanmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.

(Hong vd, 2016)'de giyilebilir gözlüklere uygulanacak olan monopol antenlerin tasarlanmasını, üretimini ve analiz edilmesini amaçlanmaktadır. Bu antenin SAR değerinin, giriş gücünün Google glass'ın 15 dBm olduğu durumlarda Federal iletişim

standartlarına uygun olarak 1,6 W/kg'dan daha düşük bir değere sahip olduğu görülmüştür.

(Stoecklin vd, 2016)'de çok kanallı beyin implantı için biyomedikal sensör sistemlerinin etkin kablosuz gücü incelenmiştir. Bu çalışmada implante edilmiş biyomedikal sistemler içindeki uygulamaya uygun bir endüktif güç sisteminin komple matematiksel optimizasyon süreci açıklanmaktadır. Optimizasyon hedefleri büyüklük enerji verimliliği ve doku emilimidir.

(Zhang vd, 2016)'de endişe duyulan alanlarda elektromanyetik alan radyasyonunu azaltmak için gevşek birleştirilmiş trafo bobini tasarımı ele alınmıştır. Kablosuz güç aktarımının hangi frekans aralıklarında yapıldığından ve 100kHz'den yüksek frekanslarda insan dokusu üzerine etkilerinin dikkate alınması gerektiğinden bahsedilmiştir.

(Zhao vd, 2016a)'de mobil cihazlarda 5G iletişim için milimetre dalga fazlı dizilere elektromanyetik alan maruz kalınımı incelenmiştir. Mevcut hücresel bandın aksine mm dalga bandındaki (10-200GHz) EMA maruz kalınımının, özgül emilim oranı yerine serbest uzay güç yoğunluğu ile değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

(Soltani vd, 2016)'de kablosuz kronik kemirgen elektrofizyolojisi uygulamalarında endüktif güç iletimi için genel bir metodoloji sunulmaktadır. Çalışmanın odak noktası, aşağıdaki temel kısıtlamalar altında tasarım sistemleri üzerinde düşünülmüştür: izin verilen özgül emilim oranı (SAR) altında azami güç dağıtımı, düşük maliyet ve mekansal ölçeklenebilirlik.

(Kwak vd, 2017)'de giyilebilir uygulamalarda vücut SAR değeri azaltımı için meta materyallerle PIFA anten tasarımı üzerinedir. Çalışmada, çoklu erişim bandında vücutta özgül emilim oranının azaltılması için yapay manyetik iletken (AMC) yapısı olan düzlemsel ters çevrilmiş bir PIFA anten önerilmektedir. Giyilebilir telefonlar ve akıllı saatler gibi kablosuz cihazlar daha yaygın hale geldikçe, vücuda takılan cihazların ürettiği elektromanyetik dalgalardan kaynaklanan sağlık riskleri önemli bir sorun haline gelmiştir. AMC yapıları, mükemmel bir manyetik iletken olarak hareket edebilen ve bir antenin radyasyon modelini kontrol edebilen bir tip meta-materyaldir. Böylece, AMC yapısı olan bir anten, vücut yönünde yayılan tehlikeli elektromanyetik alanları önleyebilir.

(Koulouridis vd, 2016)'de implante edilebilir koblosuz veri aktarımı için ve güç iletimi için kullanılmak üzere anten incelenmiştir. İmplant edilen bu sistemin SAR performansı değerlendirilmiştir ve RF-DC dönüşüm verimliliği de dikkate alınmıştır.

(Jegadeesan vd, 2017)'de manyetik rezonans tabanlı elektrik özellikleri tomografisine ve bölgesel SAR tahminine alternatif yaklaşımlarda bulunulmuştur. Bunun yanında manyetik rezonans görüntülemeye radyo frekansında üretilen alanlarda üretilen bölgesel özgül emilim oranı, güvenlik konularıyla ilgili veriler ve metodların genişletilebilme olasılığı dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

(Trajkovikj ve Skrivervik, 2016)'de UHF giyilebilir antenlerin SAR değeri karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma güvenlik uygulamaları için ses iletişimine yönelik hem simülasyon hem de ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırılan bu antenler UHF bandında (360-420 MHz) frekansında çalışmaktadır.

(Björninen ve Yang, 2016)'de monopol antenlerdeki gibi radyasyon paternine sahip olan düşük profilli başa giyilebilen anten incelemesi yapılmıştır. Simüle edilen radyasyon verimliliği %76 dır ve özgül emilim oranı 100mW anten gücünde dahi ICNIRP ve FCC limitlerinin oldukça altındadır.

(Haridim, 2016)'de insan kafasında oluşan SAR değerlerinin azaltılabilmesi için çubuk yansıtıcıların kullanımından bahsedilmiştir. Önerilen çubuk anten yapısında tek bir yansıtıcı kullanarak en yüksek SAR 1 g değeri ve 1GHz de ölçülen toplam SAR değeri sırasıyla 7.7 ve 8.9 dB azalmıştır.

(Kaka ve Toyman, 2016)'de kablosuz sağlık izleme için minyatür ve biyouyumlu özellikleri ile çift bantlı implant anten tasarımından bahsedilmiştir. Benzetim çalışmaları göstermiştir ki tüm MICS bant genişliği için sunulan anten -13dB'den daha iyi geri dönüş kaybı özelliği, tüm yönlü ışıma örüntü özellikleri ve insan vücudunda kullanıma uygun özgül soğurma oranı özellikleri göstermektedir.

(Das ve Yoo, 2017)'de biyomedikal implantlar için kablosuz izleme ve sızıntısız kablosuz güç transfer sistemini birleştiren çok bantlı anten incelenmiştir. Çalışma için yapılan simülasyon ve ölçümlerden, implante edilebilen antende bir yer toprak yuvasının kullanılmasının anten performansını artırabildiğini ve aynı zamanda özgül emilim oranını azaltabildiği bulunmuştur.

(Koohestani vd, 2017)'de insan güvenliği düzenlemelerine yönelik HF-Band orta menzilli uygulamalar için baskılı kablosuz güç aktarımı (WPT) sisteminin tasarım

metodolojisinden bahsedilmiştir. Tasarım metodolojisi, orta sınıf uygulamalar için maksimum güç aktarım verimliliğine sahip iyi eşlenmiş bir sistemi hedeflemektedir. Ayrıntılı bir yüksek çözünürlüklü insan vücudu modeli kullanılarak ve özgül emilim oranı dikkate alınarak (lokal ve tüm vücut) bir dozimetrik çalışma yürütülmüştür.

(Zhao vd, 2016c)'de SAR maruz kalınımı değerlendirmesi için yüksek çözünürlüklü gerçekçi bir insan kafa modeli sunulmuştur. Ayrıca bu çalışma yüksek çözünürlüklü bir EM insan kafa modelinin yararlılığını göstermektedir. Karşılaştırma amacıyla, CMODEL'in SAR değerlendirmesi için avantajını göstermek amacıyla, bir buçuk dalga boyu dipol anteni ile aydınlatılan CMODEL ve HUGO modellerinden çıkarılan göz modelleri kullanılmıştır.

(Liu vd, 2017b)'de konvansiyonel multisine (MS) transmisyon dalga formuna dayanan biyomedikal implantlar için yüksek verimli manyetik rezonanslı bir kablosuz güç aktarımı (MR-WPT) sisteminin sistematik bir tasarımı sunulmaktadır. Düşük özgül emilim oranı ve vücuttaki elektromanyetik alanlardan yükselen doku sıcaklığı da biyomedikal implantlar için güvenli ve pratik bir kablosuz güç bağlantısını garanti etmek için doğrulanmıştır.

(Bakogianni ve Koulouridis, 2016a)'de kompakt boyutlu bir düzlemsel ters çevrilmiş F-anteni (PIFA) ve bir doğrultucu sistemi içeren bir insan doku-implante edilebilir rektenna sunulmuştur. İmplant PIFA'nın rezonans, radyasyon ve özgül emilim oranı (SAR) performansı değerlendirilmiştir. Ardından, bir güçlendirme sistemi, güç bağlantısı bütçe hesaplamaları ve güvenlik hususlarına dayanarak tasarlanmıştır; RF-DC dönüşüm verimliliği daha sonra değerlendirilmiştir.

(Masumnia-Bisheh vd, 2017)'de iki boyutlu (2-D) insan başlı diliminde spesifik soğurma hızının (SAR) standard sapmasını hesaplamak için stokastik sonlu fark zaman alanı (S-FDTD) yöntemi kullanılmıştır. S-FDTD, hem elektriksel, hem de insan-insan kafasında yer alan değişkenlerdeki değişkenlik veya belirsizlikten kaynaklanan SAR'ın ortalama ve standard sapmasını hesaplamaktadır. Farklı korelasyon katsayıları kullanılarak, genişletilmiş 2-D MC-CC S-FDTD sonuçlarının Monte Carlo'ya çok yakın olduğu ve SAR hesaplamalarındaki diğer yaklaşımlardan daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

(Liu vd, 2016a) Biyolojik dokuların elektriksel iletkenliği ve geçirgenliği önemli diagnostik parametrelerdir ve belirli bir özgül emilim oranı dağılımını hesaplamak için

yararlıdır. Bu çalışmada, çok kanallı radyo frekansı (RF) bobininde, kantitatif iletkenlik, permiteivite ve proton yoğunluğunun B1 alanı, proton yoğunluk ağırlıklı B1 alanı ve alıcı-verici fazın ölçülen büyüklüğünden eş zamanlı olarak çıkarılması için yeni bir yöntem önerilmiştir bu öneri MRI kullanarak, proton yoğunluğu dağılımını türetmek için belirli varsayımlar olmaksızın yapılmıştır.

(Horváth vd, 2016) Kablosuz cihazların SAR ölçümleri yerine sayısal simülasyonlarla değerlendirilmesi son zamanlarda kabul görmektedir. Ancak, CAD modellerinin validasyonu ve gerçek SAR ölçümlerine karşı hesaplama sonuçları çoğu zaman gelişimin erken aşamalarında mümkün değildir, çünkü bu tür ölçümler sadece özel laboratuvarlar tarafından gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada mevcut gereksinimden daha erişilebilir bir alternatif ölçüm tabanlı CAD modeli doğrulama tekniği önerilmektedir.

(Koga vd, 2016b)'de tablet bilgisayarlar için düşük bir özgül emilim oranı (SAR)'a sahip çok bantlı anten önerilmektedir. Önerilen antenin düşük SAR değerini korumak için gövde fantomu ve tablet bilgisayar arasında toprak kısmı bulunmaktadır. Çok bantlı özelliklerini elde etmek için, antenin bir toprak yarığı ve parazitik elemanları vardır. Önerilen antenin çok bantlı ve düşük SAR karakteristikleri sergileyebileceğini iddia edilmektedir.

(Cheng ve Monebhurrin, 2017)'de bilgisayar destekli tasarımı cep telefonu modeli kullanılarak, SAR hesaplamasında parametre belirsizlik kantitatif (UQ) üzerinde durulmaktadır. SAR hesaplamasındaki belirsizlik, üç adet uyarılmamış UQ yöntemiyle nicelleştirilmiştir: cansız transformasyon, stokastik kolokasyon ve nonintrusive polinomialoslar. Bir ve iki rasgele değişkenli vakaların performansları analiz edilmiştir. Çoklu belirsiz girdiler için UQ prosedürünü basitleştirmek için, belirsizliğin çıktı parametresinin belirsizliğini değerlendirmek için birleştirilebileceği gösterilmiştir. Her belirsiz girdi parametresinin çıktının belirsizliğine ilişkin göreceli önemini ölçmek için, duyarlılık analizi için SAR hesaplamasında polinom kaosu temelli Sobol 'indeks yöntemi kullanılmıştır. Araştırmaların sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

(Dagheyan vd, 2016)'de Halen X-ışını tabanlı görüntüleme sistemleri memede malign ve sağlıklı fibröz dokular arasındaki düşük kontrasttan muzdariptir. Mikrodalga Yakın alan Radar Görüntüleme (NRI), yukarıda belirtilen dokular

arasında daha yüksek bir kontrast gösterir ve bu nedenle tümör tespit ve teşhis doğruluğunu artırabilir. Bu çalışmada, bir çift Antipodal Vivaldi Anten ile donatılmış olan gelişmiş NRI sisteminin ilk görüntüleme sonuçları sunulmaktadır. İlk ölçüm konfigürasyonunu basit tutmak için, ilgilenilen nesne olarak yağa daldırılmış bir metal rulman topu kullanılmıştır. Ayrıca, kullanılan sistemin insan deneyi testleri için güvenliğini kanıtlamak üzere, SAR gerçekçi bir göğüs dokusu modelinde simüle edilmiştir ve sonuçta elde edilen değerler hem ABD hem de Avrupa standartları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ilk olarak, ölçüm ve simülasyonlardan elde edilen görüntüleme sonuçlarının karşılaştırılabilir olduğunu ve ikinci olarak anten radyasyonlarının SAR kriterlerini karşıladığını göstermektedir.

(Chrissoulidis ve Laheurte, 2016) Katmanlı küresel bir gövdeye eksantrik olarak implante edilen, kapsüllenmiş bir Hertz dipolden gelen radyasyon, dyadic Green fonksiyonunun (dGf) teorisi kullanılarak belirlenir. İnsan gövdesinin bir modeli olan vücut, homojen bir doku çekirdeği etrafında deri ve yağ tabakaları içermektedir. Kapsül, bir yalıtkan katıyla sınırlanan küresel bir oyuktur. Bu radyasyon sorununun dGf'si iki referans noktasını, vücudun merkezini ve kapsülün merkezini içermektedir. Analiz, dGf ve ana radyasyon miktarlarının kısa bir formülasyonu ile sonuçlanmaktadır. Radyasyon gücü, etkinlik ve Hertz dipolün direktif kazanımı için, vücudun ortasından kapsülün yer değiştirmesine karşı sayısal sonuçlar gösterilmiştir. SAR'ın tüm dağılımını ve pik SAR'ın yerini bulmak için, vücudun iki enine kesiti üzerinde, özgül emilim oranı SAR haritaları çizilmiştir.

(Wang vd, 2016)'de cep telefonu uygulamaları için $55 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ hacimli küçük boyutlu yeniden yapılandırılabilen döngü anteni önerilmiştir. Geleneksel üç döngü anten modlarına ek olarak, yani, $0,5-\lambda$, $1-\lambda$, ve $1,5-\lambda$ modları, önerilen döngü anteni de başka bir $2-\lambda$ modu üretir. Bu tür kompakt anten hacmi ile daha fazla çalışma bantlarını kapatmak için, Bu nedenle, yeniden yapılandırılabilir teknik, düşük bantta bant genişliğini iyileştirmek için önerilen antenin sonunda bir RF anahtarının yerleştirilmesiyle uygulanır. RF anahtarının dört çalışma durumunu birleştirerek, önerilen anten düşük özgül emme ve yüksek verimliliğe sahip GSM850/ 900, DCS1800, PCS1900, UMTS2100 ve LTE2300 / 2500 bantlarını kapsayabilmektedir.

(Agaliya vd, 2016)'de kablosuz vücut alanı ağlarını (WBAN'lar) çalıştırmak için bir düzlemsel ters-F anteni (PIFA) tasarlanmıştır. PIFA düşük profili ve çok yönlü özellikleri nedeniyle popülerdir. Yer düzlemi ve yama yapısı, gövdenin ve giyilebilir

antenin izole edilmesinde ve antenin vücuttan ayrılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yazıda, yama yapısı geri dönüş kaybını azaltmak ve dolayısıyla verimliliği arttırmak için az bir ölçüde genişletilmiştir. Yama değeri uzatıldığında SAR değeri biraz azalmaktadır. Kullanılan substrat Polidimetilsiloksan (PDMS) dir. Bu nedenle, bir PDMS alt-tabakası ile kombinasyon halinde PIFA'nın SAR değerini azaltması önerilmektedir. Anten CADFEKO 5.5 kullanılarak tasarlanmıştır ve sonuçlar doğrulanmıştır.

(Krayni vd, 2016)'de gönderilen giriş gücünün yayılma koşullarının değişkenliğinin karakterizasyonu için sistematik bir metodoloji önerilmektedir. Bu metodoloji, kullanıcının vücudunun anten performansında olduğu kadar, maruz kalma seviyesinde de görüldüğü üzere, kişisel cihazların göreceli konumlandırılmasının nedenini ele almaktadır. Maruz kalınım seviyeleri, çocuk bedenlerinin gerçekçi bir sayısal modeli üzerinde sonlu fark zaman alan simülasyonları kullanılarak hesaplanan spesifik absorpsiyon hızlarından araştırılmıştır.

(Khattak ve Kahng, 2016)'de yeni ve ince bir yapay manyetik iletken (AMC) destekli döngü anteni sunulmuştur. Önerilen düşük profilli döngü anteni, anten performansını geliştirmek için AMC'nin özelliklerini elde etmek üzere metalik yapı tarafından desteklenen yaklaşık $0.008 \lambda_g$ (1 mm) kalınlığında ince bir FR-4 substratı üzerine basılmıştır. Yapı 2,4 GHz rezonans frekansına sahiptir. AMC'nin yansıma katsayısının büyüklüğü ve fazı gibi özellikleri araştırılmıştır. Tasarlanan AMC daha sonra baskı devresi yapılmış loop anten için arka düzlem olarak kullanılmıştır. AMC'nin tanıtımıyla antenin geliştirilmiş performansı gözlenir. Mükemmel manyetik iletken (PEC) destekli tasarıma kıyasla, önerilen AMC destekli tasarım sadece anten performansını arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda antenin özgül emilim oranını da düşürmektedir. Yöntem simülasyon ve ölçüm ile doğrulanmıştır.

(Kozlov vd, 2016)'de beyin omurilik sıvısının 300 MHz MRI iletim dizisi ile oluşturulan spesifik absorpsiyon oranı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Beyin omurilik sıvısının (BOS) tek bir elektriksel olarak bağlanmış nesne olarak nasıl simüle edildiğini ve bir anatomik insan kafa modelinin geometrisinin varyasyonunun, bir 7T manyetik rezonans görüntüleme iletim dizisinin iletim ve güvenlik uyarma etkilerini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

(Chung ve Yang, 2016)'de bileğe takılı kablosuz iletişim cihazı içine gömülü 2.4 GHz endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) bandı (2400-2485 MHz) ve 1.575 GHz GPS işlemleri için kompakt bir monopole ve ters-F anten tasarımı sunulmaktadır. Bu antenler, düzensiz plastik malzemeler için üç boyutlu bir aşındırma işlemi ile bir polikarbonat ve akrilonitril-butadien-stiren harmanı substrat üzerinde imal edilmiştir. Sağlam el fantom modeli olan ve olmayan bilek giyilen cihaz değerlendirilmiştir. Antenlerin radyasyon verimi, ISM bandı için % 80'e ve el fantom modeli olmaksızın GPS bandı için % 63'e ulaşabilir. El fantom modeli ile, fantom modelindeki kayıplı materyallerden dolayı hem ISM hem de GPS bantları için radyasyon verimliliği yarı yarıya azalmaktadır. ISM bandı için cihazın özgül emilim oranı ölçülmüştür ve sonuçlar FCC'nin gerektirdiği sınırdan çok daha düşük elde edilmiştir. Bu yerleşik anten tasarımı, giyilebilir kablosuz iletişim cihazında uygulanabilmektedir.

(Khan vd, 2016a) Bu makale, ISM bandında (2.4 GHz) daha iyi kazanç elde etmek için ek EBG yapısı ile giyilebilir Substratlı Microstrip Patch Anten tasarımı yapmakla ilgilidir. Giyilebilir bir alt tabaka tekstil giysilerinde kullanılır, bu nedenle bu anten yapısı özellikle giyilen giysiler için tasarlanmıştır, bu nedenle bu yazıda SAR ölçülmüştür. EBG yapısını tasarlamak, SAR için kazancı ve daha iyi sonuçları iyileştirmede yardımcı olmaktadır. Bu antenin simülasyonu için CST stüdyo yazılımı kullanılmıştır.

(Frere vd, 2017) Mevcut maruz kalınım standartlarında ve kılavuzlarda, belirli bir frekanstaki dozimetrik miktarlar arasındaki ilişki her zaman tutarlı değildir, çünkü aynı anda uygulanan sınırlar diğerlerinden daha kısıtlayıcıdır. Örnek olarak dış elektrik alanı veya SAR ile karşılaştırıldığında indüklenen akımlarda sınırlamalar verilebilir. Bu çalışmada, 1-90 MHz aralığında insan vücudunda indüklenen akımı değerlendirmek için, iki elemandan oluşan eşdeğer bir devre önerilmektedir. Daha sonra, insan vücudunun 1 ile 90 MHz arasında bir antene eşdeğer olduğunu varsayıldığında, insan vücudunun yüksekliğinde indüklenen akımlar hesaplanmıştır. Dış elektrik alanı ile orta yükseklikteki voltaj arasındaki ilişkiyi kullanarak, vücut boyunca akımı hesaplanmıştır ve harici elektrik alan sınırları ile daha tutarlı olan uyarılmış akımlar hakkında güncellenmiş sınırlar önerilmiştir.

(Tsai vd, 2016)'de esnek bir alt tabaka üzerinde implante edilebilir geniş bant düşük özgül-emilim oranına sahip anten önerilmektedir. Önerilen anten yapısı, implante edilebilir insan vücudu uygulamaları için uygun olan ince ve esnek bir

substrat üzerine basılmıştır. Önerilen anten üretilmiştir ve esnek bir substrat üzerinde ölçülmüştür. En küçük boyut (80 mm³), 400 MHz üzerindeki son teknoloji implante edilebilir antene kıyasla düşük profilli esnek alt tabaka ile elde edilmiştir ve %68 fraksiyonel bant genişliği elde edilmiştir. Ortalama SAR değerinin maksimum tepe değeri, giriş gücü 1 W olduğunda yaklaşık 230 W/kg dır. Önerilen antenin maksimum giriş gücü yaklaşık 10 mW dır.

(Miaskowski vd, 2016)'de Nuss prosedüründen sonra implante edilen titanyum çubuğu olan altı yaşındaki bir erkek hastanın, 2.45 GHz frekansında mikrodalga radyasyonuna maruz kalınımının değerlendirilmesi anlatılmaktadır. Çocuğun gövdesinin içindeki titanyum implantına göre iki düzlem dalga polarizasyonu için yerel SAR konsantrasyonları dikkate alınmıştır. Analiz edilen içbükey çubuk implantın, mevcut güvenlik standartlarına göre mesleki ve çevresel maruz kalınımı sırasında hiçbir tehlike oluşturmadığı gösterilmiştir.

(Jin vd, 2016)'de endüstriyel, bilim ve medikal (ISM 2.45 GHz) bandında alınabilen kapsül endoskop sistemleri için geniş bantlı hibrit bir su anteni önerilmiştir. Önerilen anten, silindirik iletken monopol anten, tuzlu su ve biyo uyumlu bir kabuktan oluşmaktadır. Anten, 1.89 GHz'den 4.51 GHz'e (%106,9'luk bir fraksiyonel bant genişliği) kadar geniş bir -10 dB yansımaya katsayısı bant genişliğine sahiptir (yaklaşık 1,53 cm³). Anten performansı üzerindeki etkileri değerlendirmek için, elektrik bileşenleri (pil, kamera ve alıcı-verici), kapsülün içinde bir PEC silindiri olarak modellenmiştir. Ek olarak, önerilen antenin SAR performansı da SEMCAD tarafından analiz edilmiştir.

(Abbasi vd, 2017)'de 2×1 elektromanyetik bant aralığı (EBG) yapıları ile desteklenen düzlemsel bir monopole sunulmaktadır. Tek bir EBG birim hücresinin yansımaya fazı, giyilebilir uygulamalar için amaçlanan düzlemsel bir monopole antenin verimli radyasyonuna yönelik olarak araştırılmış ve kullanılmıştır. EBG birim hücresinin şekli ve zemin ile EBG katmanı arasındaki boşluk, anten 2,45 GHz'de çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Çok düşük özgül emilim oranı, kompakt boyut ve yüksek kazanç ile rapor edilen verimli ve güçlü radyasyon performansı, önerilen anteni vücut dışı iletişim için kullanılan çoğu giyilebilir uygulama için üstün bir seçenek haline getirmektedir.

(Islam vd, 2016)'de, mevcut bir slot dipol esnek bükülebilir antenin performans karşılaştırması, implante edilebilir kablosuz iletişim için dengeli boyutta minyatürleme özelliğine sahip yeni değiştirilmiş bir tasarım ile gerçekleştirilmiştir. Düşük maliyetli substrat ve yama malzemesinin kullanımı ile birlikte küçük bir boyut getirerek, bu önerilen anten biyomedikal uygulamalar için gerçekleştirme dönüşlerinde arttırılmış bir güvenilirlik ve fizibiliteye sahiptir. Önerilen anten, ISM (Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal) bandında (2.4-2.4835 GHz) çalışmak üzere tasarlanmıştır. ISM bandı, azalan anten boyutuna sahip daha yüksek bant genişliğine sahip olmasından dolayı seçilmiştir. Önerilen anten hem düzlemsel hem de bükülebilir senaryolar için tasarlanmıştır. Anten ayrıca, insan vücudunun tüm elektriksel özelliklerinin, vücut içi koşullara maruz kaldığında antenin performansının duyarlılığını incelemek için muhafaza edildiği bir insan doku modelinin içine daldırılmıştır. Son olarak SAR, antenin canlı bir vücut içine implant edilmesinin güvenli olup olmadığını test etmek için değerlendirilmiştir.

(Gong vd, 2017)'de Ulusal Sağlık Bilimleri Enstitüsü Ulusal Toksikoloji Programı tarafından yürütülen iki yıllık kanser biyo-tahlil çalışması için tasarlanan yankı maruz kalınım sistemine maruz kalan kemirgenler için ayrıntılı ömür-zaman dozimetri analizi sunulmuştur. Çalışma, 1900 MHz'de tek tek barındırılan, tutturulmamış farelerin ve 900 MHz' de sıçanların, organların ve dokuların en iyi tekdüzeliğe maruz kalması için seçilen frekansların iyi kontrollü ve karakterize maruz kalınımını gerektirmiştir. Tepe uzaysal SAR ve organa özgü SAR yanı sıra maruz kalınma ortamına bağlı belirsizlik ve çeşitlilik, büyüme oranlarındaki farklılıklar ve hayvan postürü değerlendirilmiştir. WbSAR ile karşılaştırıldığında, yüksek su içerikli dokuların (kan, kalp, akciğer) ortalama maruz kalınımı ~ 4 dB, düşük kayıplı dokular (kemik ve yağ) ~ 9 dB daha azdır. Bu ayrıntılı dozimetrik sonuçlar, diğer çalışmalarla karşılaştırmayı güçlendirmektedir ve maruz kalınımın uzun vadeli biyolojik etkileriyle ilgili çalışmalar için bir referans sağlamaktadır.

(Foster ve Chou, 2016)'de, 2014 tarihli makalenin IEEE Access'teki iki eleştirel yorumun yanıtıdır. Bu çalışma, bir cep telefonunun radyo frekans enerjisine maruz kalması (belirli bir SAR açısından) ve yetişkinlere karşı çocuklara maruz kalma olasılığındaki olası farklılıklar hakkındaki sayısal dozimetri / modelleme çalışmalarını gözden geçirmiştir. Başlıca odak noktası, cep telefonlarının ulusal ve uluslararası maruz kalma limitlerine uyumu değerlendirmek için ilgili miktar olan, kafadaki en

yüksek uzaysal ortalama SAR üzerinedir. Morris ve diğ. Bu makalede, bu sonuçların orijinal yazarların alıntıları ile özetlendiği gerçeğine rağmen, gözden geçirdiği çalışmaların sonuçlarını doğru bir şekilde göstermediği için eleştirilmiştir. Bununla birlikte, onların eleştirisi, makalemizin basit bir yanlış okunmasını ve farklı maruz kalınım ölçümleri hakkındaki kafa karışıklığını yansıtmaktadır. Gandhi tarafından yapılan ikinci bir eleştiri, kafada RF enerjisinin emiliminde yaş ve cinsiyete bağlı farklılıklar olduğunu kaydetti. Beyindeki psSAR'a atıfta bulunulduğu şeklinde yorumlanırsa, yorumlarına katılıyoruz (bu, bir bütün olarak kafa için psSAR'dan farklıdır ve uyumluluk değerlendirmesi için kullanılmamaktadır). Bu yanıt, uyumluluk değerlendirmesi için kullanılan sıkı kontrol altındaki koşullar altında sayısal dozimetri/modelleme çalışmalarının, cep telefonu kullanıcılarının gerçek dünya maruz kalınımıyla ilişkisini sınırlayan önemli faktörleri kısaca gözden geçirmektedir.

(Kazemipour vd, 2016)'de, güvenlik tarayıcıları tarafından yayılan güç yoğunluklarının değerlendirilmesi için bir yaklaşım gösterilmiştir ve insan derisine sonuçtaki ısı transferini simüle etmek için bir metodoloji ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, bir jel fantomun milimetrik dalga radyasyonu ile aydınlatılmasına ve termal görüntülemeye dayanan sıcaklık ölçümlerine dayanan basit ve pratik bir ölçüm düzeni de gösterilmiştir. Ölçümler, benzetimlerin gerçekçi olduğunu ve bu nedenle, insan derisine ısı transferini tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Simülasyonlar ve ölçümler üzerinde, örneğin, gözlerin ısınması ile ilgili daha fazla çalışma amaçlanmıştır.

(Safari ve Abdolali, 2016)'de, dental implantların anten parametreleri, SAR ve metal başın insan kafasında indüklediği akım yoğunluğu üzerindeki varlığı ve pozisyonu araştırılmıştır. Bu çalışmada, CST Mikrodalga Stüdyosu'na ait bir SAM fantomu ve 900 ve 1.800 MHz'de yayılan bir dipol anteni kullanılmaktadır. SAR ve akım yoğunluğu dağılımı, farklı implant pozisyonlarına sahip bir kafa modelinde karşılaştırılmıştır.

(Koga vd, 2016a) Bu çalışmada mobil uygulamalar için yeni bir düşük SAR çok bantlı anteni önerilmiştir. Önerilen anten konfigürasyonu, çok alanlı özellikler ve düşük SAR değerleri elde etmek için bir anten zemini ve dallanmış elemanlardan oluşmaktadır. Önerilen anten, Uzun Vadeli Evrimi ve Kablosuz Geniş Alan Ağlarını (703 - 960 MHz, 1447 - 1510 MHz, 1710 - 2170 MHz ve 2496 - 2690 MHz) kapsamaktadır ve SAR'ını geleneksel ters çevrilmiş L anten modeline göre %45

oranında azaltabilmektedir. Önerilen antenin ölçülen toplam verimliliğinin, hedef bant frekansları için -5 dB ile -1 dB arasında değiştiği bulunmuştur. Önerilen anten, LTE / WWAN işlemi ile mobil uygulamalar için iyi bir aday olacaktır.

(Liu vd, 2017a) ISM bandında (2.40-2.48 GHz) çalışan, tek beslemeli, minyatürleştirilmiş geniş ışınlı genişliğinde dairesel polarize implante edilebilir anten, subkutan gerçek zamanlı glikoz izleme uygulamaları için tasarlanmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Önerilen anten, dört C-şekilli yuva ve bir tamamlayıcı bölmeli-halka rezonatör (CSRR) ile $8.5 \times 8.5 \times 1.27 \text{ mm}^3$ boyutlarında çok iyi bir minyatürizasyona sahiptir. Bu arada, CSRR yarıklarını ayarlayarak, dairesel polarizasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon, üç katmanlı bir fantom ile empedans bant genişliğinin -17 dBi'lik bir pik kazancı ile % 12.2 (2,32- 2,62 GHz) olduğunu ve 3-dB eksenel oran bant genişliğinin % 2,4 (2,42-2,48 GHz) olduğunu göstermektedir ve yaklaşık 140° geniş bir genişliğe sahiptir. Bir in vitro test, bir domuz levhasında gerçekleştirilmiştir ve ölçülen empedans bant genişliği, S_{11} ile % 13 (2.31-2.63 GHz); -10 dB, simüle edilmiş sonuçları doğrulamaktadır. SAR dağılımı sağlık güvenliği için değerlendirilmiş ve hesaplanan link marjı, güvenilir iletişimin 10 m içinde boş alanda garanti edilebileceğini göstermektedir.

(Russo vd, 2016) MR incelemesine tabi tutulan bir hastada SAR değerlendirmesi için bir ölçüm metodolojisinin geliştirilmesi sunulmuştur. İlgili ısıtılmış hacimlerde emilen SAR değerleri ve buradaki SAR dağılımı hakkında bilgi sağlamak için uygun bir hayalet modeli oluşturulmuştur. Aynı zamanda, yöntem, her bir bireysel muayene için MR cihazı tarafından sağlanan SAR değerlerini, kullanılan diziler ve hastanın karakteristiklerine göre kendi matematiksel algoritması aracılığıyla doğrulayabilmelidir. Bu algoritma genellikle bilinmediğinden, mümkün olan en büyük miktarda veriyi toplamak için iki farklı üreticinin tomografları kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bir MRI cihazının farklı dizileri için SAR ölçmek için uygun olan bir fantomun oluşturulması, aynı zamanda, ulusal mevzuatın talep ettiği kalite güvence programıyla ilgili MR ekipmanının durumu hakkında "gerçek zamanlı" bilgi sağlayabilmektedir. Ayrıca, belirli bir miktarda malzeme (yani SAR) içinde salınan enerji dizisi ve seçilen dizi ile ilgili olarak "bir önsel" ve doğru bilgi, elektromanyetik olarak, son nesil kalp pilleri ile implante edilen hastalar için de MRI'nın daha güvenli kullanımını garanti edecektir. 1.5 tesla kadar statik manyetik alanın akı yoğunluğuna sahip MR cihazları ile uyumludur. Ölçümler kalorimetrik yöntem

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu metot, bir bileşimin spesifik ısı ve diziden önceki ve sonraki sıcaklıklar arasındaki fark biliniyorsa, birim zamanda enerji oranını değerlendirmektedir. Fantom boyutlarının optimizasyonu için beş farklı şekil, boyut ve geometri sistemi oluşturulmuştur. Sıcaklıklar, elemanların kalibrasyonu için kullanılan 0.01 ° C hassasiyete sahip bir referans termometresi ile ölçülmüştür. Fantomlar için iki dolgu malzemesi seçilmiştir: SAR ölçümleri bir NaCl (0.06M) çözeltisi ve bir EKG ticari jeli.

(Cihangir vd, 2017)'de akıllı gözlük cihazlarında hücresel 4G (LTE-Advanced) kapsamını sağlamak için düşük maliyetli ve kolay üretim çift bantlı anten çözümü sunulmaktadır. Bağlantı elemanı tipi anten, 700-960 MHz ve 1.7–2.7GHz hedef bantlarını kapsayacak şekilde uygun eşleşen ağlarla değerlendirilmiştir. Gerçekçi bir cihaza taklit etmek için, bir ABS plastik dielektrik çerçeve 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Anten için simülasyonlar, “kullanıcının kafası”, “kafa ve el ile” ve “boş alan” olan üç tipik kullanım senaryosunda gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımlarının SAR davranışı da simülasyonlar ve ölçümler yoluyla incelenmiştir. SAR değerlerinin, gözlüklerin iletim gücü azaltılmamışsa, pratik kullanımda sorun oluşturulabilecek sınırların üzerinde olduğu bulunmuştur.

(Zheng vd, 2016)'de, çok bileşenli ortopedik kalça protez sistemleri için SAR numerik simülasyonlarını sunulmaktadır. SAR, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sırasında cihazların radyo frekansı ile indüklenmiş ısıtmasını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Çok bileşenli ortopedik kalça protez sistemlerinin, çeşitli tasarım ve boyutlara sahip birçok bileşime sahip olması nedeniyle, SAR değeri ve her bir olası kombinasyon ve konfigürasyon için karşılık gelen sıcaklık artışını değerlendirmek, sayısal olarak yoğun ve neredeyse imkansızdır. Bu çalışmada, ortopedik kalça protez sistemi yakınındaki dokuda indüklenen SAR ile ilişkili faktörleri değerlendirmek ve olası tüm kombinasyonlar için “en kötü durum” tepe SAR değerini bulmak için etkili bir araştırma stratejisi ve bir hesaplama simülasyon modeli geliştirilmiştir.

(Arduino vd, 2017) Kontrast kaynağı inversiyonu elektriksel özellikleri tomografi (CSI-EPT), manyetik rezonans görüntüleme tarayıcıları tarafından yapılan ölçümlerden başlayarak elektrik özellikleri dağılımını geri kazandıran elektriksel özellikler tomografisi için yeni geliştirilmiş bir tekniktir. Bu yöntem, online dozimetri için gerekli olan yerel özgül emilim oranı dağılımını da geri kazanma kabiliyeti

açısından kendisini diğer elektriksel özellik tomografi tekniklerinden ayıran kontrast kaynağı inversiyon tekniğine dayanan bir optimal kontrol yaklaşımıdır. Şimdiye kadar, CSI-EPT, sadece homojen sınırsız arka plana uygulanabilirliğini sınırlandıran integral denklemler açısından tanımlanmıştır. Yöntemi, korunan radyo frekansı bobinlerinin tekrar eden durumunda olduğu gibi, alandaki bir kalkanın varlığına genişletmek için, işlevsel bakış açısına dayanan CSI-EPT'nin daha genel bir formülasyonu buraya dahil edilir. İki boyutlu enine manyetik model problemi için iki farklı CSI-EPT uygulaması önerilmiştir, biri sınırsız bir alan ile ilgilenmektedir ve diğeri mükemmel iletken bir kalkanın varlığını düşünmektedir. İki uygulama, korumalı bir radyo frekansı bobininin sayısal olarak simüle edilmesiyle elde edilen aynı sanal ölçümler üzerine uygulanmaktadır. Altta yatan fiziksel problemin doğru modellenmesi gereksinimini araştırmak için sonuçlar hem elektrik özelliklerin geri kazanımı hem de özgül emilim oranı tahmini açısından karşılaştırılmıştır.

(Martínez-Vázquez vd, 2016)'de, insan maruz kalınımının, yüksek güçlü elektromanyetik darbelerin (HPM) yaydığı bir antenin yakın alandaki sayısal değerlendirmesinin sonuçlarını sunmaktadır. Farklı sürelerle farklı darbeli sinyaller dikkate alınır. Elde edilen SAR değerleri hem genel halk hem de mesleki davalar için önerilen sınırlarla karşılaştırılmıştır.

(Takei vd, 2017)'de, üçüncü nesil bir iletişim (3G) sistemi (çalışma frekansları: 900 MHz ve 2 GHz) için bir anten ile gerçekçi bir hesaplama akıllı telefon modeli kullanılarak sayısal benzetim ile elektromanyetik radyasyonun SAR ve hesaplamalı insan modelleri hesaplanmıştır. Akıllı telefonun gövdeye göre dikey olarak yerleştirildiği durumlarda SAR 10g'nin artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Ek olarak, SAR10g değişkenliğinin temel olarak yerleştirme yüksekliğine değil, eğim açısına bağlı olmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.

(Rashid vd, 2016)'de insan kalbinin 800 MHz'lik inset ile beslenen dikdörtgen mikroşerit yama anten özellikleri üzerindeki etkisi CST kullanılarak araştırılmıştır. Anten bir mimik insan kalp kası üzerinde simule edilmiştir ve aralarındaki mesafe, hassas ve dalga kılavuzu port beslemesi için anten performans parametreleri (spesifik olarak, yönelim ve yüzey akımı) üzerine SAR'daki değişiklikleri analiz etmek için değiştirilmiştir. Bu çalışma, cep telefonlarının göğüs cebinde tutulduğunda, GSM bandının cep telefonu antenlerinin insan kalbini ve insan kalbinin anten rezonans frekansını nasıl etkilediğini göstermektedir.

(Rashid vd, 2016)'de insan kalbinin 800 MHz'lik inset ile beslenen dikdörtgen mikroşerit yama anten özellikleri üzerindeki etkisi CST Mikrodalga Stüdyo programı kullanılarak araştırılmıştır. Anten bir mimik insan kalp kası üzerinde simüle edilmiştir ve aralarındaki mesafe, hassas ve dalga kılavuzu port beslemesi için anten performans parametreleri (spesifik olarak, yönelim ve yüzey akımı) üzerine SAR 'daki değişiklikleri analiz etmek için değiştirilmiştir. Sonuçlar, antenin merkez frekansının daha düşük bir değere kaydırıldığında ve antenin her iki besleme tekniği için kalbe yakın olduğunda SAR değerlerinde bir artış olduğunu göstermiştir.

(Manoufali vd, 2016a)'de implante edilebilir eşkenar üçgen yama anteninin tasarımı sunulmuştur. Yama, rezonans frekansını 402 MHz'e düşürmek için mevcut yolu gizlemek için dar yarıklar ile konikleştirilmiştir. Dar yarıkların uzunluğunu ve genişliğini değiştirerek ve bir kısaltma pimi ekleyerek, 141mm³ civarında olan küçük bir anten büyüklüğüne ulaşılmıştır. İki implantasyon kurulumu düşünülmektedir. Anten başlangıçta dış hava etkisini dikkate alarak bir deri küpü ve bir 3-D küresel kafa modeli içinde tasarlanmıştır. Antenin performansı, yansıma katsayısı, uzak alan radyasyon paterni, SAR ve her iki implantasyon kurulumları için eksenel oran olarak karakterize edilmiştir.

(Ojaroudi ve Civi, 2016) Zemin düzleminde ilmek bileziği yapısına dayanan ultrawideband (UWB) uygulamaları için yeni bir baskılı monopole anten sunulmuştur. Önerilen anten, dikdörtgen şekilli bir yayıcı yama, dairesel şekilli bir konik besleme hattı ve % 100'den fazla (3,19-11,03 GHz) geniş bir kullanılabilir fraksiyonel bant genişliği sağlayan, zemin düzleminde bir çift ilmek kovanından oluşur. Zemin düzleminin köşelerine iki adet dikdörtgen halka yerleştirilir, böylece ek rezonans uyarılır ve daha geniş bir empedans bant genişliği üretilir. Mikrodalga görüntüleme sistemi için önerilen antenin kullanılabilirliğini göstermek amacıyla, dairesel bir dizi konfigürasyonunda altı eleman kullanılarak SAR dağıtımı sunulmuştur. Önerilen anten, üniform SAR dağılımı, yüksek verim ve neredeyse çok yönlü radyasyon modelleri sergilemektedir ve bütün bant üzerinde kabul edilebilir bir kazanç sağlamaktadır.

(Song vd, 2017)'de bölünmüş iki dönüşlü döngünün gömülü yüksek manyetik geçirgenlik çekirdeği olan bir yüksek verimli alıcı-verici anteni sunulmaktadır. Kablosuz şarj ve çift yönlü veri iletimi ile insan vücudu nöral izlenmesi implante cihazında uygulanabilir. Gönderme ve alma anteninin bütün yapısı temel olarak

benzerdir; fark, alıcı antenin çift taraflı halkadan ve merkezi konumda gömülü bir manyetik çekirdekten oluşmasıdır, ileten anten, halka ve kaynak sabit değerli kapasitörün karşılık gelen pozisyona bölünmesiyle gerçekleştirilebilir. Kablosuz enerji transferinin etkinliği iyileştirilmiştir ve özgül emilim oranı değeri simülasyon optimizasyonu ile azaltılmıştır. Konvansiyonel döngü anteniyle karşılaştırıldığında, iletim verimimiz iki katın üzerindedir ve kablosuz iletimin mesafesi 5 mm olduğunda ortalama SAR yaklaşık % 52 azaltılmıştır. Son olarak, gömülü manyetik çekirdekli ve 402MHz'de deri ile aynı dielektrik parametrelere sahip bir tür karışık sıvıya sahip bir geleneksel döngü anteni, parçalı bir döngü anteni üretilmektedir. Deneyimler, iletim etkinliğinin gerçek sonuçlarının simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir.

(Makarov vd, 2017) Manyetik rezonans görüntüleme güvenliği, anten araştırması, elektromanyetik tomografi ve elektromanyetik stimülasyonda insan vücudunun elektromanyetik, termal ve mekanik tepkilerinin farklı uyarıcılara sayısal simülasyonu, anatomik olarak yeterli ve sayısal olarak etkili çapraz platformlu hesaplama modelleri veya “Sanal insanlar” ile sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, alanda mevcut modern insan modelleri ve vücut bölgesi modelleri ile bunların önemli özelliklerini kapsamlı bir şekilde gözden geçirmektir.

(Tang vd, 2017a)’de bir 28 GHz, çok katmanlı, dairesel polarize (CP), Huygens kaynağı elektriksel olarak küçük anten (ESA) sunulmaktadır. Vücut üstü uygulamalarda etkinliğini doğrulamak için, Huygens kaynak ESA'nın özgül emilim oranı (SAR) değerleri değerlendirilmiştir ve çok düşük olduğu tespit edilmiştir.

(Cobianu vd, 2016)’de cep telefonu tarafından üretilen elektromanyetik radyasyon üzerine bir vaka çalışması sunulmaktadır ve ayrıca üç farklı cep telefonu tipi için radyasyon seviyesini analiz edilmektedir. Tüm ölçümler, farklı mesafelere yerleştirilmiş üç jenerasyon hücre için METRA HIT 29S'ye bağlanan ölçüm cihazı FMA1 tarafından gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, insan vücudu tarafından desteklenen standard değerlerle karşılaştırıldığında elektromanyetik dalgaların seviyesini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

(Chen vd, 2017)’de yankısız odada elektromanyetik koruyucu giysilerin performansını analiz etmek için yeni bir ölçüm sistemi kurulmuştur. İnsan hayalet gövdesi, boşluk etkisini önlemek ve insan gücü ve para maliyetini azaltmak için doku

sıvısı yerine emici malzeme ile doldurulmuştur. Elektromanyetik dalgaları almak için insan fantomunun karın boşluğuna bir elektrik alan probu konmuştur. Daha sonra karın boşluğunun elektrik alan değeri, insan fantomu gövdesi üzerindeki elektromanyetik koruyucu giysiler ile veya bunlar olmadan ölçülmüştür. Farklı giysilerin ölçülen koruyucu etkililiğini (SE) ve bu farklı giysilerdeki kumaşları karşılaştırdıktan sonra, giysiler ve bunların karşılık gelen kumaşları arasındaki performans da tartışılmıştır. Tasarım tarzının metal fiber içeriği yerine SE değerini etkileyecek belirleyici faktör olduğu sonucuna varmıştır. Araştırma sonuçları üretim ve ticarete uygulanabilir.

(Guo vd, 2017) Karşılaştırma, in-vivo ve in-vitro arasındaki implantlarla ilişkili radyofrekans kaynaklı ısıtmanın farkına yol açan faktörü göstermek için yapılmıştır. Sanal yetişkin erkek ve ASTM fantomu, bir grup ortopedik plak implantları ile, 128MHz'de çalıştırılan vücut büyüklüğünde bir kuş kafesi bobini içinde gerçekleştirilmiştir. Çeşitli boyuttaki femur ve humerus ortopedik plak implantları için, 1 g ortamın üzerinde ortalama maksimum enerji emilim oranı, in vivo'dan in-vitro vakalara, hatta birbirine zıt olarak değişmektedir. Daha fazla çalışmanın gerekmesine rağmen, ilk simülasyonlar, ASTM F2182 test yöntemiyle 1 g doku üzerinde ortalama maksimum enerji emilim oranının in-vitro ölçümünün, in-vivo sonuçlardan, olay alanı ve ortamın uyumsuzluğundan dolayı farklı olduğunu göstermektedir.

(Okano vd, 2017) SAR, mikrodalga ışınlarına maruz kalmanın neden olduğu insan dokuları üzerindeki biyolojik etkilerin bir göstergesidir. SAR değerlendirmesi için geleneksel olarak bir elektrik alan prob tarama yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, elektrik alan probunun güçlü frekans bağımlılığı göstermesi nedeniyle, SAR'ı geniş bantta sürekli olarak değerlendirmek zordur. Ayrıca, elektrik alan probundan fiziksel olarak farklı bir SAR ölçüm metodolojisi hazırlamak, ölçüm standartlarını veya yönetmeliklerini onaylamak için önemli bir görevdir. Bu nedenle, yazarlar optik fiber termal sensörleri kullanarak bir termal SAR ölçüm yöntemi geliştirdi. Bu makalede, geniş bantta 300 MHz ila 6 GHz arasında kullanılabilen ve mobil cihazlar tarafından sıklıkla kullanılan bir termal SAR değerlendirme metodolojisi sunulmaktadır. İlk defa SAR'ın 1.8 GHz civarında sürekli geniş bant ölçümüyle zirveyi gösterdiğini teyit etmiştir. Ek olarak, elektrik alan prob sistemi ve önerilen sistem ile bir karşılaştırma ölçüm sonucu olarak, her bir ölçüm verisinin ortalama değeri, tüm frekans aralığında yaklaşık% 10 ila% 20'lik bir sapma göstermiştir.

(Simakov vd, 2017) Günümüzde ev alanı da dahil olmak üzere büyüyen mikrodalga çevre kirliliği tüm sakinleri için gerçek bir problem haline gelebilir. Mikrodalga ev arkaplanının sürekli uzaktan izlenmesini sağlayan yeni taşınabilir cihazlar sunuyoruz. Bu üç farklı tasarım, dört ana insan mikrodalga güvenlik karakteristiğinin izlenmesine izin verir: SA - özel absorbe edilen enerji; MPE - maksimum izin verilen pozlama; SAR'ye özgü emilim oranı ve PD - güç yoğunluğu. Kişi, kişisel önlemler için ayrı ayrı mikrodalga duyarlılığıyla eşleştirmek için belirli bir alarm seviyesi ayarlayabilir. Yeni mikrodalga dozimetreler, akıllı ev uygulamalarında profesyonel, mesleki ve kişisel modlarda çalışabilir.

(Alcaras ve Frere, 2017)'de Yüksek Frekans (HF), Çok Yüksek Frekans (VHF) ve Ultra Yüksek Frekans (UHF) frekans bantlarında Özel Emilim Oranı (SAR) risklerine itaf edilmiş bir tez çalışmasının ana sonuçları sunulmaktadır. Bu tezin temel amacı, yüksek güç antenlerinin yakınındaki radyo askeri maruz kalınımının SAR yöntemini doğrulamaktır. SAR validasyonunun maliyetini ve gecikmesini azaltmaya ve bilinen biyolojik etkilerle ilgili olarak gerçek güvenlik sınırını nicelleştirmeye izin verecektir. Tam heterojen fantom kullanmak yerine, yeni heterojen fantom kavramı önerilmektedir. Analitik formüller, tüm vücut ve lokal SAR değerlendirmek için sunulmuştur ve onaylanmıştır. 3B termal ve elektromanyetik simülasyonlar sayesinde gerçek marjların niceliği hesaplanmıştır.

(Rana, 2018)'de radyasyon, SAR ve kablosuz iletişimde son çalışmalar tartışılmaktadır. Yeşil çevre için Elektromanyetik Enerji (EME) açısından enerji hasadı olanakları sunulmaktadır.

(Yu-Fa vd, 2016)'de akıllı gözlük uygulaması için 2.4 GHz Bluetooth takılabilir bir anten sunulmaktadır. Bu anten, iki anten elemanını birbirine bağlamak için koaksiyal kablo kullanılarak iki elemanlı düzlemsel ters-F antenlerden (PIFA) oluşmaktadır. Ayrıca, kullanıcının kafasındaki SAR, CST yazılımı tarafından sağlanan model kullanılarak da hesaplanmıştır. Yansıma katsayısı için frekans aralığı < -10 dB, 2.35 GHz ila 2.42 GHz arasındadır. Önerilen antenin maksimum kazancı, merkez frekansta 2.836 dBi'dir.

(Lin ve Chen, 2017)'de düşük özgül emilim oranı için cep telefonu için bir hexa band anteni geliştirilmiştir. Önerilen anten, iki katlı şerit ve bir dikdörtgen zemin düzlemini içeren basit bir yapıya sahiptir. Anten, GSM850 / 900 (824-960 MHz), DCS

1800 (1710-1880 MHz), PCS 1900 (1850-1990 MHz), UMTS (1920-2170 MHz) ve ISM 2450 (2400-2485 MHz) olmak üzere altı grubu kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan anten, sadece sistem devre kartında 50x20 mm²'lik küçük bir alanı kaplar. Şerit uzunluğunu ayarlayarak, SAR tüm bantlar üzerinde etkili bir şekilde azaltılmıştır. Anten, akıllı telefonlara dahil edilmek için umut verici bir adaydır.

(Meng ve Qian, 2018)'de biyoelektromanyetik araştırmalar için yeni bir paralel ve açık kaynaklı çapraz platform sistemi olan MedFDTD, Maxwell'in denklemlerini sonlu farklı zaman alanı yöntemini kullanıp çözerek geliştirilmiştir. Ayrıca bu sistem anten çıkış gücünü ve biyolojik dokuların özgül emilim oranını hesaplayabilir. Ayrıca, tüm paralel hesaplama görevlerini hızlandırmak için birden fazla CPU veya çeşitli çip tabanlı GPU'lar üzerinde MedFDTD uygulanabilir.

(Vazquez, 2016)'de SAR hesaplama yöntemlerinin, konu içerisinde elde edilen gerçek Elektrik Alan ölçümleri ile geliştirilebileceği belirtilmektedir.

(Gil ve Fernández-García, 2017) Bu çalışma iki ana mikroşerit giyilebilir antenin insan gövdesi üzerindeki SAR üzerindeki etkilerini ve bunların etki performansını kazanç, verimlilik ve gerekli alan açısından ele almaktadır. 2.45 GHz'de kablosuz vücut bölgesi ağ uygulamaları için tasarlanmış dikdörtgen yama ve PIFA kot giyilebilir antenler analiz altındadır. Gerçekçi bir voksel modelinin 1 g ve 10 g dokusunda ortalama SAR değerleri IEEE / IEC 62704-1 standardına göre hesaplanmıştır. Sonuçlar ICNIRP ve IEEE C95.1 tarafından belirlenen maruz kalma limitleri ile karşılaştırılmıştır.

(Ferreira vd, 2016) Kablosuz iletişim yetenekleri ile akıllı saatler ve akıllı camlar gibi giyilebilir cihazların kullanımı artık yaygınlaşmaktadır. İnsan vücuduna yakın elektromanyetik dalgalar yayan bu tür cihazların kullanımı da bir endişe konusu haline gelmektedir. Google Gözlük için yapılan simülasyon sonuçlarından, insan kafası için maksimum önerilen SAR değerinin sadece 0.9 GHz (GSM) bandında aşıldığı sonucuna varılmıştır. Wi-Fi, UMTS ve LTE için, maruz kalma problemleri yoktur, çünkü SAR gereksinimlerini karşılayan maksimum yayılan güç, standartlara göre bir seyyar terminalin yaydığı maksimum gücün üzerindedir.

(Manoufali vd, 2016b)'de 1 GHz'de yeni minyatür dairesel implante edilebilir antenin tasarımı, insan derisinin içindeki yakın alan radyasyon performansı ile birlikte sunulmaktadır. İnsan kafasının içinde minimal invaziv anten için, cilt, implantasyon

dokusu olarak seçilmiştir. Anteni etkili bir şekilde minimize etmek için, toplam 185 mm³ hacmini elde etmek üzere kısaltma iğnesine sahip eşit olmayan çapraz yuvalar eklenmiştir. Anten, silindirik bir biyo-uyumlu alümina substratı ve üst tabakada kapsüllenir. Önerilen anten, düşük sinyal zayıflaması ile insan kafasına iyi nüfuz etmek için 1 GHz civarında frekansta çalışmak üzere tasarlanmıştır. Antenin yüzeyine yakın alandaki reaktif yakın alandaki E-alanı dağılımı, uzak varyasyon ile mukavemeti araştırmak için farklı radyal mesafelerde değerlendirilmiştir. SAR için IEEE standartlarına uymak için, maksimum giriş gücü, xy, xz ve yz düzlemlerinde SAR simülasyonu ile birlikte türetilmiştir.

(Wang vd, 2018)'de bir metamaterial yapıya (MS) sahip esnek bir çift bantlı anten sunulmaktadır. Anteni ince ve bükülebilir kılan poliimid maddesi anten için alt tabaka olarak kullanılmıştır. MS anten ve insanın önkolu arasına yerleştirildiğinde, anten kazancı 9.3 ve 5.37 dB arttırılır ve radyasyon verimliliği sırasıyla% 48.4 ve% 35.7, 2.45 ve 5.8 GHz'de artmıştır. Ayrıca, Federal İletişim Komisyonunun getirdiği sınırlamalar ve yukarıda belirtilen frekanslar için ICNIRP düzenlenmesi dikkate alındığında, özgül emilim oranı % 70'ten fazla azalmıştır. Entegre MS ile antenin fabrikasyon prototipi, farklı insan bedenleri üzerinde olduğu gibi, insan vücudunun farklı yerlerine yerleştirilerek araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen antenin, Dünya Sağlık Örgütü'nün ICNIRP standartları açısından güvenli ve kullanıma uygun olduğunu göstermektedir.

(Wang vd, 2018) Hücresel cep telefonlarından ve ilgili cihazlardan insan üzerinde, özellikle de yakın mesafeden aktif kullanım sırasında salınan elektromanyetik radyasyon yoğunluğu ile ilgili yetersiz bilgi, 21. yüzyılın önemli bir sağlık sorunu ve korkusu olmuştur. Bu çalışma, araştırılan elektromanyetik radyasyon yoğunluğunun, iç mekan ortamındaki sekiz farklı cep telefonu modelinden, pratik ölçüm bazlı değerlendirme tekniği kullanarak rapor edilmesidir. Farklı telefon modelleri, radyo frekans ölçere, aktif çağrı modlarında, 0.05 m ölçüm aralıklarında, üç eksenli düzlemlerde 0,2 m'lik bir mesafeye kadar yerleştirilmiştir. Sonuçlar, telefonlardan gelen elektromanyetik radyasyon seviyelerinin, cep telefonu markası, kullanıcı tarafından cep telefonu mesafesi ve çağrılarının yapıldığı mühendislik hücresel radyo ağı ayarını içeren birçok faktöre bağlı olduğunu göstermektedir. En yüksek radyasyona maruz kalma yoğunluğu, görüşme sırasında alıcıyla yapılan çağrıları yaparken kaydedilir. Özellikle, sonuçlardan, bazı telefonların elektrik alanlarındaki

radasyon miktarının insan sağlığı güvenliği için ICNIRP tarafından önerilen standardtan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir; bu nedenle, güvenlik amacıyla vücudun en azından 0.01 m uzağında bir mesafede arama yapılması dşnlmelidir.

(Ishak vd, 2017) eşitli kablosuz cihazlarda çoklu antenlerle uğraşmak, sağlık etkisi sıkıntısını arttırmıştır. Böylece, elektromanyetik alan (EMF) radyasyonu ve insan sağlığı arasındaki ilişkilerin araştırılmasının keşfedilmesi önemlidir. Bu nedenle, bu yazı, 0.8, 0.85, 0.9, 1.9, 2.1 ve 2.6 GHz'de çalıştırılan tek ve 1 x 2 mikrostrip yama anteni dizisi üzerinde özgül emilim oranı (SAR) araştırmasını sunmaktadır. Anten, CST Microwave Studio 2016'da hem tek hem de 1×2 dizi araçları için 10 mm mesafede ve 0.19 W'da sabitlenen özel antropomorfik manken (SAM) insan kafa modeline yakın olarak uygulanmaktadır. Her ikisinin de SAR performansı; Tek ve çoklu antenler, ortalama 1g ve 10g doku kitlesindeki belirlenen tüm frekanslar için belirlenen standard limiti karşılamıştır.

(Inum vd, 2016)'de mikrodalga beyin görüntülemesi için bir sistem modelini ele alınmıştır. Gz önüne alınan sistem modelinin önemli bir parçası olarak, yayılan eleman bir mikroşerit yama anteni biçiminde tasarlanmıştır. Anten performansını arttırmak için, anten yer düzleminde iki elektromanyetik bant aralığı (EBG) yapıları dairesel ve dikdörtgen olarak önerilmiştir. Dikdörtgen ve dairesel EBG yapıları için anten performans parametrelerinin bir karşılaştırması sunulmuştur. Antenden 25 mm mesafede bulunan altı katlı bir insan kafası phantom modeli tasarlanmıştır. Dairesel EBG ile önerilen mikroşerit yama anteni için modellenen kafa dokusunun SAR, CST MWS yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Farklı SAR değerleri, dikkate alınan mikrodalga beyin görüntüleme sisteminin güvenlik düzenlemesini sağlamak için belirlenmiş standard SAR limiti ile karşılaştırılmıştır.

(Kopanoglu vd, 2013)'de doğrusal olmayan gradyan alanlarını kullanarak özgül emilim oranını azaltmak amaçlanmıştır. Bilindiği üzere özgül emilim oranı manyetik rezonans görüntülemenin ana güvenlik parametrelerinden biri olarak kullanılır. Görüntüleme sekanslarının performansı daha yüksek alan glerinde özgül emilim oranına getirilen sınırlamalar nedeniyle kısıtlanmaktadır. Spesifik absorpsiyon oranının azaltılmasında en iyi bilinen yaklaşım, muhtemelen gradyan dalga formlarını zaman içinde değiştiren, değişken selektif uyarım tekniğidir. Bu makalede, özgün absorpsiyon oranını azaltmak için uzayda doğrusal olmayan varyasyonlara sahip gradyan alanları kullanan alternatif bir yaklaşım sunulmuştur.

(Can ve Yılmaz, 2016)'de elektromanyetik kirliliğin yaygın olarak gözlemlendiği elektromanyetik spektrum için SAR azaltılmasında kullanılmak üzere Yapay Manyetik İletken (AMC) tasarımını sunmaktadır. Önerilen tasarım 0,4609 GHz bant genişliğine sahip olup, üç farklı vücut dokusu kullanılarak değerlendirilerek düzlemsel, silindirik ve CST SAM fantom kafa modellerinden oluşmaktadır ve AMC kullanımı ile belirgin bir azalma gözlenmektedir. 2,8 GHz ile 3,3 GHz arasında bir AMC özelliğine sahip olan önerilen tasarım, SAR değerinde düzlemsel insan dokusunda % 9'luk bir düşüş, silindirik doku için % 58,9, hayalet kafa modeli için % 18,4'lük bir azalma sağlamıştır.

(Zhao vd, 2016b)'de insanın SAR maruz kalınımının değerlendirmesi için yüksek çözünürlüklü gerçekçi bir insan kafa modeli sunulmuştur. Bu model ilk Çin elektromanyetik (EM) insan kafa modelidir (CMODEL). Model, 3.640 seri eksenel anatomik görüntü içeren ilk Çinli Görünür İnsan (CVH) veri seti kullanılarak inşa edilmiştir. Özellikle, model kafa kısmı için $0.16 \times 0.16 \times 0.25 \text{ mm}^3$ ve omuz kısmı için $0.16 \times 0.16 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 'lik bir voksel çözünürlüğüne sahiptir. Böyle bir yüksek çözünürlüklü model, SAR değerlendirmesi için 49 farklı doku ve organın doğru bir simülasyonunu mümkün kılmaktadır. Karşılaştırma amacıyla, CMODEL'in SAR değerlendirmesinde avantajını göstermek amacıyla, bir buçuk dalga boylu dipol anteni ile dalga gönderilen CMODEL ve HUGO modellerinden çıkarılan göz modelleri kullanılmıştır.

(Sorgucu vd, 2015)'de 900MHz ve 1800 MHz için kafa için oluşturulan doku eşdeğer sıvısının pratik bir şekilde oluşturulabilmesinden bahsedilmektedir. Bu hazırlanan doku sıvıları düşük maliyette hazırlanabilmesinin yanında kolay hazırlanabilmektedir ve düşük sıcaklıklarda dahi sıcaklık hassasiyeti olan ve toksik olmayan materyallerden elde edilmektedir. Ayrıca bakterisit gibi katkı maddeleri ile birlikte yıllarca dayanabilen bu sıvılar IEEE standardlarına oldukça yakın değerlere sahiptir.

(Atılğan vd, 2015)'de insan beyin dokusu üzerinde 900 MHz-1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarda elektromanyetik radyasyonların oluşturduğu sıcaklık artışı beyin dokusu fantom modeli kullanılarak araştırılmıştır.

3.TEORİ ve METOD

SAR, Specific Absorption Rate kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır ve başta cep telefonu ve diğer elektronik cihazlar için kullanım esnasında vücudun soğurduğu RF enerji miktarı olarak ifade edilebilmektedir (Anonymous, 2019a).

Mobil cihazlar, kullanımları sırasında şebekeyle haberleşme sağlayabilmek için düşük seviyede radyo dalgaları yaymaktadırlar. Bu radyo dalgaları RF enerji olarak bilinmektedir. Bu RF enerjinin emilim oranı SAR olarak karşımıza çıkmaktadır ve birimi watt/kg dır (Anonymous, 2019b).

SAR, verilen kütle yoğunluğuna (ρ) ait bir hacim elemanında (dV) bulunan çok küçük bir kütle artışı (dm) tarafından soğurulan, çok küçük bir elektromanyetik enerji artışının (dW) zamana göre türevi olarak ifade edilmektedir ve (3.2) nolu denklemdeki gibi ifade edilmektedir (Anonim, 2019c).

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dm} \right) \quad (3.1)$$

E alan şiddetini ölçerek yapılan SAR hesabı (3.2) nolu denklemde gösterilmektedir.

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} \quad (3.2)$$

Burada;

E_i , V/m cinsinden dokudaki elektrik alan şiddetinin etkin değeri,

σ , S/m cinsinden vücut dokusu iletkenliği,

ρ , kg/m³ cinsinden vücut dokusu yoğunluğunu belirtmektedir.

SAR verilen bir noktada sıcaklığın zamanla artış oranı olarak da ifade edilmektedir.

Sıcaklığın değişimine bağlı olarak hesaplanan SAR hesabı (3.3) nolu denklemde gösterilmektedir.

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt} \Big|_{t=0} \quad (3.3)$$

Burada;

c_i , J/kg cinsinden vücut doku ısı kapasitesi, dT/dt , K/s cinsinden vücut dokusu sıcaklığının başlangıç anında türevini ifade etmektedir.

Elektrik alan şiddetinin ölçülmesi ile SAR değerinin hesaplanması ticari olarak radyasyon yayan cihazların SAR değerinin ölçülmesinde kullanılan yöntemdir (Anonymous, 2019d). Bu yöntemde cihazın en yüksek ne kadar E alan şiddetine sahip olduğu tespit edilip, cihazın sahip olduğu en yüksek SAR değeri hesaplanmaktadır.

(3.3) nolu denklemde eşitliği verilen ısısal değişime göre SAR değeri hesaplanması ise temel bilimsel araştırmalarda kullanılan bir yöntem olup, bu ölçümü yapabilmek için kullanılan ekipmanlar çok hassas ve küçüktür.

Bu tez çalışmasında ölçümlerin yapıldığı PGM SAR laboratuvarlarında, cihazların tespit edilen en yüksek E alan şiddeti değerine göre SAR hesapları yapılmakta ve CST STUDIO programında yapılan simülasyonlarla birlikte değerlendirilmektedir (Anonymous, 2019e).

Bu çalışma için kullanılan CST STUDIO SUITE programının farklı amaçlar için kullanılan farklı araçları bulunmaktadır. Bu çalışmada CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) kullanılmıştır. Bu araç yardımıyla zaman alanı simülasyonunda yüksek frekanslı cihazların hızlı ve doğru 3D simülasyonu yapılabilmektedir. Bu araç kullanılmaya başlandığında biyomedikal, ölçüm, SAR sekmesi seçildikten sonra SAR hesaplaması istenen cihaz ve doku için seçilen frekansta zaman alanında yapılabilmektedir.

Yukarıda verilen değerler seçildikten sonra SAR hesaplamasına geçilebilir. SAR hesaplaması yapılabilmesi için öncelikle canlı doku sıvısının oluşturulması gerekir ve bu sıvının içeriği standartlarla belirlenmiştir. Doku sıvısının özelliklerinden 4. Bölümde bahsedilmiştir.

CST STUDIO programında yapılan SAM veya biyomodeller kullanılarak yapılan simülasyonlarda Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) metodu kullanılmıştır.

BTK'nın belirlediği E alan limit değerleri doğrultusunda 900 MHz frekansında izin verilen en yüksek EMA değeri 8.25 V/m 1800 Mhz frekansı için ise izin verilen en yüksek EMA değeri 11.66 V/m dir. Bu sınırların üzerinde veya altında ola E alan değerleri baz istasyonlarını temsil etmek için kullanılan GSM Sinyal Üretici gücünün farklı değerlere ayarlanmasıyla elde edilmiştir.

900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında baz istasyonunu temsilen, bu frekanslarda çalışan iki adet GSM Sinyal Üreteci kullanılmıştır. Bu simülatörlerden 900 MHz frekansında çalışan simülatör için 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 mW olmak üzere 6 farklı güç değerinde 1800 MHz için ise 250, 500, 1000, 1250, 1500 ve 2000 mW çıkış gücünde 6 farklı güç değerinde SAR ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler PGM SAR laboratuvarlarında cep telefonu SAR ölçümü için kullanılan sistemde yapılmıştır. Bu çalışma doğrultusunda GSM Sinyal Üreteci'ne uygulanan SAR deneyinde, 900 MHz'de her güç değeri için yaklaşık 20dk olmak üzere, 6 farklı güç değerinde, yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür.

Bu tez çalışmasında, baz istasyonlarının insan kafasının tamamında ve kafada bulunan dokulardaki etkisini incelemek amaçlanmış ve bu doğrultuda PGM SAR laboratuvarında yapılan ölçümler CST STUDIO SUITE programında kullanılan SAM yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Baz istasyonunu modellemek için kullanılan GSM Sinyal Üreteci yerine 900 MHz ve 1800 MHz de EMA yayılımını gerçekleştiren iki farklı monopol anten kullanılmıştır. Bu antenlerin güçleri PGM SAR Laboratuvarında alınan SAR (10 gr) değerleri elde edilecek şekilde değiştirilerek laboratuvar ortamı CST STUDIO programına başarıyla aktarılmıştır.

4. ÖZGÜL SOĞURMA ORANI DENEYLERİ

PGM Laboratuvarlarında uygulanan deneylerden biri de SAR deneyidir. Tüketici sağlığına yönelik ve güvenlik ile ilgili olarak hazırlanan kanunların etkisinde birçok otorite piyasada satılacak olan ürünler için SAR limitlerinin sağlanmasını istemektedir. Bu nedenle SAR ölçümleri cihaz üreticileri için giderek artan bir gereksinim haline gelmiştir. SAR deneyleri, cep telefonları için uygulanırken AB standartlarında belirtilen yöntemler uygulanmaktadır. Farklı cihazlar için standartlar çalışma aşamasında olduğundan dolayı ortak bir ölçüm yöntemi ve yöntemle ilgili olarak herhangi bir zorunluluk bulunmamaktadır.

Bu bölümde SAR limitleri, SAR standartları, SAR laboratuvarında kullanılan ekipmanlar, SAR deneyinin GSM Sinyal Üreteçlerine ve değerlendirilmesi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

4.2. Rehber Dökümanlar ve SAR Limitleri

Ölçülen SAR değerlerinin limit değerlerin altında olması gerekmektedir. Çünkü, limit değerlerin aşılması cihazın sağlık açısından risk teşkil edebileceği anlamına gelebilir. Dünyada bu limit değerler için 2 rehber doküman referans alınmaktadır. Bu rehber dökümanların biri ICNIRP iken diğer rehber doküman IEEE' nin yayınlamış olduğu dökümandır.

4.2.1. IEEE C95.1-2005

C95.1-2005, '3 kHz'den 300 GHz'e kadar Radyofrekans Elektromagnetik Alanlara İnsan Maruziyeti İle İlgili Güvenlik Seviyeleri İçin IEEE Standardı ' olarak 19 Nisan 2006 tarihinde yayınlanan standardtır (Anonymous, 2005a).

İnsanın RF enerjisine maruz kalınımından kaynaklanan etkilere olan ilgisi bir yüzyıldır bulunmaktadır. RF enerjisinin biyolojik sistemlerle olan etkileşiminden doğan zararlı olabilecek etkilerinden korunmak için çeşitli kriterler koyma çalışmaları yoğun bir şekilde 2. Dünya Savaşı'nın sonuna doğru yapılmaya başlanmıştır.

ABD'de askeri radarlarla çalışan kişilerin, radar ışınlarına maruz kalmaktan dolayı oluşan geçici kısırlık, göz lenslerinde görülen opaklık ve donukluk

başlangıcının raporlanması bu ilk çalışmaların kaynağını oluşturmaktadır. Mikrodalga enerjiye maruz bırakılan denek hayvanlarının göz lenslerinde opaklık meydana gelmesi ve bir radar teknisyenine ait katarakt raporu ile birlikte, RF/mikrodalga enerji ile biyolojik sistemlerin etkileşimlerini anlamak ve güvenlik limitlerini oluşturmak için ortak bir çalışma yapılması gerekliliği sonucuna varılmıştır.

Dünyada 1950 lerin ortalarına kadar farklı organizasyonlar tarafından korunma rehberleri oluşturulmuş olmasına karşın, ortak bir korunma kriteri üzerinde mutabık kalınamamıştır.

1960 da, Radyasyon Riskliler Standardları Projesi C95'in başlaması ve açık bir konsensüs süreciyle standardları geliştirmekle görevli bir komite (C95) kurulmasına Amerikan Standardlar Birliği (ASA) tarafından onay verilmiştir. İlk resmi RF güvenlik standardı projesinin kabulü bu şekilde gerçekleştirilmiştir. 1966 da yayınlanan ilk C95. 1. Standardı USAS C95.1-1966 (Anonymous, 1966) 6 yıl kadar süren görüşmeler sonucunda yayınlanmıştır. Maruz kalınma limiti, RPG (Radyasyon Koruma Rehberi) olarak tanımlanmıştır. Bütün vücut maruz kalınımı için RPG, 10 MHz den 100 GHz'e kadar frekans spektrumu boyunca 10 mW/cm^2 dir. 6 dakika ortalama zaman ve ilgili enerji yoğunluk limiti ise 1 mWh/cm^2 içerisindeydir. 6 dakika ortalama zamanın standardta belirtilmemesine rağmen diatermi¹ literatüründen geldiği görülmektedir.

USAS tarafından yayınlanan C95.1-1966'nın bir revizyonu 1974 yılında Amerikan Ulusal Standardlar Enstitüsü (ANSI) tarafından ANSI C95.1-1974 olarak yayınlanmıştır (Anonymous, 1974). Bu standardta bütün vücut için, güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu olarak belirtilen RPG ler 10 mW/cm^2 ve 1 mWh/cm^2 olarak sabit kalmıştır.

C95.1 standardına yapılan her revizyon sonucunda standard bir öncekine göre daha karmaşık ve daha bilimsel veriler içerir hale gelmiştir. ANSI C95.1-1982 isimli 1974 teki standardın revizyonu olan standardta önemli değişimler yapılmıştır. Bu değişiklikler, 1970'de enstrümantasyon ve kompleks elektromanyetik alanları ölçme ve en önemlisi de RF alandaki dozimetriyi² tespit etme tekniklerindeki önemli gelişmelere bağlıdır. Dozimetredeki gelişmeler, antropomorfik insan modeli ve hayvanların ayrıntılı gerçek modellerinin soğurma özelliklerini çalışmak için

¹ Diatermi: Vücudun yüksek frekanslı elektrik akımlarına karşı gösterdiği dirençten, mukavemetten faydalanarak dokularda hararet meydana getirilmesi, diatermi

² Dozimetri : Doz ölçümü, ışın dozunun tespiti

termografinin³ kullanımı, insan ve hayvanların basit küresel ve blok modellerinde enerji soğurma desenlerini çalışmak için sayısal tekniklerin kullanımını içermektedir. Bu çalışmalar, RF alanda nesneler tarafından frekansa bağlı emilimin daha açık olarak anlaşılmasına öncülük etmiştir.

1966 ve 1974'teki standartlarda RPG'ler frekanstan bağımsız olarak düşünülmüştür. 1970'li yılların ortalarında ise alanda nesne tarafından soğurulan RF enerji miktarı frekansa bağlı olarak düşünülmüştür. Aynı zamanda RPG'lerin de frekansa bağlı olması gerektiği düşünülmüştür.

RF dozimetri çalışmaları, örneğin hayvan ve insan modellerinde RF soğurma çalışmaları, termografi teknikleri ve sayısal modelleme kullanılarak çeşitli bilim adamları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar elektromanyetik alanların alan polarizasyonu, fonksiyon frekansı, alandaki nesnenin niteliği ve uyumu, boyutu, geometrisi ile nasıl ilgili olduğunu anlamamızı sağlamıştır.

1970 lerde C95 alt komitesi 4 (SC4) ile yapılan görüşmeler ve çok sayıda toplantı sonrasında, ‘‘özellik soğurma’’ (SA), artan bir kütlede yayılan artan enerjinin emilimi ve SAR artan bir kütlede yayılan artan enerjinin emiliminin zamana oranı olarak tanımlanmıştır. SA ve SAR birimleri J/kg ve W/kg dır. SA ve SAR'ın ilk olarak 1981'deki NCRP Bilimsel Komitesi 39 Raporu (67 sayılı) nda RF dozimetrik niceliği olarak tanımladığı görülse de, 1970lerin sonlarında C95.1-1982 nin gelişimi sırasında C95 SC4 tarafından kabul edilmiştir. Bunun yanında kötü olarak düşünülen etkiler için bir SAR eşiği belirlemede veritabanındaki çalışmaların sonuçlarını kıyaslamak amacıyla etkili olarak kullanılmıştır (Anonymous, 1981). Artan sayıdaki dozimetri çalışmalarının sonucundan ve bu eşik değerden frekansa bağlı limitler, oluşan alanlarla ilgili olarak ifade edilmiştir. Bu limitlere, iyonlaşan radyasyon topluluğu tarafından kullanılan RPG terimi ile karışıklığı önlemek için Radyofrekans Koruma Rehberleri (RFPG) denilmiştir. Çocuklardan yetişkinlere çeşitli boyutlardaki insanlar için ve çeşitli elektrik alan maruz kalınım şartları altında SAR'ın eşik değerin altında kaldığını, RFPG'lere olan uygunluk sağlamaktadır.

1982 C95.1 standardının gelişimi sırasında SC4 tarafından RF enerjinin etkileriyle ilgili olarak yüzlerce raporlanmış deneysel çalışma incelenmiştir. 32

³ Termografi : Teşhis amacıyla, vücutta meydana gelen ısı değişimlerinin bir fotoğraf kağıdı üzerine yazılı olarak kaydedilmesi

çalışmadan oluşan seçilmiş bir liste ispatlanabilme, konuyla ilişki, tekrarlanabilme ve dozimetrik ölçülebilme kalitesi gibi kriterlere göre derlenmiştir. Sürekli ve şiddetli, hastalık, zayıflatma gibi genel etkilerin ispat edildiği çalışmalar vurgulanmıştır. 15 kategori ve biyolojik konu başlığı altında, her kategoride çok sayıda çalışma arasından seçim kriterlerini karşılayanlar toplanmışlardır (Anonymous, 1982).

SC4'teki biyologlar ve bunun yanında güvenilirlik, kötü etkilerin delilleri ve çalışmanın başka bir laboratuvarda bağımsız olarak tekrarlanıp tekrarlanmadığının öneminden kaynaklı olarak, eğitimli bilim adamları ve mühendisler tarafından çalışmalar incelenmiştir. Bunun yanında her çalışma için SAR, mühendisler tarafından belirlenmiştir.

ANSI C95.1-1982 standardında 32 çalışmaya yer verilmiştir. Ele alınan en önemli biyolojik değerlendirme sonucu ise davranışsal bozukluktur. Davranışsal bozukluk eşiğinin, tüm vücut ortalama SAR değerinin 4-8 W/kg aralığında olduğunda meydana geldiği tespit edilmiştir. Böylelikle, 4 W/kg'ın altındaki değerlerin zararlı olabilecek etkilere neden olmadığı, 4 W/kg değerinin üstünde kötü etkilerin meydana gelebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca güvenlik faktörü üzerinde de ANSI C95.1-1982'de durulmuş ve 10 güvenlik faktörü belirlenerek, tüm vücut ortalama SAR limiti 0,4 W/kg olarak değerlendirilmiştir.

Bu dönemde NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurement) daha çok iyonlaşan radyasyon ile ilgilenmesine karşın, RF enerjiye maruz kalınmayla ilgili tavsiyeler yapmak için çalışmaya başlayarak, bilimsel çalışmaları içeren yaklaşık 1000 çalışmayı incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda davranışsal bozukluğa bağlı SAR değerleri aralığını 3-9 W/kg olarak belirlemiştir. Bunun yanında Çizelge 4.1'de görülen ANSI C95.1-1982'de belirlenen 0,4 W/kg limit değerinin de uygun olduğu görüşüne varılmıştır. Sonuç olarak NCRP 1986 raporunu yayınlayarak katkıda bulunmuştur (Anonymous, 1986).

Çizelge 4.1. ANSI C95.1-1982 ile NCRP Raporu 86 Değer Tablosu

Parametre	ANSI C95.1-1982	NCRP Raporu 86
Deneyssel veri	Nispeten küçük 32 çalışma	Geniş
En önemli biyolojik etki noktası	4-8 W/kg	3-9 W/kg
Davranışsal bozukluğa neden olan tüm vücut ortalamalı SAR değerleri	4-8 W/kg	3-9 W/kg
Tüm vücut ortalamalı SAR limiti	0.4 W/kg	0.4 W/kg 0.08 W/kg (Genel Halk Maruz Kalınımı)
Ortalama zaman	6 dak.	6 dak.
Bölgesel Maruz Kalınımı için Kriter	Tüm vücut ortalamalı SAR<0.4 W/kg Tepe uzaysal ortalama SAR<8 W/kg	Tüm uzaysal ortalama SAR<8 W/kg Tepe uzaysal ortalama SAR<2 W/kg (Genel Halk Maruz Kalınımı)
Özel Kriter	Yok	Var (çalışanların maruz kalınımı)

SC4 çalışma grubu, eksik kalmış hususları yeniden gözden geçirmek üzere, ANSI C95.1-1982 standardının yayınlanmasının ardından çalışmaya başlamıştır. 1982 standardının 300 kHz ile 300 GHz tüm frekans aralığını kapsamasına rağmen, bölgesel elektrik alan maruz kalınımında 1g ortalama hacim için geometrik bir şekil tanımlamamıştır.

1991 IEEE standardı 1991’de onaylanarak 1992’de yayınlanmıştır. Aynı yılda ANSI, ANSI/IEEE C95.1-1992 olarak bir standard yayınlamıştır. Bu standard 1991 IEEE standardının Amerikan Ulusal Standardı (1982 standardının revizyonu) olarak adapte edilmiş halidir (Anonymous, 1991)(Anonymous, 2019f). Bu standardta, tepe uzaysal ortalama için 20 toleransı belirlenerek, vücut kısımlarının maruz kalınımı ele alınmıştır. Bu tolerans, düzlem dalga maruz kalınım şartlarına bırakılmış hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalar ve dozimetrik çalışmalar sonucunda, tepe uzaysal SAR değerinin tüm vücut ortalama SAR değerinden 20 kat fazla ortaya çıkması sonucunda konulmuştur. Ayrıca, 100 kHz den 6 GHz’e frekans aralığı belirlenmiş ve bir küp şeklinin içerisindeki ortalama hacim tanımlanarak tepe uzaysal SAR’ı tespit etmenin

zor olduğu frekanslardaki problemler ortadan kaldırılmıştır. C.95.1-1992 standardında belirtildiği gibi tüm vücut ortalama SAR değeri kontrollü çevreler için 0,4W/kg olarak kalırken kontrol edilemeyen çevreler için bu değer 0.08 W/kg'dır. Tepe uzaysal ortalama SAR değeri ise kontrollü çevre için 8W/kg ve kontrolsüz çevre için 1,6 W/kg (dar bir bant aralığında ve bir küp içindeki herhangi 1g'lık doku örneği üzerinden ortalamalı) olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte kontrollü çevre için eller ve ayaklar, bilekler, ayak bileği gibi kısımlar için de tepe uzaysal ortalama SAR değeri 20 W/kg ve kontrolsüz çevre için ise 4W/kg (bir küp içinde 10 g doku içerisinde) olarak belirlenmiştir.

1997 yılında standard yeniden gözden geçirilip tasdik edilmiş ve 1999 Supplement 1 ile birlikte bazı tanımlamalar daha net açıklığa kavuşmuştur. 2005 yılında standardta revizyona gidilerek ve 19 Nisan 2006 tarihinde yayınlanmıştır (Anonymous, 2005b).

4.2.2. ICNIRP Rehberi

IEEE C95 standardı, Radyasyondan Korunma ve Ölçüm Ulusal Konseyi (NCRP) tavsiyeleri ve the Uluslararası Radyasyondan Korunma Birlikleri (IRPA) İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Uluslararası Komisyonu (ICNIRP)'nın rehberleri, dünyada en çok kullanılan standartlardır. ICNIRP 1992 Mayıs'ta bağımsız bir komisyon olarak çalışmaya başlamıştır (Anonymous,2009). ICNIRP de IEEE ve NCRP gibi bilimsel çalışmaları izleyen bilimsel komitelerden oluşmuş bir organizasyondur. Bu kuruluş RF mikrodalga enerjisine maruz kalma ile ilgili tavsiye kararlar çıkartmaktadır. ICNIRP'nin en son rehber dökümanı Kasım 1997 de onaylanarak ve 1998 de basılmıştır. Bu rehber doküman 12 farklı ülkeden uzman ve bilim adamının katılımıyla geliştirilmiştir. ICNIRP rehber dökümanı, ANSI, IEEE ve NCRP komitelerinin uyguladığı gibi, meydana gelen etkiler dikkate alınarak raporlanmış çalışmalara dayanmaktadır. Bu amaçla çok sayıda çalışma incelenmiştir.

ICNIRP'de, ANSI/IEEE ve NCRP komiteleri gibi potansiyel zararı gösteren en güvenilir etkinin davranışsal bozukluk olduğu sonucuna varmıştır. Bununla ilgili eşik seviyesini ise 4W/kg olarak belirlemiştir. Çalışma yerleri için 10 güvenlik faktörü belirlenmiştir ve bununla birlikte genel halk için ilave 5 güvenlik faktörü de eklenmiştir. Buna göre çalışma yerleri için maksimum tüm vücut ortalamalı SAR değeri 0,4 W/kg ve genel halk için 0,08W/kg olarak belirlenmiştir. Tepe uzaysal SAR

değeri, bölgesel maruz kalma, çalışanların maruz kalması 10W/kg ve halkın maruz kalması 2 W/kg (10 g yakın dokulardaki ortalama) olarak temel kısıtlamalar belirlenmiştir.

Dünya ülkelerinin büyük bir kısmı ICNIRP'nin belirlemiş olduğu limitleri kullanmaktadır. ICNIRP ile IEEE C95.1-2005 arasındaki karşılaştırma Çizelge 4.2'de verilmiştir. ABD' de FCC kurallarının uygulanması hakkında rehber doküman FCC OET(Office of Engineering and Technology) 65 Supplement C 01:01 ile oluşturmuştur (Anonymous, 2019g). Bu doküman için limit değerler ANSI/IEEE C95.1-1991 standardından alınmıştır. Limit tepe uzaysal SAR değerleri, genel halk için 1 gr doku örneğinde 1,6 W/kg ve tüm vücut ortalama için 0,08 W/kg'dır. OET'in açılımı FCC'nin Mühendislik ve Teknoloji Ofisidir (Anonymous, 2019h). IEEE C95.1-2005 standardının yayınlanması ile yeni limitler gündeme gelmiştir ve bununla birlikte IEEE tarafından güncellenmesi için başvurulmuştur. FCC'nin adapte etmesiyle ABD' deki limitlerin de güncellenmesi beklenmektedir (Anonymous, 2007)(Anonymous, 2006). ICNIRP ile IEEE C95.1-2005 Değer Tablosu Çizelge 4.2'de, dünya'da mevcut durumda kullanılan olan SAR limitleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. ICNIRP ile IEEE C95.1-2005 Değer Tablosu

Parametre	ICNIRP	IEEE C95.1-2005
Frekans Aralığı	~ 100 kHz to 300 GHz	~ 100 kHz to 300 GHz
Deneyisel Veri	Geniş	Geniş (~1100 çalışma)
En önemli biyolojik etki noktası	Davranışsal bozukluk (~ 1 °C sıcaklık artışına bağlı)	Davranışsal bozukluk (~ 1 °C sıcaklık artışına bağlı)
Davranışsal bozukluğa neden olan tüm vücut ortalama SAR değerleri	1-4 W/kg	~ 4 W/kg
Tüm vücut ortalama SAR limiti	0.4 W/kg (Çalışanlar) 0.08 W/kg (Genel Halk)	0.4 W/kg (Kontrollü Çevre) 0.08 W/kg (Eylem Düzeyi)
-Uygulanan frekans aralığı	100 kHz den 10 GHz'e	100 kHz den 3 GHz'e

Çizelge 4.1. (devam)

Tepe uzaysal ortalama SAR (bölgesel maruz kalınım)	10 W/kg (Çalışanlar) 2W/kg (Genel Halk) 10g yakın doku	10 W/kg (Kontrollü Çevre) 2 W/kg (Eylem Düzeyi) 10 g doku bir küp şekli içerisinde
-Ortalama hacim	6 min (Çalışanlar)	6 min (Kontrollü Çevre)
-Ortalama zaman	6 min (Genel Halk)	30 min (Eylem Seviyesi)
El-ayaklar için limitler	20 W/kg (uzuvlar)	20 W/kg (el-ayak,kulak kepeçesi)
-Üst sınır	4W/kg (uzuvlar)	4W/kg (el-ayak, kulak kepeçesi)
-Alt sınır	100 kHz < f ≤ 10 GHz	100 kHz < f < 3 GHz
-Frekans aralığı		6 dak (f ≤ 3 GHz)
Ortalama zaman (f > 100 kHz)	6 dakika (f ≤ 10 GHz) 300 GHz de 10 sn	300 GHz de 10 sn azalarak
-Üst sınır	azalarak	100 MHz < f ≤ 5 GHz
-Alt sınır		İçin ortalama zaman 30

Çizelge 4.3. Dünya genelinde halk maruz kalınımı için kullanılan SAR limitleri

	Tüm Vücut SAR	Bölgesel (Örn. Baş) SAR	Ortalama Zaman	Ortalama Kütle
ICNIRP	0,08 W/kg	2 W/kg	6 dakika	10 g
FCC	0,08 W/kg	1,6 W/kg	30 dakika	1g

4.3. SAR Standardları

SAR değerlerinin ölçüm yöntemleri ile ilgili standartlar, SAR limitlerinin rehber dökümanlarda belirtilmesiyle birlikte hazırlanmıştır. Bu standartlar IEC, CENELEC ve IEEE tarafından hazırlanmış standartlardır.

4.3.1. IEC Standardları

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission-IEC) elektroteknoloji olarak bilinen bütün elektrik, elektronik ve ilgili teknolojiler için uluslararası standard hazırlayıp yayınlamaktadır. IEC TC 106, insanın maruz kaldığı elektrik, manyetik ve elektromanyetik alanları belirlemek için metodlar geliştirmekle sorumlu bir organizasyondur (Anonymous 2008).

2005 yılında IEC, IEC TC106 WG4 tarafından yürütülen IEC 62209-1 standardını, insan kafasına yakın kullanılan cihazlar için yayınlamıştır. 62209-1 standardı, SAR ölçümü için prosedürü, 300 MHz ile 3 GHz frekans aralığında çalışan

elde tutulan mobil kablosuz cihazlar için ortaya koymaktadır. IEC 62209-1, SAR ölçümleri için temel metodolojileri ortaya koymakta, fakat kulağa yakın tutulan cihazlarla kısıtlı kalmaktadır. IEC 62209-2 ise frekans aralığını daha geniş tutmayı amaçlamaktadır. Bunun yanında bu standard, vücuda takılan cihazlar (PTT: Push-to-talk), laptoplar, PDA'lar gibi farklı cihazları da kapsamaktadır (Anonymous, 2019i). Bunun yanında baz istasyonlarının SAR hesapları için IEC 62232 standardına 2005 yılında çalışmaya başlanmış, en güncel versiyonunu 2017 yılında yayınlamıştır (Anonymous, 2019i).

4.3.2. CENELEC Standartları

Avrupa Birliği 1999 yılında bir Konsey Tavsiyesi yürürlüğe koymuştur (Anonymous, 1999a). Bu tavsiye ile AB üye ülkelerinden Elektromanyetik alan maruz kalınım sınırlamasına dikkat etmeleri beklenmektedir. Bu dokümanın önerileri ICNIRP dökümanındaki genel halk için verilen temel kısıtlamalardır. Bu amaçla CENELEC tarafından geliştirilen standartlardan ilki EN 50360:2001 standardıdır. Bu standard SAR limitleri için Konsey tavsiyesine istinaden mobil telefonlar için geliştirilmiştir. EN50360, bu standardın kapsamı içerisindeki ürünlerin gereksinimleri karşılama gerektiren RveTTE Direktifi altındaki harmonize bir standardtır (Anonymous, 1999b). AB'de piyasaya sürülen bu standard, ölçüm metodlarının anlatıldığı EN 50361 standardını oluşturmuştur. Ölçüm metodolojisini içinde barındıran EN50361 ise birçok diğer ulusal standard içinde birleştirilmiş veya adapte edilmiştir.

EN50360 standardında ICNIRP'nin belirlemiş olduğu sınır değerler kabul edilmiştir, bunun yanında mobil cihazdan yayılan ortalama gücün 20 mW'a eşit veya az olması durumunda cihazın testine gerek olmadığı, yüksek olması durumunda 50361 standardındaki metodolojiye göre test edilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

EN 50361 standardı 2006 Temmuz ayında IEC 62209-1 standardıyla değişerek EN 62209-1 standardı olmuştur. Bu standardın 2016 yılında yayınlanan bir sürümü mevcuttur (Anonymous, 2019j). IEC standardının 1 gr ve 10gr'lık kütle için ölçüm yöntemlerini içermesi ve çevre şartları, EN 50361 ve IEC 62209-1 standardının temel farklılığıdır.

CENELEC standartlarının numaralandırılması dikkate alındığında, 50000 ile 59999 arasındaki standard sayılarının CENELEC çalışmaları olduğu, 60000 ile 69999 arasındaki standard sayılarının IEC'den değişmeksizin veya değiştirilerek uyarlanan

standartlar olduğu belirlenmiştir. CENELEC web sitesinde belirtilmektedir (Anonymous, 2019k).

CENELEC, EN 50383 standardı ile radyo baz istasyonları için SAR değerlerinin ölçülmesi ve hesaplanmasına ait temel standard ortaya koymuştur. (Anonymous, 2019l; Anonymous, 2019m).

4.3.3. IEEE Standardları

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), endüstriyel standard gelişimine öncülük eden ve uluslararası kar amacı gütmeyen bir organizasyondur. 1 Hz'den 300 GHz'a frekans aralığındaki elektromanyetik enerjiye maruz kalmanın, insana zararlı etkilerine karşı güvenli kullanım için standartlar geliştirmekten sorumlu komite, IEEE Elektromanyetik Güvenlik Üzerine Uluslararası Komitesi (ICES) dir (Anonymous, 2009n).

Mobil telefonlara yönelik, 300 MHz ile 3 GHz frekans bandında çalışan kablosuz haberleşme cihazlarını kapsayan IEEE 1528 standardı 2003 yılında IEEE tarafından yayınlanmıştır. IEEE 1528, kablosuz haberleşme cihazlarının, insan kafasında tepe uzaysal ortalama SAR'ı belirlemek için IEEE'nin tavsiye ölçüm yöntemlerini içermektedir. 2005 yılında yayınlanan eki ise IEEE 1528a dır. Bu ekte SAM fantom için CAD dosyası ilave edilmiştir (Anonymous 2009; Anonymous 2005-2006).

Ayrıca IEEE 2005 yılında 30 MHz-6 GHz fekans aralığında IEEE 1528'in 4 yeni alt standardı üzerinde çalışmaya başlanmıştır. Bunlar; IEEE 1528.1: SAR hesaplamaları için Sonlu Fark Zaman Düzlemi (FDTD) (Finite Difference Time Domain) metodunu kullanmak için genel gereksinimler, IEEE 1528.2: Araçlara takılı antenlerin FDTD modellenmesi için özgün gereksinimler, IEEE 1528.3: Mobil telefonlar/Kişisel kablosuz cihazların FDTD modellenmesi için özgün gereksinimler, IEEE 1528.4: SAR hesaplaması için sonlu eleman metodu kullanmak için gerekliliklerdir (Anonymous, 2005) (Anonymous, 2009o). Ayrıca IEEE 1528 standardının 2013 yılında yayınlanan IEEE-1528-2013 isimli bir sürümü mevcuttur (Anonymous, 2019o). 2019'da geçerli standartların kapsam ve durumları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. 2019 yılı itibariyle geçerli standartlar, kapsam ve durumları

Test Konfigürasyonu	Method Standard	Alt Frekans	Üst Frekans	Durum
Başa Yönelik	IEC 62209-1 :2016	300MHz	6 GHz	2016
Başa Yönelik	IEEE 1528-2013	300MHz	6 GHz	2013
Başa Yönelik	IEC 62209-1 :2016	300 MHz	6 GHz	2016

4.4. Türkiye’de Mevcut Standartlar ve Limit Değer

CENELEC standartları EN 50360 ve EN 50361, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından yayınlanmış, TS EN 50360 ve TS EN 50361 olarak uygulanmaktadır. PGM SAR laboratuvarında kurulumundan itibaren yapılmakta olan deneylerde bu standartlar kullanılmıştır. Sonrasında EN 50361 standardı yerini IEC 62209-1’e bırakmıştır. 9.11.2010 tarihinde kabul edilen bu standard TSEN62209-1 olarak (Anonymous, 2019ö) olarak isimlendirilmektedir. Böylece PGM SAR laboratuvarında SAR sistemi yeni standarda hazır hale getirilmiş, talimatlar güncellenmiştir. Mevcut durumda, PGM SAR laboratuvarında IEC 62209-1 standardı kullanılarak SAR deneyleri yapılabilmektedir.

Türkiye’de kafa bölgesi için genel halk elektrik alan maruz kalınımına bağlı SAR limiti 2W/kg’dır (Anonymous, 2019p). Kabul edilen bu limit RveTTE direktifi ve EN 50360 standardına bağlı olarak ICNIRP’nin belirlemiş olduğu SAR limitidir.

4.4.1. Türkiye’nin SAR Laboratuvarı Açısından Mevcut Durumu

Türkiye’de iki adet SAR laboratuvarı faaliyette bulunmaktadır. Bu laboratuvarlardan bir tanesi Tubitak bünyesinde Gebze’de bulunurken, tez çalışması kapsamında SAR ölçümlerinin yapıldığı diğer laboratuvar ise BTK bünyesinde Teknik Düzenleme ve Standardizasyon Dairesi Başkanlığı Hacettepe Üniversitesi Beytepe kampüsünde Piyasa Gözetimi Laboratuvarı’nda bulunmaktadır.

Türkiye’deki bu iki SAR laboratuvarını incelediğimizde, TÜBİTAK bünyesinde bulunan SAR laboratuvarının faaliyetlerinin düşük olduğu görülmektedir. Türkiye’de bu kapsamda kısıtlı sayıda ekipman üretimi bulunması ve TÜBİTAK’ın üreticiler dışında bir müşteri portföyü olmaması bunun sebebi olarak

değerlendirilmektedir. Bu anlamda Türkiye’de çalışan en etkin SAR Laboratuvarı PGM SAR Laboratuvarı’dır.

PGM SAR Laboratuvarı PGM faaliyetlerini yürütürken, öte yandan bu tez çalışması için yapılan ölçümlerde olduğu gibi üçüncü kişilerin test taleplerine de karşılık vererek araştırma geliştirme faaliyetlerine destek olmaktadır.

4.4.2. PGM SAR Laboratuvarı Kapasitesi

Bu bölümde deneylerin yapılma süresine göre PGM SAR Laboratuvarının deney kapasitesi yer almaktadır.

4.4.2.1. Hazırlık Deneyleri

Hazırlık deneylerinin süresi ortalama 3 saattir.

- Her frekans (900 MHz veya 1800 MHz) için ayrı kurulum gereken bu deneyler her mobil telefon için uygulanmaktadır.
- Sıvı Kalibrasyonu 1 saat 15 dak. sürmektedir (Fantomun sıvıyla doldurulması, numuneler alınması, geçirgenlik sabitlerinin tespiti).
- Gürültü Deneyi 45 dak. sürmektedir. (Fantomun sağ, sol ve düz kısımlarında yapılmaktadır.)
- Dipol Doğrulama Deneyi 1 saat. sürmektedir (Dipol antenin yerleştirilmesi, güç ayarlaması yapılmasıyla fantomun düz kısmında gerçekleştirilmektedir).

4.4.2.2. SAR Deneyi (900 MHz)

900 MHz frekansında mobil telefonlar için yapılan SAR deneyi ortalama üç saat sürmektedir.

- Deneyler fantomun sağ ve sol kısımlarında olmak üzere ikiz fantom’da yapılmaktadır. GSM mobil telefon ilk olarak konuşma moduna alınmaktadır.
- Deney pozisyonları şu şekildedir; Sağ Fantom’da yanak ve 15° açılı pozisyon, Sol Fantom’da yanak ve 15° açılı pozisyon; bu pozisyonlarda ilk olarak 4 deney yapılmaktadır ve bu 4 deneyden çıkan en yüksek SAR değeri için pozisyon tespit edilmektedir. Tespit edilen bu pozisyonda üst ve alt kanallarda 2 deney daha yapılmaktadır. 900 MHz için yapılan toplamda 6 deney sonucunda en yüksek SAR değeri tespit edilmektedir.

- Her deney için mobil telefon hizalanarak, simülatör cihazıyla bağlantı kurulması sağlanmaktadır. Buna bağlı olarak deney süresindeki artış değerlendirilmektedir.
- Her deney süresi 20 dakika sürmektedir. 6 deney için toplam süre 2 saattir.

Bu çalışma doğrultusunda GSM Sinyal Üretici ile yapılan SAR deneyinde ise, 900 MHz'de her güç değeri için yaklaşık 20dk olmak üzere, 6 farklı güç değerinde, yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür.

4.4.2.3. SAR Deneyi (1800 MHz)

1800 MHz frekansında mobil telefonlarda yapılan SAR deneyi ortalama üç saat sürmektedir.

- Deneyler fantomun sağ ve sol kısımlarında olmak üzere ikiz fantom'da yapılmaktadır. GSM mobil telefon ilk olarak konuşma moduna alınmaktadır.
- Deney pozisyonları şu şekildedir; Sağ Fantom'da yanak ve 15° açılı pozisyon, Sol Fantom'da yanak ve 15° açılı pozisyon; bu pozisyonlarda ilk olarak 4 deney yapılmaktadır ve bu 4 deneyden çıkan en yüksek SAR değeri için pozisyon tespit edilmektedir. Tespit edilen bu pozisyonda üst ve alt kanallarda 2 deney daha yapılmaktadır. 1800 MHz için yapılan toplamda 6 deney sonucunda en yüksek SAR değeri tespit edilmektedir.
- Her deney için mobil telefon hizalanarak, simülatör cihazıyla bağlantı kurulması sağlanmaktadır. Buna bağlı olarak deney süresindeki artış değerlendirilmektedir.
- Her deney süresi 20 dakika sürmektedir. 6 deney için toplam süre 2 saattir.

Bu çalışma doğrultusunda GSM Sinyal Üretici ile yapılan SAR deneyinde ise, 1800 MHz'de her güç değeri için yaklaşık 20dk olmak üzere, 6 farklı güç değerinde, yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür.

4.5. SAR Değerlerinin Ölçülmesi

Uluslararası kuruluşlarca kafa bölgesi ve vücut için SAR limitlerinin belirlenmesinden sonra, standard geliştirme çalışmaları, SAR ölçümlerinin nasıl yapılması gerektiğine dair ortak bir metod bulmak amacıyla başlamıştır. Öncelikle kafa bölgesi için standartlar geliştirilmiştir ve bu standartlar son halini almıştır. Düşük güç seviyesine sahip, yani 20 mW veya daha düşük çıkış güçlü mobil telefonlara SAR deneyi

uygulamaya gerek olmadığı bu standartlardaki belirleyici unsurdur. Bunun yanında, bu standartlarda mobil telefonlar kullanıldıkları frekans bandına göre ayrılmamıştır. Bu standartlar 300 MHz ile 3 GHz bandında çalışmakta olan tüm mobil telefonları kapsamaktadır ve mobil telefonlarda kullanılan iletim teknolojileri olan FDMA (Frequency Division Multiple Access- Frekan Bölmeli Çoklu Erişim), TDMA (Time Division Multiple Access-Zaman Bölmeli Çoklu Erişim), CDMA (Code Division Multiple Access- Kod Bölmeli Çoklu Erişim), W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access - Geniş bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim) teknolojilerin tamamında kullanılmaktadır.

Vücut ölçümlerinde ise; IEEE 62704-1-2017 - IEC/IEEE isimli 2017 yılında yayınlanan bir standard bulunmaktadır. Bu standard, ‘‘Kablosuz İletişim Aygıtlarından İnsan Vücudunda Tepe Üç Boyutlu Ortalama SAR Belirlenmesi İçin Uluslararası Standard, 30 MHz - 6 GHz’’ olarak yayınlanmıştır. (Anonymous 2017).

PGM SAR laboratuvarında iletişim teknolojisi TDMA (Time Division Multiple Access-Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)’i kullanan ve 900 MHz ve 1800 MHz band aralığında çalışan GSM mobil telefonlar deneye tabi tutulmaktadır. İlave ekipman ve yazılım güncellemesiyle PGM SAR laboratuvarındaki sistem yeni teknolojilere yükseltilebilecek kapasitededir.

4.5.1. SAR Sistemi Ölçüm Elemanları

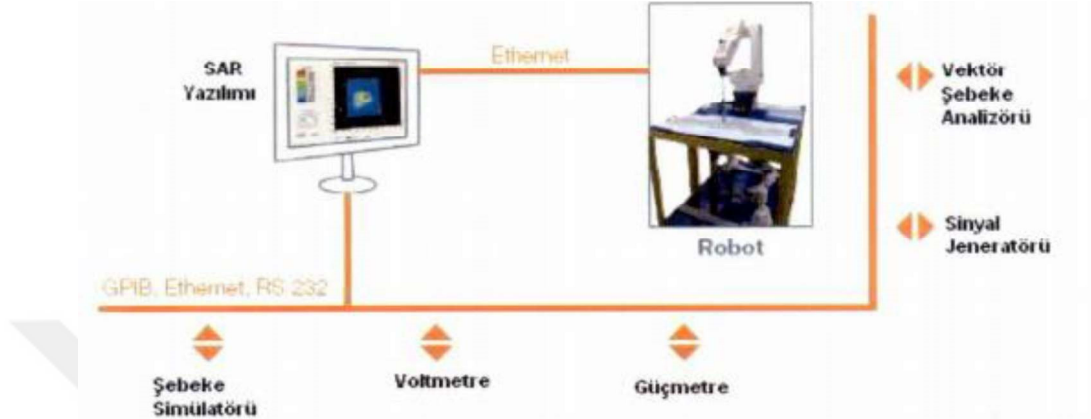
SAR Sistemi ölçüm elemanları, yazılım, veri alma sistemi, tarama sistemi, fantom ve cihazların hizalanması, sıvı kalibrasyonu ölçümü, sistem kontrol ve doğrulama deneyi, deney şartlarının kontrolü, numune cihazın haberleşmesi ve SAR odası başlığı altında verilmiştir. SAR sistemlerinde kullanılan bu ölçüm elemanları, konu başlıkları halinde, hem PGM SAR laboratuvarındaki kullanımlarıyla hem de genel olarak incelenmiştir.

4.5.1.1. Yazılım

SAR sistemlerinde standardta belirtilen ölçümleri yönetebilecek ve gelen veriler ışığında SAR değerlerini hesaplayabilecek kapasitede, E alan şiddetinin yoğun olduğu alanı gösterir kabiliyette, iyi çözünürlükte, yazılımlar kullanılmaktadır.

Bu doğrultuda PGM SAR laboratuvarında Opensar yazılımı kullanılmaktadır. Ölçüm ve sistemle ilgili planlama bu yazılım üzerinde gerçekleştirilmektedir. Sisteme

bağlı cihazlar, ölçüm adımları, tarama yolları, sıvı kalibrasyonu değerlendirmesi, doğrulama deneyi, test edilen cihazın iletişimi, veri alma sisteminden gelen verilerin değerlendirilerek SAR değerinin hesaplanması ve kayıt altına alınması, teknik raporun oluşturulması gibi hususlar yazılım üzerinden gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.1’de SAR yazılımı ve bağlantıları gösterilmektedir.



Şekil 4.1. SAR sistemi yazılım bağlantılar

4.5.1.2. Veri Alma Sistemi

SAR laboratuvarında, elektrik alan prob ve voltmetre cihazları veri alma sistemini oluşturmaktadır. 900 MHz ile 1800 MHz ölçümleri için PGM SAR laboratuvarında kullanılan E alan probu kalibreliedir. Voltmetre’ye yazılım vasıtasıyla belirlenen tarama yolu üzerinde ilerleyen robot koluna bağlı E alan probu (x, y, z) koordinatlarında aldığı verileri göndermektedir. Voltmetre aldığı bu verileri yazılıma iletmektedir. Şekil 4.2 (a)’da PGM SAR laboratuvarında kullanılan E alan probleği gösterilmektedir. Prob, robot ve voltmetre den oluşan düzenek Şekil 4.2 (b)’de yer almaktadır.

a)

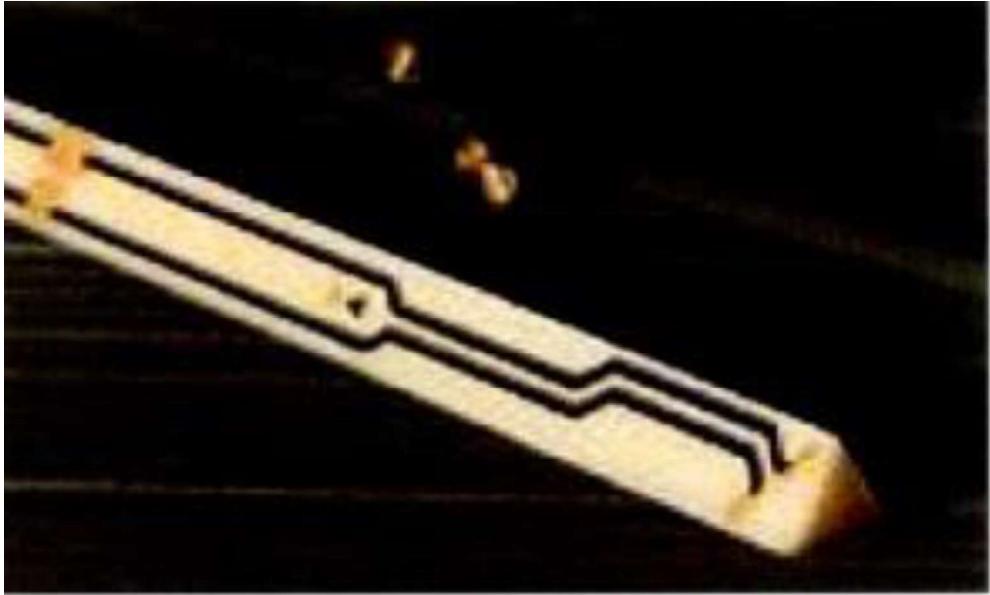


b)

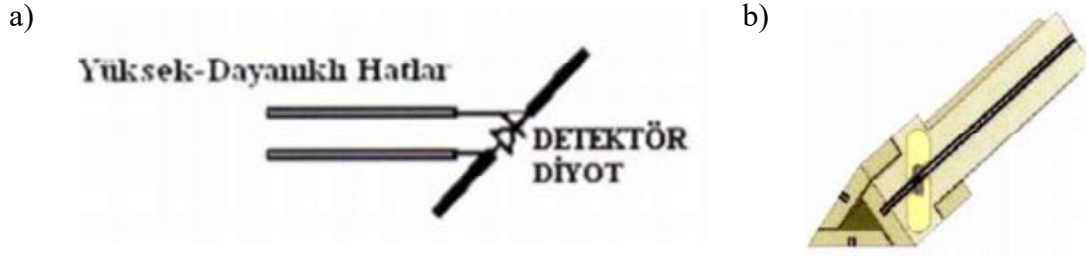


Şekil 4.2. (a) E alan probalar (b) Robot-panel-prob-voltmetre

E alan probunun iç yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.4 (a)'da görüldüğü gibi E alan probaları, tek yönlü diyotlara sahip yapıdadır ve Şekil 4.4 (b)'de gösterildiği gibi üç adet dipol sensöre sahiptir.



Şekil 4.3. E alan probu iç yapısı

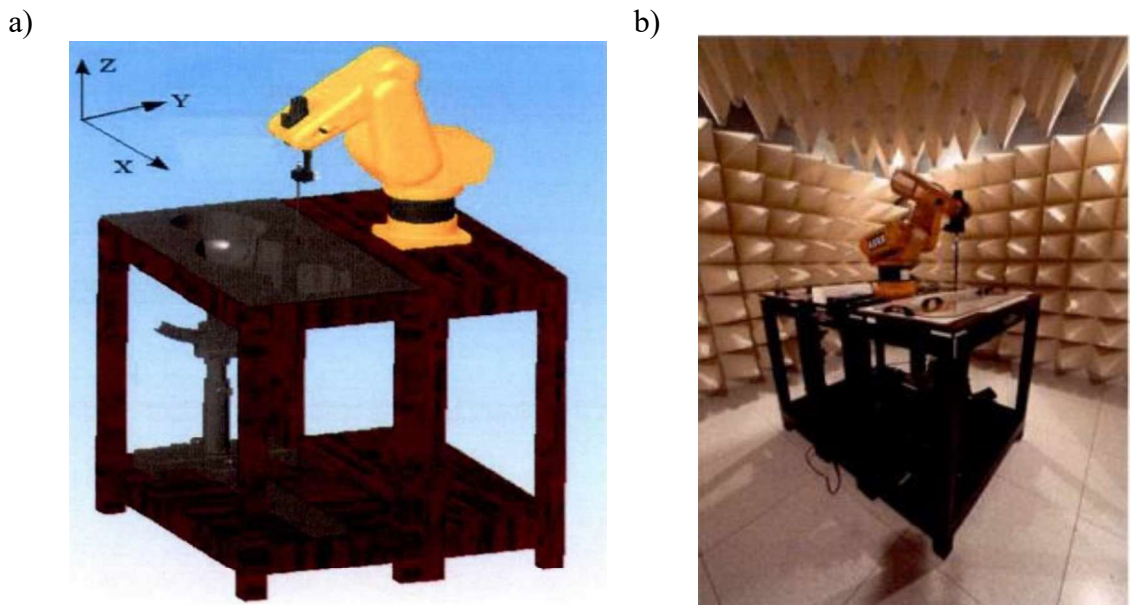


Şekil 4.4. (a) Dipol Sensör, (b) E alan probu

4.5.1.3. Tarama Sistemi

Robot ve Robotun yönlendirilmesini sağlayan Robot Paneli, SAR laboratuvarında tarama sistemini oluşturmaktadır. Robotun yazılımla uyumlaştırılması, robot panelinden sağlanmakta ve tarama esnasında meydana gelebilecek hataların izlenmesini sağlamaktadır.

PGM SAR laboratuvarında bulunan Robot 6-eksende hareket etme kabiliyetine sahiptir. E alan probu Robot koluna yerleştirilmiştir ve x, y, z koordinatlarında düzgün verilerin alınmasını, Robot yazılımında tanımlanmış tarama yollarını izleyerek sağlamaktadır. Şekil 4.5 (a)'da Robotun fantoma göre izlediği x, y, z koordinat yönleri gösterilmektedir. Şekil 4.5 (b)'de SAR laboratuvarı tarama sisteminin genel görüntüsü ise yer almaktadır.

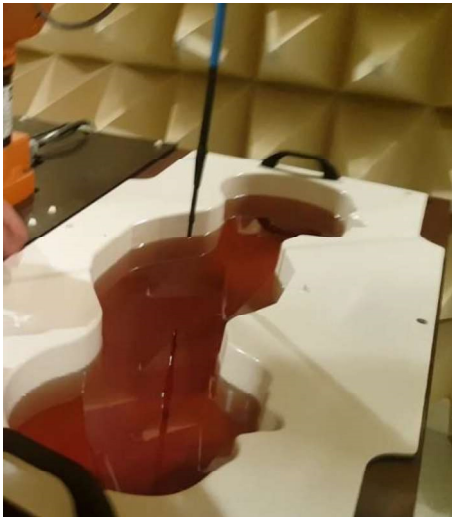


Şekil 4.5. (a) (x, y, z) Eksenlerinde robot ve fantom ölçüm düzeneği (b) PGM Laboratuvarı tarama sisteminin genel görüntüsü

4.5.1.4. Fantom ve Cihazların Hizalanması

Fantom, standardta verilen ölçülere göre deri kalınlığı ve fiziksel özelliği hazırlanmış insan kafa veya vücut modeline verilen addır. Genel kullanımda bu sıvı insan kafasını temsil etmektedir. El fantomu, vücut için veya vücudun diğer bölümleri için düz fantom veya gövde fantomu gibi fantomlar da bulunmaktadır. SAM fantom olarak da kafa fantomu tanımlanmaktadır. 1989'da yapılan bir antropomorfik çalışmada rapor edilen büyük yetişkin erkeğin 90. yüzdelik dilimine karşılık gelen biçim ve ölçüler fantom biçiminin belirlenmesinde esas alınmıştır (Gordon et al. 1988). Yatay ekseninde hizalanmış ikiz fantom ile tam bir kafa modeli olarak dik kullanılan fantom olmak üzere iki farklı modelde kafa fantomu bulunmaktadır.

PGM SAR laboratuvarında ikiz fantom tipi yer almaktadır. İkiz fantom modelinde ise üç kısım bulunmaktadır: bunlar sağ kafa kısmı, sol kafa kısmı ve düz fantomdur. Vücut ölçümleri ile sistem kontrol ve doğrulama ölçümleri açısından, ikiz fantom modelinin düz fantom modelini de içinde barındırması bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte PGM SAR laboratuvarında sadece vücut ölçümleri için düz fantom da bulunmaktadır. Fantomlar, beyin sıvısına eşdeğer sıvıyla kimyasal reaksiyona girmeyecek özelliktedir. Fantomların kalınlığı $2 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ 'dir ve bu kalınlık standard değerlerde tanımlanmıştır. İkiz fantom modeli Şekil 4.6 (a)'da ve tam kafa fantom modeli Şekil 4.6 (b)'de gösterilmektedir. Şekil 4.7'de ise ikiz fantomun alttan görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.6. İkiz fantom modeli ve tam kafa fantom modeli



Şekil 4.7. İkiz fantom modeli alttan görünüş

Cihaz hizalayıcı ise fantomun altında bulunmaktadır. Testi yapılacak bir numunenin fantoma alttan uygun konum ve açılarda hizalanmasını cihaz hizalayıcı elemanı sağlamaktadır. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi SAR ölçümü yapılacak cihazın hizalanması yapılmaktadır.



Şekil 4.8. Cihaz hizalanması

4.5.1.5. Sıvı Kalibrasyon Ölçümü

SAR laboratuvarlarında sıvı kalibrasyonu elemanları, beyin sıvısına eşdeğer sıvı, Vektör Network Analizör ve sıvı değerlerini algılayan probdan oluşmaktadır. Beyin sıvısına eşdeğer sıvıların dielektrik veya iletkenlik özellikleri, insan beyninin özelliklerine yakındır. Bu sıvıların standardta tavsiye edilen reçeteleri verilmiştir. Çalışılacak frekanstaki sıvı fantomun içerisine konularak, fantomla birlikte tam bir insan kafa modeli benzetimi sağlanmaktadır.

IEC 62209-1 standardında belirtilen reçetelere uygun olan SAR sıvıları, PGM SAR laboratuvarında kullanılmaktadır [Ek-3]. Çizelge 4.5’te PGM SAR laboratuvarında kullanılan frekansa bağlı sıvı bileşen yüzdeleri verilmektedir.

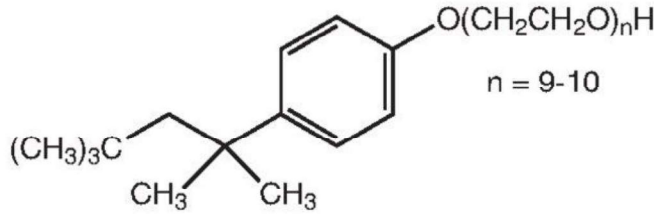
Çizelge 4.5. PGM SAR laboratuvarında kullanılan SAR sıvısı bileşenleri

FREKANS BAĞLI SIVI BİLEŞENLERİ		
SAR Sıvısı Bileşeni Malzeme	900 MHz Sıvısı Ağırlık %	1800 MHz Sıvısı Ağırlık %
1,2 Propanediol	64,81	--
DGBE	--	13,84
Triton X-100	--	30,45
NaCl Tuzu	0,79	0,35
Damıtılmış Su	34,4	55,36

900 MHz ve 1800 MHz için kullanılan SAR sıvısının bileşenlerindeki önemli kimyasallar aşağıda verilmektedir.

Triton X-100

Bu kimyasal 1800 MHz SAR sıvısında kullanılmaktadır. Kimyasal Formülasyonu $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$ ($n=9,10$) [36] şeklindedir ve Şekil 4.9’da kimyasal gösterimi verilmektedir. Kimyasal Ayrım Hizmet Kayıt Numarası (Chemical Abstract Service (CAS) Registry Numbers) 9002-93-1’dir (Anonymous, 2019r).



Şekil 4.9. Triton X-100 kimyasal gösterimi

DGBE(Diethylene Glykol Monobutyl Ether)

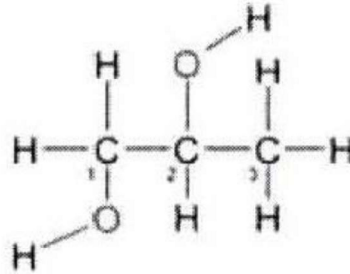
Bu kimyasal 1800 MHz SAR sıvısında kullanılmaktadır. Kimyasal formülasyonu $C_4H_9(OCH_2CH_2)_2OH$ şeklindedir ve Şekil 4.10’da kimyasal gösterimi verilmektedir. CAS kayıt numarası 112-34-5’dir (Anonymous, 2019s).



Şekil 4.10. DGBE kimyasal gösterimi

1,2-Propanediol

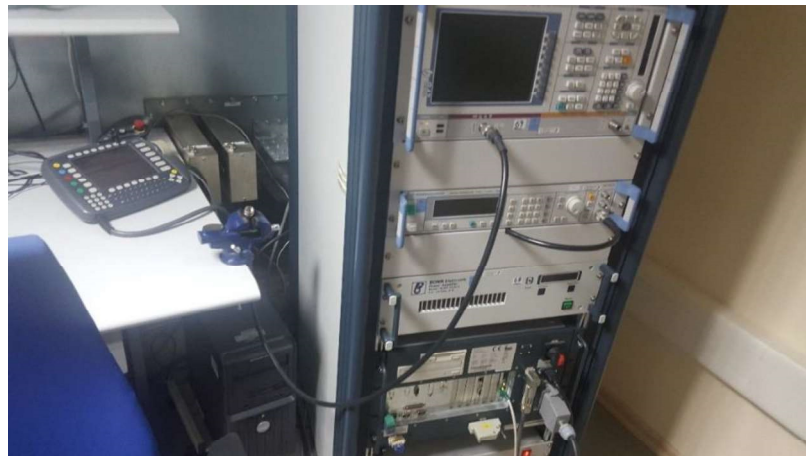
Bu kimyasal 900 MHz SAR sıvısında kullanılmaktadır. Kimyasal formülasyonu $C_3H_8O_2$ şeklindedir ve Şekil 4.11’de kimyasal gösterimi verilmektedir. CAS kayıt numarası 57-55-6’dır (Anonymous, 2019t).



Şekil 4.11. 1,2 Propanediol kimyasal gösterimi

Vektör Network Analizör (VNA) ve sıvı değerlerini algılayan prob, sıvı kalibrasyonu elemanlarının diğerleridir.

PGM SAR laboratuvarında kullanılan VNA ve koaksiyel prob Şekil 4.12’de gösterilmektedir. SAR sıvısının beyin sıvısına eşdeğer olup olmadığının kontrolünü sağlayan VNA elemanıdır. Bu eleman, sıvının uygun olup olmadığını, iletilen ve yansıyan dalga hesabını yaparak belirlemektedir. Sıvıyla teması sağlayan eleman ise koaksiyel probdur. Koaksiyel prob, VNA’nın bir bağlantı ucuna takılmaktadır. İlgili veriler, numune kaplarına alınan sıvının koaksiyel prob ile temas ettirilmesiyle koaksiyel prob tarafından alınmakta ve VNA’ye iletmektedir. Sıvının uygun olup olmadığı VNA’ye gelen verilerin yazılıma iletilmesiyle tespit edilmektedir.



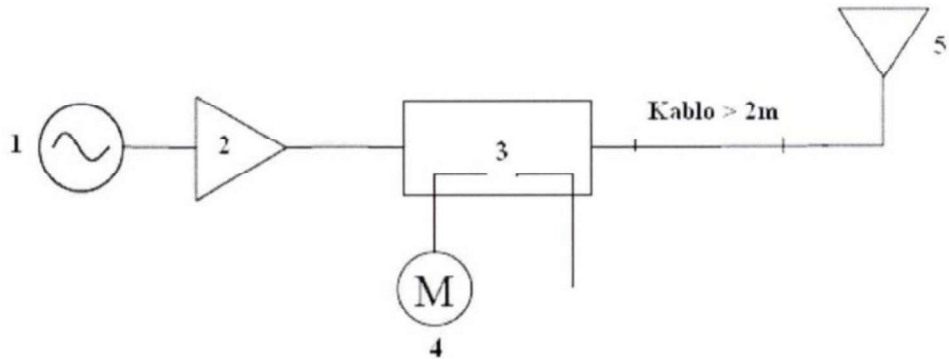
Şekil 4.12. Vektör Network Analizör

4.5.1.6. Sistem Kontrol ve Doğrulama Deneyi

Şekil 4.13'te gösterilen dipol anten, Sinyal Üretci, Yükseltici, Kuplör, Güç sensörü ve Güçmetre SAR laboratuvarında sistem kontrol ve doğrulama deneyi elemanlarını oluşturmaktadır. Şekil 4.14'te deneye ilişkin şema gösterilmektedir. Doğrulama deneyinde, sistemin doğruluğu, 1 W'lık gücün dipol antene gönderilerek, veri alma sistemi vasıtasıyla ölçülen SAR değerine göre denetlenmektedir. Sinyal Üretci vasıtasıyla, 1W'lık gücün doğru olarak gönderilmesi için yükseltici tarafından verilen gücün ayarlanması yapılmaktadır. Ayrıca kuplör ve kuplöre bağlı güç sensörü ve güçmetre, istenilen gücün izlenebilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 4.13. Dipol anten



Şekil 4.14. Doğrulama deneyi elemanları (1.Sinyal Üretci, 2.Yükselteç, 3.Kuplör, 4.Güçmetre ve Güçsensörü, 5. Dipol Anten)

4.5.1.7. Deney şartlarının kontrolü

Çevresel şartların kontrol edilmesi, SAR laboratuvarlarında önemlidir. Isı, nem, sıvı sıcaklığı gibi değerler PGM SAR laboratuvarında kayıt altına alınmaktadır. Sıvının sıcaklığını ölçmek için Şekil 4.15'te gösterilen sıvı daldırma problu termometre, ortam sıcaklığı ve nemin ölçümü için hassas termometre kullanılmaktadır. Merkezi bir klima sistemi, ortam sıcaklığının kontrol altında tutulabilmesi için laboratuvarda bulunmaktadır.



Şekil 4.15. PGM SAR sisteminde kullanılan problu termometre

4.5.1.8. Numune cihazın haberleşmesi

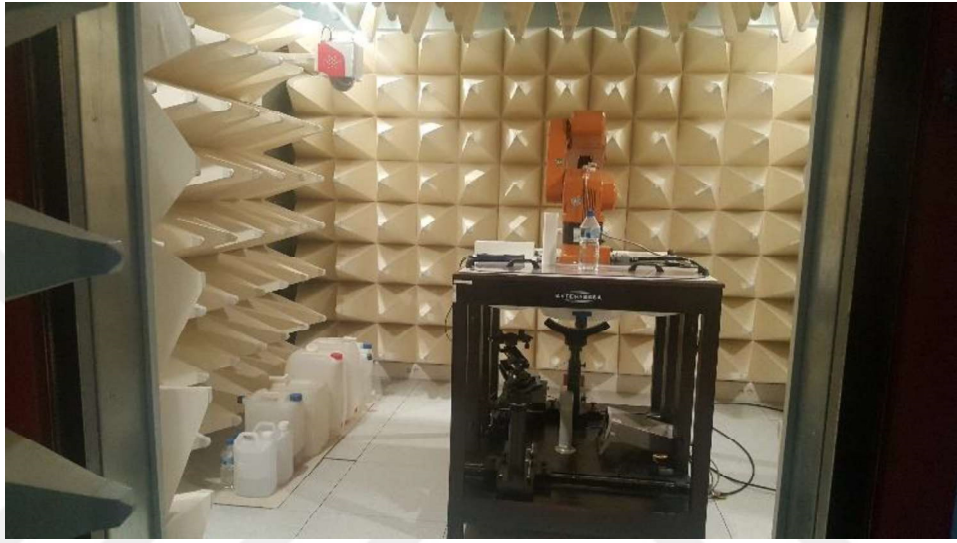
SAR laboratuvarında bulunan şebeke simülatörleri, mobil telefonla konuşma simülasyonunun sağlanması için kullanılmaktadır. İstenen frekansta haberleşmeye uygun bir anten vasıtasıyla şebeke simülatöründen sinyal gönderilmektedir. Numune, şebekeyle bağlantıya geçmektedir ve deney esnasında konuşma modunda tutulması bu şekilde şebeke simülatörü vasıtasıyla sağlanmaktadır.

PGM SAR laboratuvarında kullanılan şebeke simülatörü 900 MHz 1800 MHz bandlarında çalışmaktadır.

4.5.1.9. SAR Odası

SAR uygunluk deneylerinin yarı yansız oda şartlarında yapılması gerekmektedir. Odanın yansımaları engelleyici frekans soğuruculara sahip olması gerekmektedir.

PGM SAR odası yarı yansız oda özelliğindedir. Boyutları 4m x 4m x 3m'dir ve hacmi 48 m³'dür. Bununla birlikte, zemin hariç tamamen frekans soğurucularla kaplı yalıtımlı bir odadır. Şekil 4.16'da SAR odası ve SAR sistemi görülmektedir. Aynı zamanda bir kamera vasıtasıyla oda içerisi izlenmektedir.



Şekil 4.16. SAR odası ve sistemin genel görünüşü

Çizelge 4.6'da PGM SAR laboratuvarında bulunan ekipmanların konu başlıklarına göre gösterimi yer almaktadır.

Çizelge 4.6. PGM SAR Sistemi Ekipmanlar

PGM SAR Sistemi Ekipman Grubu	İlgili SAR Ekipmanı
Yazılım	Opensar V2
Veri alma sistemi	E alan prob Voltmetre
Tarama Sistemi	Robot Robot Paneli
Fantom ve Cihazların Hizalanması	İkiz Fantom Cihaz hizalayıcı
Sıvı Kalibrasyonu Ölçümü	GSM 900 MHz kafa ve vücut sıvısı GSM 1800 MHz kafa ve vücut sıvısı Vektör Network Analizör (VNA) Koaksiyel Prob

Çizelge 4.6. (devam)

Sistem Kontrol ve Doğrulama Deneyi	Dipol anten Sinyal Üretici Yükseltici (Amplifier) Güçmetre Güç sensörü Kuplör
Deney Şartlarının Kontrolü	Dijital Termometre
Numune Cihazın haberleşmesi	Sıvı Daldırma Problu Termometre Şebeke Simülatörü
SAR Odası	4m x 4m x 3m Boyutlarında SAR Odası Frekans Soğurucular Kamera

4.5.2. SAR Hazırlık Deneyleri

SAR deneylerinden önce SAR Hazırlık Deneyleri mutlaka yapılmaktadır. Dışarıdan gelen gürültü, ortam, sıvının uygunluğu, probun doğru ölçüm yapıp yapmadığı, vs gibi parametrelerin standarda uygun olması gerekmektedir. Sıvı sıcaklığı ve çevresel şartlar çok önemlidir, standardta verilen değerler içerisinde olmalıdır (Anonymous, 2010a). SAR Hazırlık Deneyleri üç aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar; sıvı kalibrasyon deneyi, gürültü deneyi ve sistem kontrolü deneyidir.

4.5.2.1. Sıvı Kalibrasyon Deneyi

Sıvı Kalibrasyon Deneyi, dielektrik özellikleri bakımından fantoma konulacak sıvının, insan beynine yakın özellikte olup olmadığını belirlemek için yapılmaktadır. Vektör Network Analizör Cihazı ve Koaksiyel prob yardımıyla yapılmaktadır.

Sıvının dielektrik özellikleri SAR hesabında çok önemlidir. (4.4) nolu denklemdeki SAR ile ilgili eşitlikten görüleceği gibi σ iletkenlik katsayısı, SAR hesabında kullanılmaktadır. SAR sıvısının bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r)' nin reel ve kompleks kısımları aşağıda verilen (4.4) nolu denklemde ifade edilmektedir.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \quad (4.4)$$

σ iletkenlik katsayısının bu formülasyondan yola çıkarak,

$$\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon_r'' \quad (4.5)$$

olduğu görülmektedir. Bu sonuçtan iletkenliğin frekansının havanın dielektrik sabiti (ϵ_0) ve sıvının kompleks dielektrik geçirgenliği ile doğru orantılı olduğu

görülmektedir. Çizelge 4.7’de frekansa bağlı dielektrik ve iletkenlik sabitleri verilmektedir.

Çizelge 4.7. Frekansa bağlı dielektrik sabiti ve iletkenlik

Frekans(MHz)	Bağıl Dielektrik Sabiti ϵ_r	İletkenlik σ (S/m)
900	41,5	0,97
1800	40,0	1,40

SAR sıvısının istenilen bant için uygun olduğunun kabul edilebilmesi için, sıvı kalibrasyonunda, bağıl dielektrik sabitinin kompleks ve reel kısımları, standardın öngördüğü değerlerin $\pm\%5$ içerisinde olmalıdır.

Sıvı Kalibrasyonu yapılırken havanın dielektrik sabiti değeri kullanılmaktadır. Dielektrik özellikleri bilinen saf su ise genel kalibrasyon prensibinde referans olarak kullanılmaktadır. SAR sıvısı ölçümü saf sudan sonra yapılmaktadır. Bu aşamada SAR sıvısı uygunsa, Şekil 4.17’de gösterildiği gibi, standardta verilen ölçüde fantomdaki kulak duyma noktasından itibaren derinliği en az 15 cm olacak şekilde, bu sıvıyla doldurulmaktadır (Anonymous, 2010b).



Şekil 4.17. Fantoma konulan sıvı derinliği

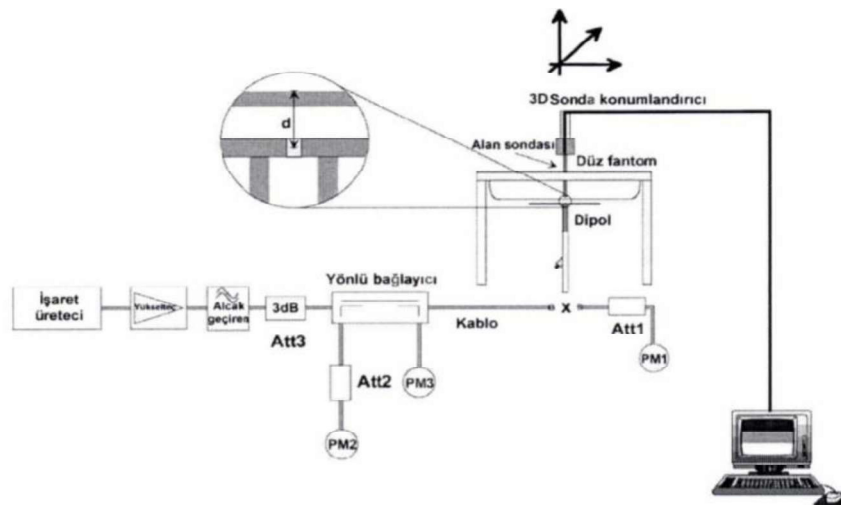
Her SAR ölçümünden önce mutlaka sıvı kalibrasyonu yapılmalıdır ve sıvının kalibrasyonu yapıldıktan sonra kullanım süresi 24 saati geçmemelidir. Laboratuvarda sıvı kalibrasyonu üzerinden 24 saatin geçmesi durumunda, yeniden sıvı kalibrasyonu yapılmaktadır.

4.5.2.2. Gürültü Deneyi

Sistem çalışırken meydana gelen gürültünün ölçülmesi için Gürültü Deneyi yapılmaktadır. Bu deneyin sonuçları, standardda belirtilen 12 mW/kg değerini aşmamalıdır. Gürültü eğer bu SAR değeri sınırını aşarsa sistemin uygun olmadığı sonucuna varılmaktadır ve gürültünün nedeni araştırılarak gürültü değerinin limit altına gelmesi sağlanmaktadır. Ayda bir kez yapılan gürültü deneyinden (Anonim, 2010c) sonra doğrulama testine geçilmektedir.

4.5.2.3. Sistem Kontrol ve Doğrulama Ölçümü

Sistemin tüm elemanlarının uygunluğunu tespit etmek için doğrulama ölçümü kullanılmaktadır. Bu deneyde elektrik alan probu, sıvı, robot, veri alma sistemi elemanlarıyla birlikte sıvı buharlaşması gibi etkenlerin kontrolü de sağlanmaktadır. Doğrulama deneyi ikiz fantomun düz fantom kısmında yapılmaktadır ve Şekil 4.18'deki gibi, doğrulama deneyinde dipol anten, 1 W gönderilen kaynak ve gönderilen gücü izlemeyi sağlayan bir güçmetre kullanılmaktadır. Şekil 4.18'deki gibi dipol anten, düz fantoma alttan "d" mesafesinde yaklaştırılmaktadır. Bu mesafe frekansa göre farklılık göstermektedir. Mesafeler; 900 MHz için 15mm, 1800 MHz için 10mm'dir. Dipol antene 1 Watt güç gönderilerek, alınan güç değeri standardta verilen banttaki değerlerle kıyaslanmaktadır. Bu kıyaslama sonucunda uygun olup olmadığı tespit edilmektedir. Bu deney sisteminin SAR deneyi kullanımına uygunluğunu belirleyen en önemli deneydir ve her SAR deneyi öncesi yapılmaktadır. (Anonim, 2010d).



Şekil 4.18. Sistem kontrol deneyi

4.5.3. SAR Deneyi

Hazırlık deneylerinin tamamlanmasından sonra, baz istasyonunu temsilen kullanılan 900 MHz ve 1800 MHz de çalışan GSM Sinyal jeneratörlerine SAR deneyi yapılması için sistem hazır hale gelmiştir. Şekil 4.19’da baz istasyonlarından kaynaklı SAR değerinin ölçümü için kullanılan GSM Sinyal Üreteçlerinin genel bir görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.19. 900MHz ve 1800 MHz’de çalışan GSM Sinyal Üreteçleri

4.5.3.1. Baş Ölçümleri

Mobil telefonların kullanımının artmasıyla birlikte SAR deneyleri üzerinde yapılan çalışmalar genellikle insan kafası üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tez çalışmasında kafa bölgesinin kullanım sebebi ise, baz istasyonlarının kafa bölgesinde bulunan dokulara olan etkisinin incelenmek istenmesidir.

PGM SAR laboratuvarında, IEC 62209-1 ve TS EN 50361 standartları kafa ölçümlerine yönelik kullanılmaktadır.

SAR ölçümlerine hazırlık deneylerinin yapılmasının ardından geçilmektedir. Öncelikle SAR ölçümü yapılacak frekans (900MHz veya 1800 MHz) seçilmektedir.

Mobil telefonlar için yapılan SAR ölçümlerinde bir insanın doğrudan mobil telefonla konuşma yaptığı durum simüle edilmektedir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için şebeke simülatörü ile test SIM kartı veya test SIM kartı haricinde normal bir SIM kart yazılım vasıtasıyla veya manuel olarak test şebekesi seçilerek kullanılmaktadır. Konuşma durumu, mobil telefon bu cihazla bağlantıya geçirilerek, simüle edilmiş olmaktadır. Mobil telefon sağ kafa veya sol kafa fantomuna hizalayıcılar vasıtasıyla hizalanmaktadır.

Bu çalışmada 900 MHz ve 1800 MHz de çalışan baz istasyonunlarını simüle etmek için kullanılan GSM Sinyal Üreteçleri sinyal yayabilmek için herhangi bir mobil cihaza ihtiyaç duymamaktadır. GSM Sinyal Üreteci için yapılan SAR ölçümünde de mobil telefonlarla aynı şekilde Şekil 4.20’de görüldüğü gibi kafa fantomuna hizalanmıştır. GSM sinyal üretçilerinin antenleri kısmına yapışık olarak konumlandırılmıştır.



Şekil 4.20. GSM Sinyal Üreteci anteninin kafa fantomuna hizalanması

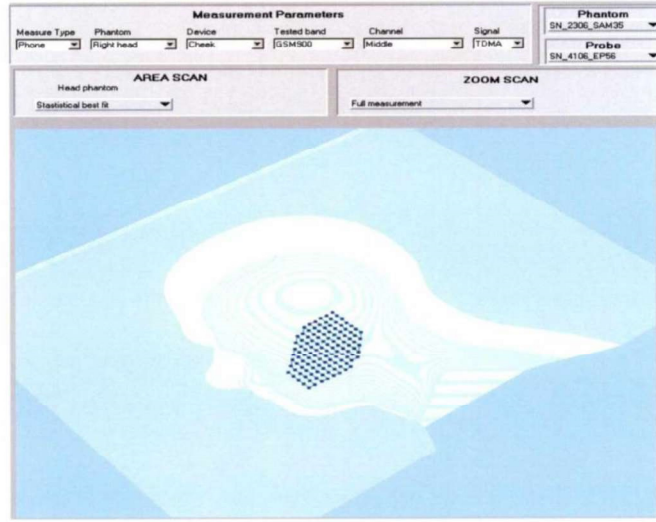
Çevresel şartlar ve SAR sıvısı sıcaklığı ve kayıt altına alınmaktadır. Çevresel şartların ve SAR sıvı sıcaklığının standartlarda verilen değerler içerisinde olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ortam sıcaklığının 18-25 °C arasında olması, sıvı sıcaklığının 23 °C ve deney esnasındaki sıvı sıcaklık değişiminin de ± 2 °C’yi aşmaması gerekmektedir (Anonymous 2010e). Şekil 4.21’de SAR sıvısının sıcak kontrolünün problu termometre yardımıyla yapılması görülmektedir.



Şekil 4.21. SAR sıvısı sıcaklık kontrolü

Yazılımdaki tarama adımları büyük önem arz etmektedir. Elektrik alan probunun tarayacağı alan, izleme yolları ve eksenal adımlar robot tarafından belirlenmektedir. Bu tarama yolları sistem tarafından tanımlanmış yollar olabilmektedir. Bunun yanında kullanıcı tarafından da tarama alanı tanımlanabilmektedir. Yazılımda tanımlanmış

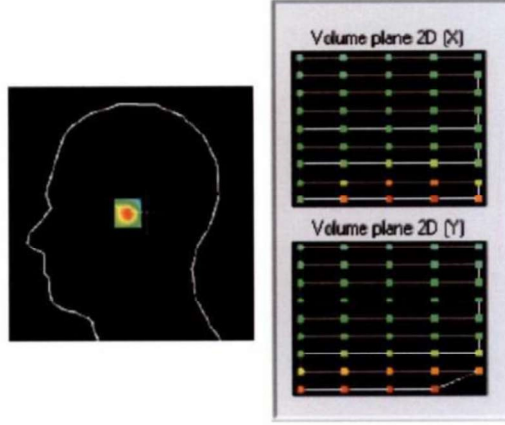
8mm tarama aralıklarına sahip 123 noktada alan taraması, standarda uygun tarama alanı olarak, seçilmektedir. Bununla birlikte, en yüksek SAR değerinin bulunduğu bölge için de küp taraması yapılmaktadır. Bunun için (X-Y-Z) yönlerindeki adımlar standardın öngördüğü 8 x 8 x 5 mm ve hacimsel olarak 32 x 32 x 32 mm³ lük hacim seçilmektedir (Anonim, 2010f). PGM SAR laboratuvarında kullanılan SAR yazılımındaki tarama yolları ve menüler Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Yazılımdaki tarama yolları ve menüler

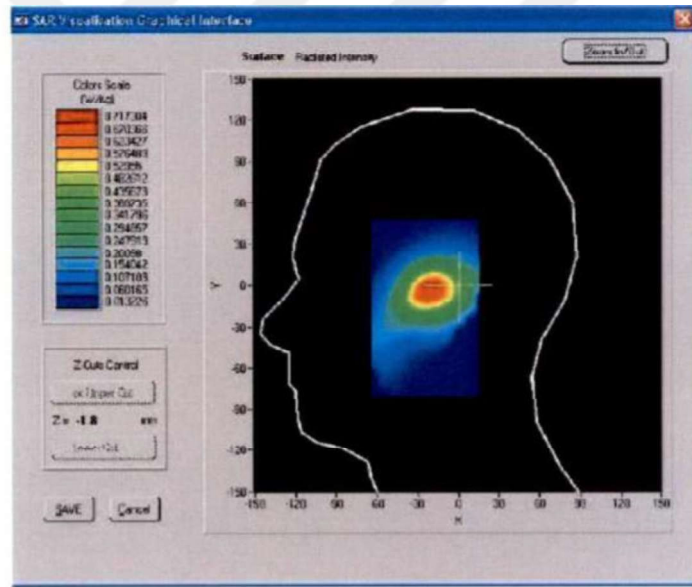
Bütün konfigürasyonların hazırlanmasından sonra ilk olarak alan taramasıyla SAR deneyine başlanmaktadır. Fantomdaki en yüksek SAR değerinin bulunduğu nokta, alan taraması esnasında tarama yüzeyi üzerinde tespit edilmektedir. Bu nokta etrafında tarama, üç boyutlu küp tarama olarak, alan taramada bulunan en yüksek SAR değerinin tespit edildiği nokta merkez olmak üzere, devam etmektedir. Deney küp taraması tamamlandıktan sonra sona ermektedir. Şekil 4.23’te küp taraması esnasında izlenen yollar gösterilmektedir.

SAR değeri E alan şiddeti değerinin tespiti ile yazılım yoluyla hesaplanmaktadır.



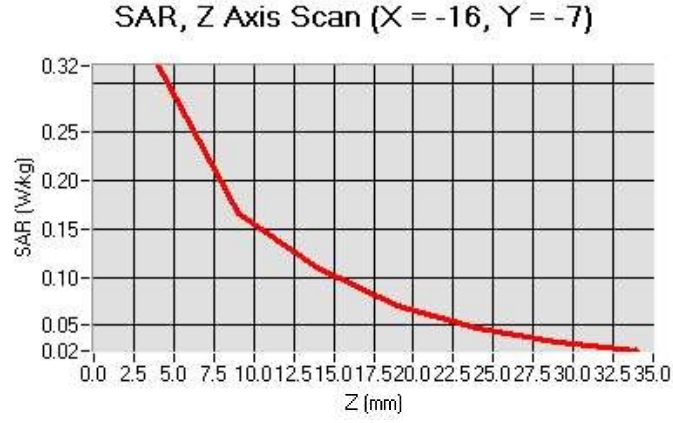
Şekil 4.23. 3 boyutlu küp taramasında izlenen yollar

Deney sonrası SAR yoğunluğunun kesit olarak gösterimi Şekil 4.24'te yer almaktadır. Şekil 4.24'te bulunan kırmızı bölgeler SAR değerlerinin yoğunlaştığı bölgeyi göstermektedir.



Şekil 4.24. Deney sonrası SAR yoğunluğunun kesit olarak gösterimi

Şekil 4.25'te yer alan, fantom iç yüzeyinden fantomun içerisine doğru (Z-ekseninde) SAR değerinin değişiminin gösterildiği grafik, deney sonucunda elde edilen en önemli grafiklerden biridir. Hangi derinlikte, ne kadar SAR değeri olduğu sonucuna bu grafik yardımıyla varılmaktadır.



Şekil 4.25. Z eksenini boyunca SAR değerleri

4.5.3.2. SAR Deneyinin Sonuç Değerleri ve Değerlendirilmesi

GSM Sinyal Üretici için tek pozisyonda yapılan SAR deneyi, tarama yollarının tamamlanmasından sonra sona ermiştir. Hesaplama, yazılımdan tespit edilen en yüksek E alan şiddetine göre yapılmaktadır.

Mobil telefonlar için yapılan SAR deneyleri insan kafa modelinde, ölçüm yapılan frekansta (900 MHz veya 1800 MHz) öncelikle 4 pozisyon için yapılmaktadır. En yüksek SAR değerinin tespit edildiği pozisyon için üst ve alt bantlarda 2 ölçüm daha yapılmaktadır. Seçilen frekansta o mobil telefona ait en yüksek sonuç, bu 6 ölçüm sonucunda tespit edilen en yüksek değerdir. GSM Sinyal Üreteçleri için yapılan SAR ölçümü ise 6 farklı güçte ve tek pozisyonda yapılmıştır.

Tespit edilen en yüksek SAR değeri, bir mobil telefon için 2 W/kg limit değeriyle kıyaslanmaktadır. SAR değeri 2W/kg'ın altında olması durumunda uygun kabul edilirken, bu değerin üstüne çıkması durumunda yaptırımlar uygulanmaktadır. Baz istasyonları için ise BTK tarafından elektrik alan değerleri açısından kısıtlamalar mevcuttur. Elektronik haberleşme cihazlarına güvenlik sertifikası düzenlenmesi ve bu cihazlardan kaynaklanan elektromanyetik alan sınır değerlerinin belirlenmesine ilişkin yönetmelik taslağına göre (Anonim, 2019u) belirlenen limit değerler Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Ortam ve tek bir cihaz için belirlenen sınır değerler

Frekans Aralığı (MHz)	E-alan şiddeti (V/m)	
	Tek cihaz için sınır değeri	Ortam için sınır değeri
0,010-0,15	19,3	65,25
0,15-1	19,3	65,25
1-10	$19,3/f^{1/2}$	$65,25/f^{1/2}$
10-400	6,2	21
400-789	$0,305f^{1/2}$	$1,03 f^{1/2}$
790-2000	$0,275f^{1/2}$	$0,96 f^{1/2}$
2 000-94 000	12,3	42,93

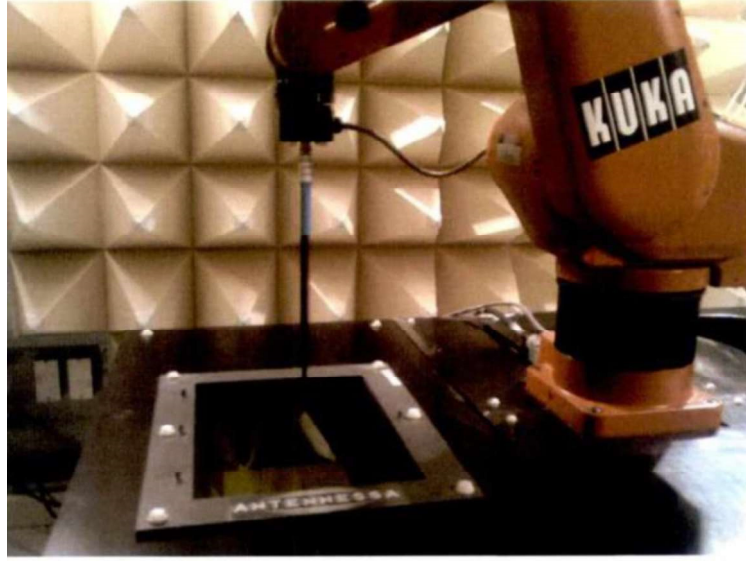
Çizelge 4.9’da verilen değerler doğrultusunda 900 MHz frekansında izin verilen en yüksek EMA değeri 8.25 V/m 1800 MHz frekansı için izin verilen en yüksek EMA değeri 11.66 V/m dir. Bu sınırların üzerinde veya altında olan EMA değerleri baz istasyonlarını temsil etmek için kullanılan GSM Sinyal Üreteç gücünün farklı değerlere ayarlanmasıyla elde edilmiştir.

4.5.4. Vücut Ölçümleri

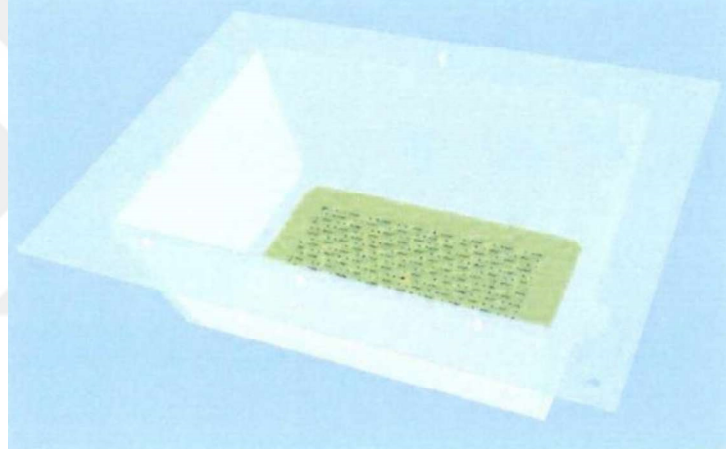
2017 yılında yayınlanan IEEE 62704-1-2017 standardı (Anonim, 2017b) vücut ölçümleri için standartlar getirmektedir. Bu tez çalışmasında ölçümler yalnızca kafa bölgesi için yapılmıştır.

Vücut için yapılan SAR ölçümleri, vücut SAR sıvısı kullanarak düz fantom kısmında yapılmaktadır. Ölçülecek cihazdan, fantom 2 kat daha büyük olmalıdır. FCC dokümanında vücut SAR sıvısı için tavsiye dielektrik değerler ve tavsiye reçeteler belirtilmektedir. Vücut SAR deneyi, cihazın kullanım özelliğine göre, tavsiye dokümandaki yollar izlenerek yapılmaktadır.

Vücut ölçümleri için PGM SAR laboratuvarında düz fantom ve vücut SAR sıvısı bulunmaktadır. Vücut SAR sıvısı, NaCl tuzu, damıtılmış su ve 1,2 propanediol malzemelerini içermektedir. Şekil 4.26’da, PGM SAR laboratuvarındaki vücut SAR ölçümü deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 4.26. Vücut SAR ölçümü deney düzeneği



Şekil 4.27. Vücut SAR ölçümü düz fantom tarama yolları

Baş ölçümlerinde yapılan deney prosedürüne, vücut SAR deneyi prosedürü, benzerlik göstermektedir.

Ölçümlere düz fantom üzerindeki Şekil 4.27'deki eksenel yolların alan taraması yöntemiyle başlamaktadır. Sonrasında alan taramasında tespit edilen en yüksek nokta etrafında oluşan küpün taranması ile ölçüm son bulmaktadır.

5. 900 MHz VE 1800 MHz'DE GSM SİNYAL ÜRETECİ İLE YAPILAN SAR ÖLÇÜM SONUÇLARI

900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında baz istasyonunu temsilen, bu frekanslarda çalışan iki adet GSM Sinyal Üreteci kullanılmıştır. Bu simülatörlerden 900 MHz frekansında çalışan simulatör için 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 mW olmak üzere 6 farklı güç değerinde 1800 MHz için ise 250, 500, 1000, 1250, 1500 ve 2000 mW çıkış gücünde 6 farklı güç değerinde SAR ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler PGM SAR laboratuvarlarında cep telefonu SAR ölçümü için kullanılan sistemde yapılmıştır.

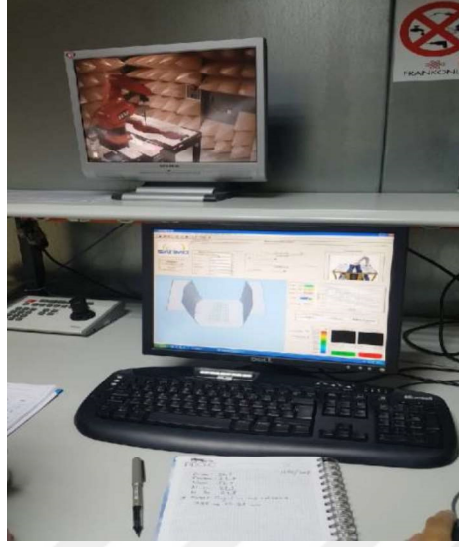
SAR laboratuvarında kafa ve vücut SAR ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. Baş ölçümleri mobil telefon gibi kafaya yakın tutulan cihazlar için uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında da baz istasyonlarının kafa bölgesine etkisi incelendiğinden sadece kafa bölgesi SAR ölçümü yapılmıştır. Ölçümlerin yapıldığı test odası yarı yansısız olup taban hariç diğer kısımları soğurucularla kaplıdır. Soğurucular, elektromanyetik dalgaların yansımaları ile meydana gelebilecek dalga boyunu artırıcı veya azaltıcı yayınları engelleyerek SAR ölçümlerinin olumsuz etkilenmesini ortadan kaldırmaktadır. Sıvı kalibrasyon testleri yapılarak, kontrol odasında yapılan ölçümler izlenmiş, yazılım üzerinden ölçülen SAR değerleri elde edilmiştir.

5.1. 900 MHz'de Çalışan GSM Sinyal Üreteci SAR Ölçümü

900 MHz ve 1800 MHz de çalışan GSM simülatörleri için yapılan SAR ölçümünde cep telefonları için de yapılan robot referans alma işlemi, sıvı kalibrasyon işlemleri, doğrulama ve gürültü ölçümleri, son olarak raporlama faaliyeti yazılım sayesinde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm için kullanılan sistem üreticisinin yazılımı “OpenSAR v4” yazılımıdır. Bu yazılımın kontrol odasından görüntülenen arayüzü Şekil 5.1’de verilmiştir.

Gerçek elektrik alan maruz kalınım koşullarına yakın simülasyonlar gerçekleştirebilmek için SAR ölçüm standartlarına göre testlerde, dielektrik ve iletkenlik parametreleri açısından insan dokusuna eşdeğer sıvılar kullanılmıştır. 900 MHz sıvısında kullanılan bileşenler Çizelge 4.5’te verilmiştir. SAR ölçümüne başlamadan önce standard gereği hazırlık ölçümleri yapılmıştır. Sıvı kalibrasyon deneyi, gürültü deneyi ve doğrulama deneyi hazırlık deneylerini oluşturmaktadır.

Gürültü deneyi SAR laboratuvarında ayda bir uygulandığından; bu ölçüm ile ilgili bilgilere dördüncü bölümde yer verilmiştir.



Şekil 5.1. SAR Ölçümünde kullanılan OpenSAR yazılımı Arayüzü

5.1.1. 900 MHz ve 1800 MHz’de Çalışan GSM Sinyal Üreteçleri için Sıvı kalibrasyon deneyi

SAR deneylerinde kullanılan doku eşdeğer sıvılar ortam koşullarından etkilenebilmekte, bundan dolayı dielektrik ve iletkenlik özellikleri zamanla değişebilmektedir. Bu nedenle belli bir frekanstaki sıvı en fazla 24 saat kullanım süresine sahiptir. Bu süre sonunda test için sıvının yeniden kontrol edilerek, doku eşdeğer dielektrik ve iletkenlik parametrelerinin deney şartlarını sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesi gerekmektedir.

Sıvı kalibrasyonu için dördüncü bölümde bahsedildiği gibi Vektör Network Analizör kullanılmıştır. Gerekli ölçümler numune kaplarına alınan sıvı örneklerinin koaksiyel prob yardımıyla VNA’ nın ilgili portuna bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2’de fantom sıvısından, sıvının özelliklerinin standartlara uygunluğunu incelemek üzere numune alınışı görüntülenmektedir.



Şekil 5.2. Doku fantom sıvısından numune alınması

Bu numune alındıktan sonra yapılan gerekli ölçümler neticesinde sıvının SAR ölçümüne uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu ölçümler neticesinde sıvılarda ilgili parametrelerden sapmalar olması durumunda gerekli müdahaleler yapıp, sıvı reçeteye uygun hale getirilmektedir.

Genellikle sıvılarda sıcaklıktan dolayı su buharlaşması olduğu gözlemlenmektedir. Bu uygunsuzluk saf su ilavesiyle giderilebilmektedir. 900 MHz ve 1800 MHz için GSM Sinyal Üreteçlerinin SAR ölçümü için yapılan sıvı kalibrasyonu sonuçları Şekil 5.3'te verilmiştir.

Frequency (MHz)	Epsilon'	Epsilon''	Sigma (S/m)	IEC/IEEE Standard (Head Liquid) (+/-5%)
871.50	39.82	18.44	0.89	Epsilon' -4.04 % Epsilon'' -3.82 %
875.85	39.83	18.45	0.90	Epsilon' -4.03 % Epsilon'' -3.81 %
880.20	39.83	18.47	0.90	Epsilon' -4.03 % Epsilon'' -3.80 %
884.55	39.83	18.48	0.91	Epsilon' -4.02 % Epsilon'' -3.79 %
888.90	39.83	18.49	0.91	Epsilon' -4.02 % Epsilon'' -3.78 %
893.25	39.81	18.53	0.92	Epsilon' -4.07 % Epsilon'' -3.86 %
897.60	39.79	18.52	0.92	Epsilon' -4.12 % Epsilon'' -3.85 %
901.95	39.77	18.53	0.93	Epsilon' -4.17 % Epsilon'' -3.84 %
906.30	39.78	18.55	0.93	Epsilon' -4.16 % Epsilon'' -3.88 %
910.65	39.74	18.54	0.94	Epsilon' -4.19 % Epsilon'' -3.77 %
915.00	39.77	18.57	0.94	Epsilon' -4.11 % Epsilon'' -3.82 %
919.35	39.77	18.57	0.95	Epsilon' -4.08 % Epsilon'' -3.81 %
923.70	39.75	18.59	0.95	Epsilon' -4.11 % Epsilon'' -3.80 %

Frequency (MHz)	Epsilon'	Epsilon''	Sigma (S/m)	IEC/IEEE Standard (Head Liquid) (+/-5%)
1691.60	39.21	13.72	1.29	Epsilon' -2.36 % Epsilon'' -3.82 %
1700.30	39.16	13.72	1.30	Epsilon' -2.45 % Epsilon'' -3.81 %
1710.20	39.13	13.73	1.30	Epsilon' -2.52 % Epsilon'' -3.79 %
1719.50	39.11	13.74	1.31	Epsilon' -2.54 % Epsilon'' -3.82 %
1728.80	39.08	13.74	1.32	Epsilon' -2.60 % Epsilon'' -3.85 %
1738.10	39.07	13.76	1.33	Epsilon' -2.63 % Epsilon'' -3.83 %
1747.40	39.04	13.79	1.34	Epsilon' -2.65 % Epsilon'' -3.86 %
1756.70	39.01	13.79	1.35	Epsilon' -2.69 % Epsilon'' -3.84 %
1766.00	38.96	13.81	1.36	Epsilon' -2.74 % Epsilon'' -3.87 %
1775.30	38.93	13.82	1.36	Epsilon' -2.79 % Epsilon'' -3.89 %
1784.60	38.89	13.84	1.37	Epsilon' -2.85 % Epsilon'' -3.84 %
1793.90	38.85	13.86	1.38	Epsilon' -2.90 % Epsilon'' -3.87 %
1803.20	38.83	13.87	1.39	Epsilon' -2.93 % Epsilon'' -3.89 %
1812.50	38.77	13.89	1.40	Epsilon' -2.97 % Epsilon'' -3.90 %
1821.80	38.75	13.91	1.41	Epsilon' -3.03 % Epsilon'' -3.95 %

Şekil 5.3. 900 MHz ve 1800 MHz de yapılan sıvı kalibrasyonu sonuçları

5.1.2. 900 MHz ve 1800 MHz'de Çalışan GSM Sinyal Üreteçleri için Doğrulama deneyi

GSM Sinyal Üreteçlerinin SAR testlerine geçilmeden önceki yapılması gereken son ve en önemli hazırlık deneyi doğrulama deneyidir. Sistemin tüm elemanlarının düzgün

alışıp çalışmadığının kontrolü Doğrulama deneyi olarak adlandırılmaktadır. Yapılan doğrulama deneyi, ikiz fantomun düz kısmının altına dipol antenin ilgili frekansa göre değişen bir mesafede yerleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. şekil 5.4'te laboaratuvarda bulunan dipol antenlerin genel görüntüsü yer almaktadır. Dipol anten ve fantom arasında 900 MHz için 15 mm, 1800 için ise 10 mm mesafe bırakılmıştır. Dipol anten yerleştirildikten sonra ise odanın kapısı kapatılarak dipol antene 30 dBm'lik (1 W)'lık güç verilerek doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Doğrulama deney düzeneği şekil 4.18'de verilmiştir.



şekil 5.4. Laboaratuvarda bulunan dipol antenlerin genel görüntüsü

şekil 5.5'te doğrulama deneyi için yapılan dipol antenin fantoma konumlandırılması görülmektedir.



şekil 5.5. Dipol anten mesafe ayar

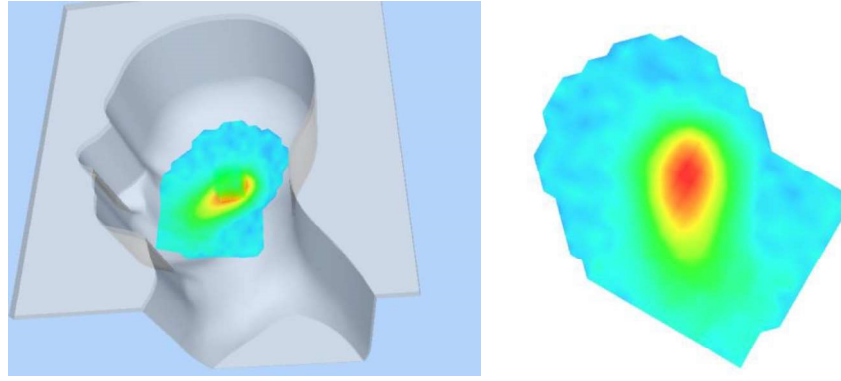
şekil 5.6'da 900 MHz, 1800 MHz ve 2000 MHz için kullanılan dipol anten tipleri gösterilmiştir. GSM Sinyal reteleri için yapılan doğrulama deneyinde 900

MHz ve 1800 MHz için kullanılan dipol antenler kullanılmıştır. Kontrol odasında bulunan sinyal üreticiden üretilen sinyal, yükseltici ve güçmetreden geçirilerek dipol antene iletilmiş ve dipol antenin çıkışında CW sinyali oluşturulmuştur. Bu üç cihaz arasındaki iletişim ve güç ayarlaması yazılım vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5.'de görüldüğü gibi doğrulama ölçümü fantomun düz kısmına uygulanmıştır. Doğrulama deneyleri alan taramasıyla başlayıp, en yüksek SAR değerinin bulunduğu bölgede hacim taramasıyla devam ederek en yüksek değerin tespitiyle sona ermiştir.

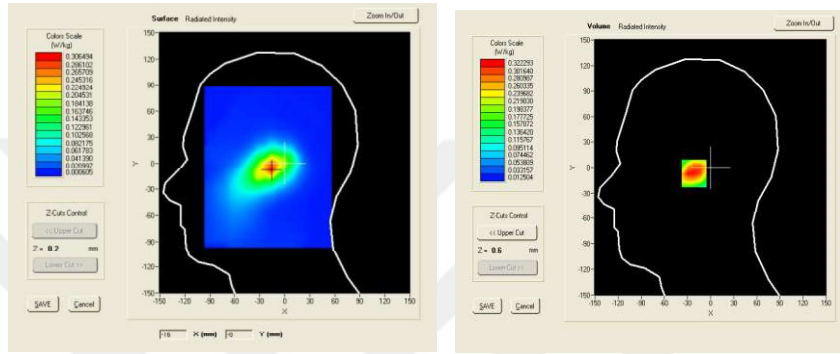


Şekil 5.6. PGM SAR Laboratuvarında 900 MHz, 1800 MHz ve 2000 MHz Frekanslarında Kullanılan Dipol Antenler

Yapılan ölçümler IEC/EN 62209-1 standardına uygun olarak ikiz fantomun kafa kısmında yapılmıştır ve fantom kulak mesafesinden yüzeye en az 15 cm derinliğe kadar vücut doku eşdeğer sıvısıyla doldurulmuştur. Yapılan ölçümlerde prob robot kol vasıtasıyla yüzey taraması ve hacim (küp) taraması olmak üzere iki farklı tarama yapılmıştır. Yüzey taraması en yüksek emisyonun olduğu noktayı bulmak için yapılmıştır. En yüksek emisyonun olduğu noktada ise tepe uzaysal SAR'ın hesaplanabilmesi için küp taraması 8x8x5 mm olarak tanımlanmış bir hacim içinde yapılmıştır. Şekil 5.7'de GSM Sinyal Üretici SAR ölçümlerinden elde edilmiş genel bir hacim taraması sonucu görülmektedir. Şekil 5.7'de ise elde edilen genel bir yüzey taraması sonucu görülmektedir.



Şekil 5.7. Ölçümlerden elde edilen hacim taraması görüntüsü



Şekil 5.8. Ölçümlerden elde edilen yüzey taraması görüntüsü

Baz istasyonunu temsil etmek için kullanılan GSM Sinyal Üretici'nde 6 adet SAR ölçümü yapılmasının sebebi standartların altında veya üzerinde olan farklı EMA değerlerinde elde edilecek olan SAR değerlerini gözlemlemektir. Bu amaçla 6 farklı güç değerinde GSM simülatörlerinden 6 farklı E alan değerleri elde edileceğinden dolayı farklı SAR değerleri alınmış ve beklendiği üzere maksimum güç değerinde maksimum SAR değeri elde edilmiştir.

Test edilecek cihazın türüne göre cihazların fantoma hizalanması değişiklik göstermektedir. Mobil telefon gibi bir aksesuar ya da aparat yardımıyla vücuda takılabilen cihazlar normal kullanım koşullarına göre aparatlarıyla birlikte fantoma hizalanmalıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan GSM simülatörü gibi standardın belirttiği cihaz kategorilerinden hiç birine girmeyen cihaz tipleri jenerik cihaz olarak kategorize edilmektedir. Ölçümler fantoma üretici tarafından belirlenen bir boşluk mesafesinde gerçekleştirilmektedir. Eğer bu mesafe üretici tarafından tanımlanmamış ise ölçümler fantoma yapışık olarak gerçekleştirilmektedir.

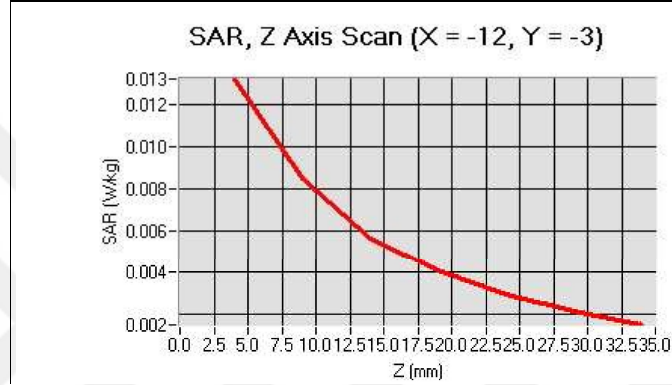
5.1.3. 900 MHz ve 1800 MHz GSM Sinyal Jeneratörleri SAR Değeri Sonuçları

500 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.1’de verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.1. 500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	0.007741
SAR 1g (W/Kg)	0.012592

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	0.0132	0.0085	0.0057	0.0041	0.0030	0.0022



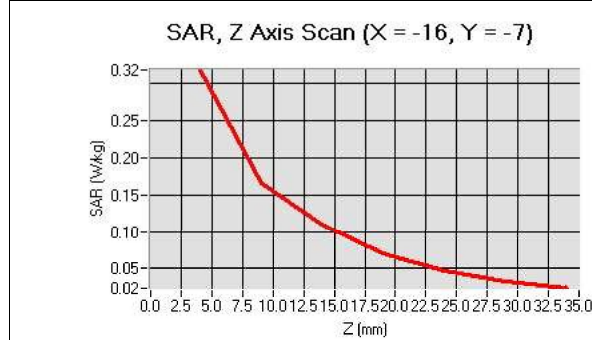
Şekil 5.9. 500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

1000 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10 g ve 1 g doku örneği için Çizelge 5.2’de verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.2. 1000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	0.175244
SAR 1g (W/Kg)	0.319394

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	0.3181	0.1663	0.1104	0.0697	0.0471	0.0328

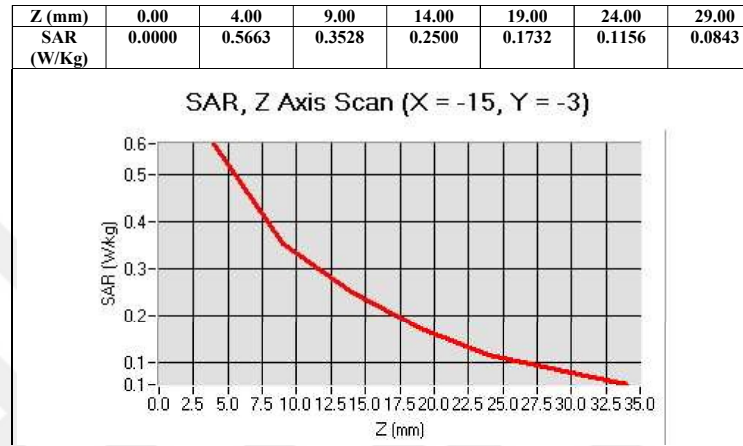


Şekil 5.10. 1000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

1500 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.3'te verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. 1500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	0.340988
SAR 1g (W/Kg)	0.553544

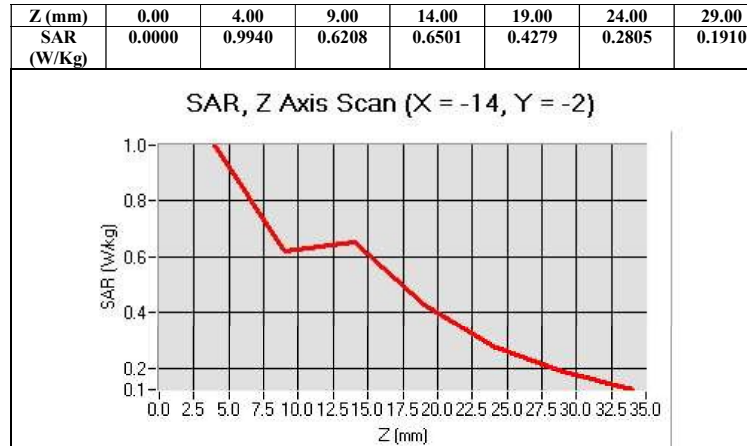


Şekil 5.11. 1500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

2000 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.4'te verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. 2000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	0.691897
SAR 1g (W/Kg)	1.030032



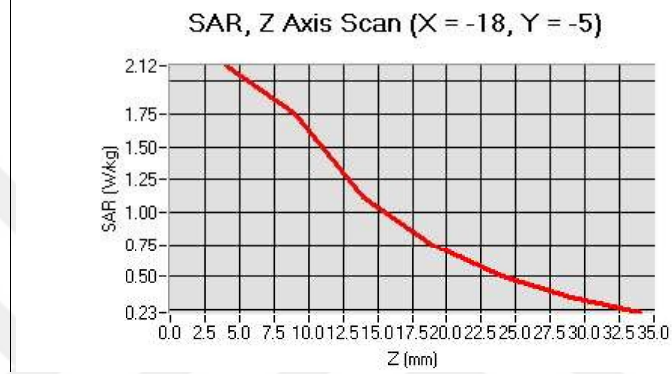
Şekil 5.12. 2000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

3000 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.5'te verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. 3000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	1.338633
SAR 1g (W/Kg)	2.033987

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	2.1191	1.7494	1.1183	0.7500	0.4995	0.3368



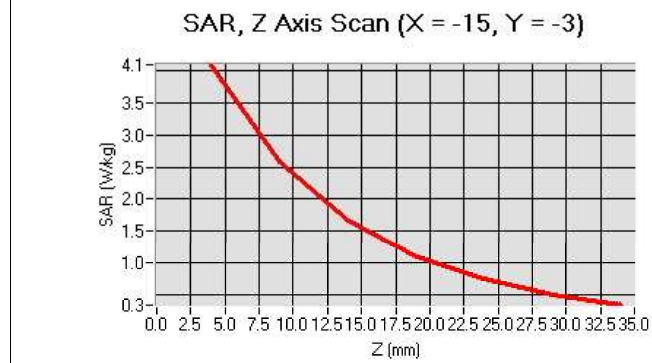
Şekil 5.13. 3000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

4000 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10 g ve 1 g doku örneği için Çizelge 5.6'da verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.14'te verilmiştir.

Çizelge 5.6. 4000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	2.332720
SAR 1g (W/Kg)	3.896047

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	4.0971	2.5722	1.6591	1.0963	0.7328	0.4916



Şekil 5.14. 4000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

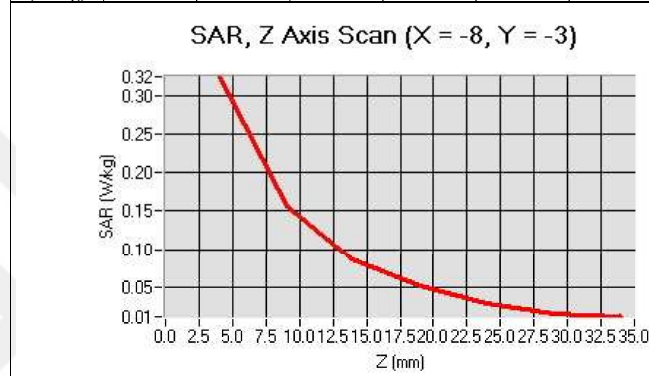
5.1.4. 1800 Mhz GSM Simülatörü SAR Değeri Sonuçları

250 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.7’de verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.15’te verilmiştir.

Çizelge 5.7. 250 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	0.146821
SAR 1g (W/Kg)	0.310389

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	0.3240	0.1567	0.0862	0.0510	0.0293	0.0155



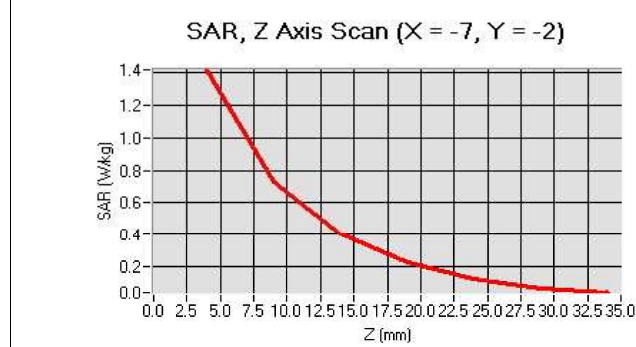
Şekil 5.15. 250 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

500 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.8’de verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.16’da verilmiştir.

Çizelge 5.8. 500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	0.662952
SAR 1g (W/Kg)	1.332345

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	1.4183	0.7333	0.4008	0.2223	0.1274	0.0705



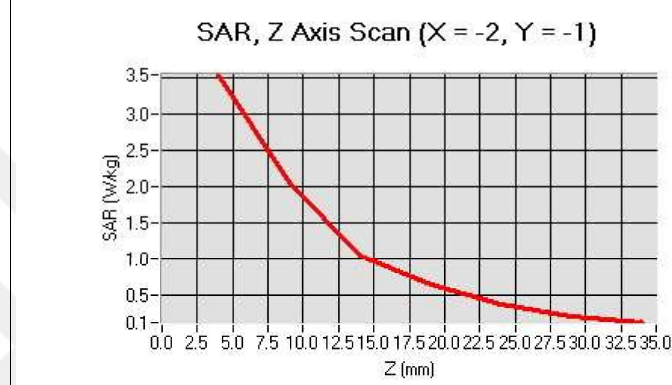
Şekil 5.16. 500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

1000 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.9’da verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5.9. 1000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	1.748332
SAR 1g (W/Kg)	3.373829

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	3.5487	2.0613	1.0445	0.6341	0.3631	0.2026



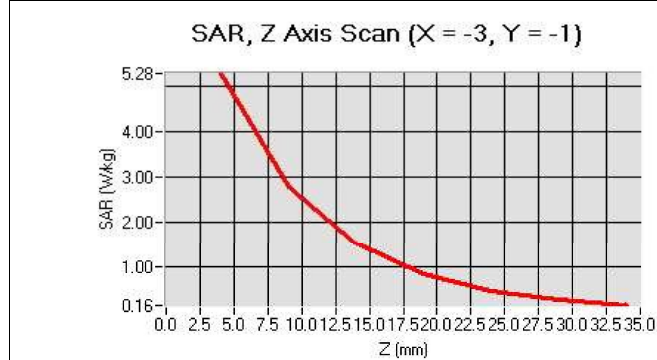
Şekil 5.17. 1000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

1250 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.10’da verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.10. 1250 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	2.522159
SAR 1g (W/Kg)	5.014546

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	5.2765	2.7815	1.5320	0.8552	0.4777	0.2757



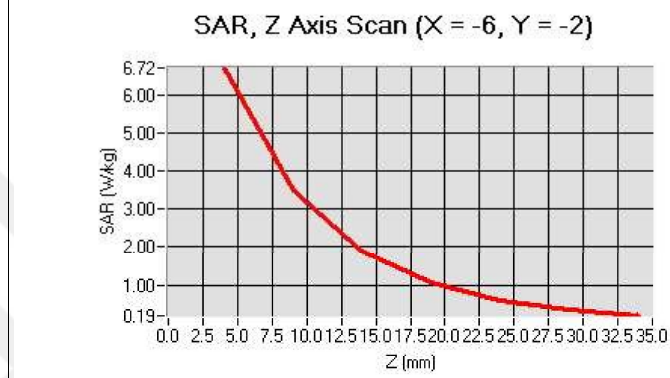
Şekil 5.18. 1250 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

1500 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.11’de verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.19’da verilmiştir.

Çizelge 5.11. 1500 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	3.122695
SAR 1g (W/Kg)	6.297831

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	6.7233	3.4937	1.9063	1.0654	0.5825	0.3298



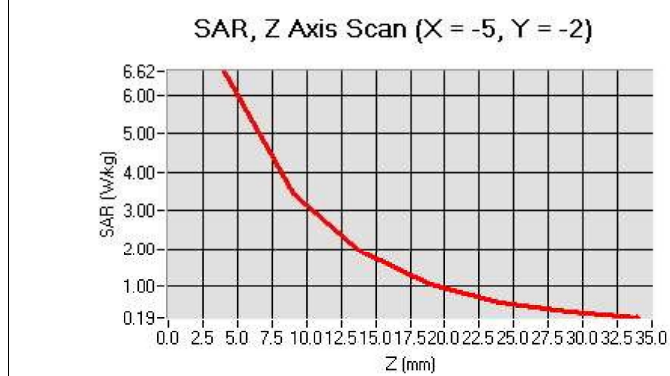
Şekil 5.19. 1500 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

2000 mW güçte yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler 10g ve 1g doku örneği için Çizelge 5.12’de verilmiştir. Aynı çıkış gücünde Z ekseninde elde edilen SAR değerleri Şekil 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.12. 2000 mW çıkış gücünde elde edilen SAR değerleri

SAR 10g (W/Kg)	3.129226
SAR 1g (W/Kg)	6.246726

Z (mm)	0.00	4.00	9.00	14.00	19.00	24.00	29.00
SAR (W/Kg)	0.0000	6.6239	3.4528	1.8947	1.0545	0.5808	0.3302



Şekil 5.20. 2000 mW çıkış gücünde Z ekseninde alınan SAR değerleri

6. CST PROGRAMI

Elektromanyetik simülasyon yazılımı, CST STUDIO SUITE, bilgisayarlı simülasyon teknolojisi CST programının bir kolu olup, uzun yıllara dayanan araştırma ve geliştirme sonucunda elektromanyetik tasarımlar için en doğru ve verimli hesaplama çözümlerine ulaşmasını sağlamaktadır. CST, optikten statığe kadar çok çeşitli frekanslarda çalışan cihazların tasarımı ve optimizasyonu için araçlarını içermektedir. Analizler, termal ve mekanik etkilerin yanı sıra devre simülasyonunu da içerebilmektedir.

6.1. Zaman Alanında Elektromanyetik Alan Simülasyonu Algoritması

Bu tez kapsamında, elektromanyetik alanların bir dizi hesaplamalı insan modellerinden, voksel tabanlı insan vücudu modeli üzerindeki etkisi gözlenmektedir. Zamanla değişen elektromanyetik alanları tanımlayan dört fiziksel yasa, Maxwell denklemleri olarak bilinen bir denklem kümesinde toplanmaktadır. Tüm elektromanyetizma makroskopik olaylarını tanımlayan bu denklemler bu bölümde belirtilmiştir.

Maxwell denklemlerinin analitik çözümü karmaşık elektromanyetik problemler için geçerli olmadığından, Maxwell'in denklemlerini çözmek için sayısal yöntemler kullanmak daha uygundur. Bu yöntemler, hesaplama alanının ve zamanın bir ayrık elemanlar kümesine ve ayrık zaman ayırıcılara ayrılmasına dayanmaktadır. Daha sonra, her bir anda, her uzaysal eleman için sayısal çözüm hesaplanır. Maxwell denklemlerini çözmek için iyi bilinen sayısal yöntemlerden bazıları şunlardır: Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT), Sonlu Hacim Yöntemi (FVM), Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ve Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (FDTD). Bu tez çalışmasında Maxwell denklemlerini çözmek için Sonlu Entegrasyon Tekniği kullanılmıştır.

6.1.1. Maxwell Denklemleri ve Sonlu Entegrasyon Tekniği

Sürekli uzayda makroskopik elektromanyetik olaylar, James Clerk Maxwell tarafından adlandırılan Maxwell denklemleri olarak bilinen dört denklem seti kullanılarak tanımlanmaktadır. Maxwell'in integral formundaki denklemleri şu şekilde ifade edilir:

$$\oint_{\partial A} \vec{E}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{s} = - \iint_A \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{A} \quad (6.1)$$

$$\oint_{\partial A} \vec{H}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{s} = - \iint_A \left(\frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) + \vec{J}(\vec{r}, t) \right) \cdot d\vec{A} \quad (6.2)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{D}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{A} = - \iiint_V \rho(\vec{r}, t) \cdot dV \quad (6.3)$$

$$\iint_{\partial A} \vec{B}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{A} = 0 \quad (6.4)$$

Bir yüzeyi A olarak tanımlarsak sınırına ∂A ve hacimini V ile tanımlarsak ∂V sınırına sahiptir. Elektrik alan şiddeti $\vec{E}$, manyetik alan şiddeti $\vec{H}$, manyetik akı yoğunluğu $\vec{B}$, elektrik akı yoğunluğu $\vec{D}$, ile belirtilmiştir. $\vec{J}$ Elektrik akımı yoğunluğu ve ρ elektrik yük yoğunluğunu göstermektedir. Elektrik akımı yoğunluğu üç bölümden oluşmaktadır: iletim akımı yoğunluğu $\vec{J}_K$, konveksiyon akımı yoğunluğu $\vec{J}_C$ ve etkilenen akım yoğunluğu $\vec{J}_i$. Mekansal değişken $\vec{r}$ ile, geçici değişken t ile gösterilir.

(6.1) nolu denklem Faraday yasası olarak ve (6.2) nolu denklem Ampère yasası olarak bilinmektedir. Bu iki denklem, bir yüzey olarak A da ∂A sınırındaki elektrik ve manyetik alan vektörlerini, aynı yüzey boyunca elektrik, manyetik veya akım akılarıyla ilişkilendirmektedir. Gauss yasası olarak bilinen (6.3) ve Gauss'un manyetizma yasası olarak bilinen (6.1) nolu son iki denklem, V hacminin ∂V kapalı bir yüzeyindeki elektrik ve manyetik akıyı, aynı hacimdeki toplam yük ile ilişkilendirmektedir. Maxwell denklemleri, Stokes ve Gauss-Ostrogradsky teoremi kullanılarak integral forma (G. T. Herman and J. K. Udupa, 1983);(C. A. R. Hoare 1961) göre farklı formlarda da ifade edilebilir. Stokes teoremi, bir vektör alanının dönelinin bir açık yüzey üstündeki yüzey integralinin, yüzeyi sınırlayan yol boyunca vektörün kapalı çizgi integraline eşit olduğunu belirtir ve (6.5) nolu denklemde verildiği gibidir. Teorem ismini İrlandalı matematikçi ve fizikçi George Gabriel Stokes'dan almaktadır.

$$\oint_{\partial A} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \oint_A \nabla \times \vec{F} \cdot d\vec{A} \quad (6.5)$$

Gauss-Ostrogradsky'nin teoremi, Gauss veya diverjans teoremi olarak da bilinmektedir ve (6.6) nolu denklemde verildiği gibidir.

$$\oint_{\partial V} \vec{G} \cdot d\vec{A} = \oint_A \nabla \cdot \vec{G} \cdot dV \quad (6.6)$$

Stokes teoremini (6.1) ve (6.2) nolu denklemlerine uygulayarak ve Gauss teoremini (6.3) ve (6.4) nolu denklemlerine uygulayarak ve bu denklemlerdeki A ve V hacimlerinin keyfî olduğunu dikkate alarak, Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu elde edebiliriz:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) \quad (6.7)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) + \vec{J}(\vec{r}, t) \quad (6.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \quad (6.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (6.10)$$

Bir malzemedeki alanlar ve akılar arasındaki bağlantı, yapısal denklemlerle verilmektedir.

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t) \quad (6.11)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t) + \mu_0 \vec{M}(\vec{r}, t) \quad (6.12)$$

$$\vec{J}_k(\vec{r}, t) = \sigma(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}, t) \quad (6.13)$$

ϵ_0 havasız ortamın dielektrik sabiti, μ_0 havasız ortamın geçirgenliği ve σ ortamın iletkenliğidir. $\vec{P}$ ve $\vec{M}$ vektörleri polarizasyon ve mıknatıslanma alanıdır. Bir malzemenin dielektrik sabiti ve geçirgenliği genellikle vakumdaki değerlerine göre ifade edilir:

$$\mu(\vec{r}) = \mu_0 \mu_r(\vec{r}), \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Vs/Am} \quad (6.14)$$

$$\epsilon(\vec{r}) = \epsilon_0 \epsilon_r(\vec{r}), \epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \cong 8.854 \cdot 10^{-12} \text{As/Vm} \quad (6.15)$$

$c_0 \approx 2.998 \cdot 10^8$ m/s, havasız ortamdaki ışığın hızıdır. Frekans alanı hesaplamalarında, elektromanyetik alanlar harmonik zaman bağımlılığına sahiptir ve belirli bir frekansta ω salınır. Bu nedenle, elektromanyetik alanlar zamandan bağımsız olan karmaşık bir fazör vektörüyle temsil edilmektedir. Aynı zamanda insan dokularının dielektrik özellikleri frekansa bağlı olduğundan, karmaşık miktarlar kullanılarak ifade edilir. Doğrusal, homojen, izotropik ve dağıtıcı malzemeler için temel yapısal denklemler ϵ ve μ değerleri aşağıdaki gibi verildiğinde şu şekildedir:

$$\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r) \quad (6.16)$$

$$\mu = \mu_0(\mu'_r - j\mu''_r) \quad (6.17)$$

$$\vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon \vec{E}(\vec{r}) \quad (6.18)$$

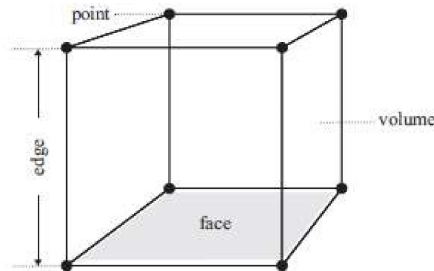
$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu \vec{H}(\vec{r}) \quad (6.19)$$

$$\vec{J}_k(\vec{r}) = \sigma(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}) \quad (6.20)$$

Maxwell denklemlerinin çözümü için kullanılan sayısal tekniklerden biri, 1977 yılında Weiland tarafından tanıtılan Sonlu Entegrasyon Tekniğidir (FIT). Bu tekniği kullanarak, farklı alanlarda birçok hesaplamalı elektromanyetik problem çözülmüştür. Sonlu Entegrasyon Tekniği ile ilgili daha fazla araştırma (M. Clemens and T. Weiland, 2001), (U. van Rienen and T. Weiland, 1987), (R. Schuhmann and T. Weiland, 2001), (P. Thoma and T. Weiland 1996), (T. Weiland, 1985) bulunabilir.

Maxwell denklemlerini çözme yolunda ilk adım, hesaplama ızgarasının (G) hesaplama temelinde (Ω) ayrıştırılmasıdır. Bu hesaplama ızgarası, rasgele şekil alabilen, birbiriyle örtüşmeyen ayrı ızgara hücrelerinden oluşmaktadır. İki boyutlu uzayda, hesaplama alanı genellikle üçgen veya dikdörtgen ile ayrıştırılırken, üç boyutlu uzayda, altı yüzlü veya dört yüzlü hacimsel hücreler uygulanmaktadır. Bu çalışmada, altı yüzlü Kartezyen ızgara tipine mükemmel şekilde uyan voksel tabanlı insan modelleri kullanılmıştır. Bu nedenle, bu çalışma sırasında gerçekleştirilen simülasyonlar üç boyutlu bir Kartezyen ızgara kullanmaktadır.

Bir altı yüzlü ızgara, temel yüzler (yüzeyler) A_n ($n = 1 \dots N_A$) ile sınırlandırılmış olan altı yüzlü temel hacimlerden (hücreler) V_n ($n = 1, \dots, N_V$) oluşur. Bir altı yüzlü hücre altı yüz ile sınırlandırılmıştır. Her yüzeyin bir yönü vardır. Yüzeyler L_n ($n = 1 \dots N_L$) kenarlarıyla sınırlandırılmıştır. Altı yüzlü bir temel hacmin yüzeylerini sınırlayan dört kenar vardır. Kenarlar daima P_n düğümü ($n = 1 \dots N_P$) olarak bilinen iki nokta ile sınırlandırılmıştır. Şekil 6.1, yukarıda listelenen tüm temel geometrik varlıkları içeren bir altı yüzlü ızgara hücrelerini göstermektedir.



Şekil 6.1. Altı yüzlü ızgara hücresi

Maxwell denklemlerinin ayrıklaştırılması için Sonlu Entegrasyon Tekniği iki ızgara kullanmaktadır. Birincil ızgara G ve ikili ızgara $\tilde{G}$. Üç boyutlu Kartezyen uzayda, ikili ızgara $\tilde{G}$, üç uzamsal yönün her birinde yarım kafes adım ile birinci ızgara çevirisinden elde edilir. Her çift kenar, merkezinde bir ana yüzü keser ve bunun tersi de geçerlidir. Ayrıca her bir ikili hücre bir primer nokta içerir ve bunun tersi de geçerlidir. Varlıkların göreceli oryantasyonuna (endeksler) ilişkin olarak, oryantasyonlu (endekslenmiş) ikili varlıklar, karşılık gelen birincil varlıklar ile aynı oryantasyonludur. Birincil ızgarada, iki elektromanyetik miktar tanımlanmıştır:

$$\hat{e}_n = \int_{L_n} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (6.21)$$

$$\hat{b} = \int_{A_n} \vec{B} d\vec{A} \quad (6.22)$$

Burada $\hat{e}$, kenarlar boyunca elektrik gerilimidir ve L_n , n sayılı kenardır. Yüzeylerden geçen manyetik akılar $\hat{b}$ ile gösterilir ve A_n n numaralı yüzeydir. İkili ızgara üzerinde dört elektromanyetik miktar tanımlanmıştır:

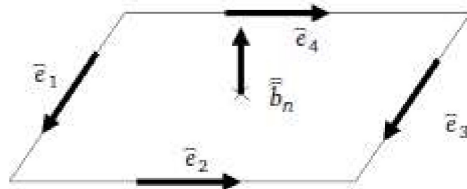
$$\hat{h}_n = \int_{\tilde{L}_n} \vec{H} d\vec{s} \quad (6.23)$$

$$\hat{d}_n = \int_{\tilde{A}_n} \vec{D} d\vec{A} \quad (6.24)$$

$$\hat{j}_n = \int_{\tilde{A}_n} \vec{J} d\vec{A} \quad (6.25)$$

$$q_n = \int_{V_n} p dV \quad (6.26)$$

$\hat{h}$, ikili kenarlar boyunca manyetik gerilimlerdir ve $\tilde{L}_n$, n sayılı çift kenardır. İkili yüzeylerden geçen elektrik akıları, $\hat{d}_n$ ile gösterilir ve $\tilde{A}_n$, n numaralı yüzeydir. İki yönden geçen elektrik akımları, j_n ile temsil edilir. Son olarak, ikili hücrelerdeki elektrik yükü q_n ile belirtilir, burada V_n n ile ikili hücredir.



Şekil 6.2. Bir n yüzeyinde gösterilen Faraday yasasının ayrıklaştırılması

Faraday yasasının ayrıklaştırılması, Şekil 6.2 kullanılarak açıklanmıştır. (6.1) nolu denklemde verilen Faraday yasasının ayrıklaştırılmasına atılan ilk adım, yüz sınırındaki sol integrali dört kenar üzerinde dört integralin toplamı olarak yazmaktır.

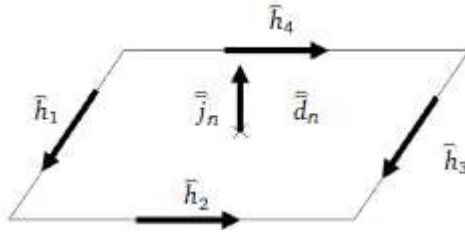
Her bir integral aslında kenar boyunca ayrı bir elektrik voltajıdır. Bu, Faraday'ın belirli bir yönüyle ilgili yasalarının ayrıklaştırılmış biçimine yol açar:

$$\hat{e}_1 + \hat{e}_2 - \hat{e}_3 - \hat{e}_4 = -\frac{d}{dt} \hat{b}_n \quad (6.27)$$

Elektrik gerilimlerinin önündeki işaretler, kenarların yönlerinden belirlenir. Eşitlik 6.27, ızgaranın tüm yüzeyleri için geçerlidir. Bir matris C'deki ayrık elektrik voltajlarını (+1 ve -1) çarpan tüm katsayıları ve sırasıyla $\hat{e}$ ve $\hat{b}$ vektörlerindeki tüm ayrık elektrik voltajlarını ve manyetik akıları birleştirmek, FIT tarafından ayrıklaştırılan Faraday yasasının matris formuna yol açmaktadır:

$$C\hat{e} = -\frac{d}{dt} \hat{b} \quad (6.28)$$

C matrisi, kıvrılma operatörünün ayrık eşdeğeridir. Bu bir topolojik matristir, çünkü bir G ızgarasında, kenarlar ve fasetler arasındaki ilişkiyi, yani hangi kenarı belirli bir yüzeye ait olduğunu ve nispi oryantasyonun ne olduğunu tanımlar. Bir kenar belirli bir yüzeye aitse ve yüzey ile aynı yönelime sahipse, o zaman matristeki ilgili elemanın değeri 1'dir. Yönlendirme ters ise, değer -1 olarak ayarlanır. Aksi takdirde, eleman yüze ait değilse, matristeki ilgili elemanın değeri 0 olarak ayarlanır.



Şekil 6.3. Bir n ikili ızgara yüzeyinde Ampere yasasının ayrıklaştırılması

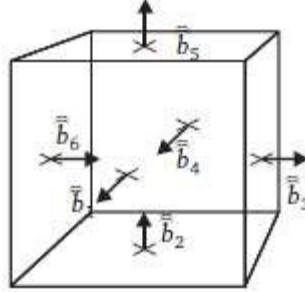
Maxwell denklemlerinden ikinci kanun, Ampère yasası, Faraday yasasına benzer şekilde ayrıştırılmıştır, ancak ikili ızgara $\tilde{G}$ 'de ayrıştırılmıştır. (6.1) nolu denklemin solundaki integralden Şekil 6.3'te gösterildiği gibi çift ızgara kenarları boyunca dört integral toplamına bölünmüştür. Her integral, ilgili kenar boyunca ayrık manyetik voltajdır. Ampère'in yasası FIT kullanılarak şu şekilde ayrıklaştırılır:

$$\hat{h}_1 + \hat{h}_2 - \hat{h}_3 - \hat{h}_4 = \frac{d}{dt} \hat{d}_n + \hat{j}_n \quad (6.29)$$

Faraday'ın yasasına benzer şekilde, Ampère yasasının FIT'le ayrıştırılan matris formu şöyledir:

$$\tilde{c} \hat{h} = -\frac{d}{dt} \hat{d} + \hat{j} \quad (6.30)$$

$\tilde{c}$, ayırık manyetik gerilimleri çarparak katsayıları içerir. Bu matris yine kıvrım operatörünün ayırık eşdeğeridir, ancak ikili ızgara üzerindedir.



Şekil 6.4. Gauss'un manyetizma yasasının birincil bir ızgara hücresinde ayrıklaştırılması

Gauss'un manyetizma kanununun ayrıklaştırılması, (6.3) nolu denklemin sol taraftaki integrali altı yüzeyde altı integrale bölünerek birincil ızgara hücresinin üzerinde gerçekleştirilir (Şekil 6.4). Bir yüzey üzerindeki her integral, bu yüzeyin içinden ayırık olan manyetik akıdır. Gauss'un FIT kullanılarak ayrılan manyetizma yasası şöyledir;

$$\hat{b}_1 - \hat{b}_2 + \hat{b}_3 - \hat{b}_4 + \hat{b}_5 - \hat{b}_6 = 0 \quad (6.31)$$

Gauss'un manyetizma yasasının matris formu şöyledir:

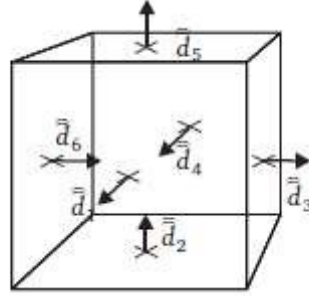
Matris S, manyetik akıların katsayılarından oluştuğunda;

$$S \hat{b} = 0 \quad (6.32)$$

S, birincil ızgaradaki diverjans operatörünün ayırık eşdeğeridir. Gauss'un manyetizma yasasına benzer şekilde, Gauss yasasının sol taraftaki entegrasyonunun ayrıklaştırılması bir hücrede, ancak ikili ızgarada gerçekleştirilir. Sol taraftaki integral, altı yüzde altı integral şeklinde bölünmüştür (Şekil 6.5). Gauss yasası şu şekilde yazılabilir:

$$\hat{d}_1 - \hat{d}_2 + \hat{d}_3 - \hat{d}_4 + \hat{d}_5 - \hat{d}_6 = q_n \quad (6.33)$$

Gauss yasasının matris formu şöyledir:



Şekil 6.5. Gauss yasasının çift ızgaralı bir hücreye ayrılması

$$\tilde{\mathcal{S}} \hat{\mathcal{d}} = q \quad (6.34)$$

Burada $\tilde{\mathcal{S}}$, çift ızgaradaki diverjans operatörünün ayrık eşdeğeridir. Elektrik akılarının katsayılarından oluşur. (6.28), (6.30), (6.32) ve (6.34) nolu denklemleri Maxwell'in ızgara denklemleri olarak bilinir. Yukarıdaki denklemlerin bir parçası olan topolojik matrislerin temel özelliklerinden bazıları şunlardır;

$$\tilde{\mathcal{C}} = \mathcal{C}^T \quad (6.35)$$

(6.35) nolu denklemden ilk özellik, ikili ızgaradaki kıvrım matrisini ana ızgaradaki kıvrım matrisinin transpozu ile birleştirmektedir. Vektör analizinden kaynaklanan ve ayrışma ve kıvrılma işleçlerinin ayrık eşdeğerlerini göz önünde bulunduran özellikler şu şekilde belirtilebilir;

$$SC=0, \tilde{\mathcal{S}}\tilde{\mathcal{C}} = 0 \quad (6.36)$$

6.2. CST STUDIO SUITE Programında PGM SAR Laboratuvar Ortamının Gerçekleştirilmesi

Bu tez çalışmasında, baz istasyonlarının insan kafasının tamamında ve kafada bulunan dokulardaki etkisini incelemek amaçlanmıştır ve bu doğrultuda PGM SAR laboratuvarında yapılan ölçümler CST STUDIO SUITE programında kullanılan SAM yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Baz istasyonunu modellemek için kullanılan GSM Sinyal Üreteci yerine 900 MHz ve 1800 MHz de EMA yayılımını gerçekleştiren iki farklı monopol anten kullanılmıştır. Bu antenlerin güçleri PGM SAR Laboratuvarında alınan SAR (10 gr) değerleri elde edilecek şekilde değiştirilerek laboratuvar ortamı CST STUDIO programına başarıyla aktarılmıştır.

6.2.1. CST STUDIO SUITE Programında Kullanılan Antenler

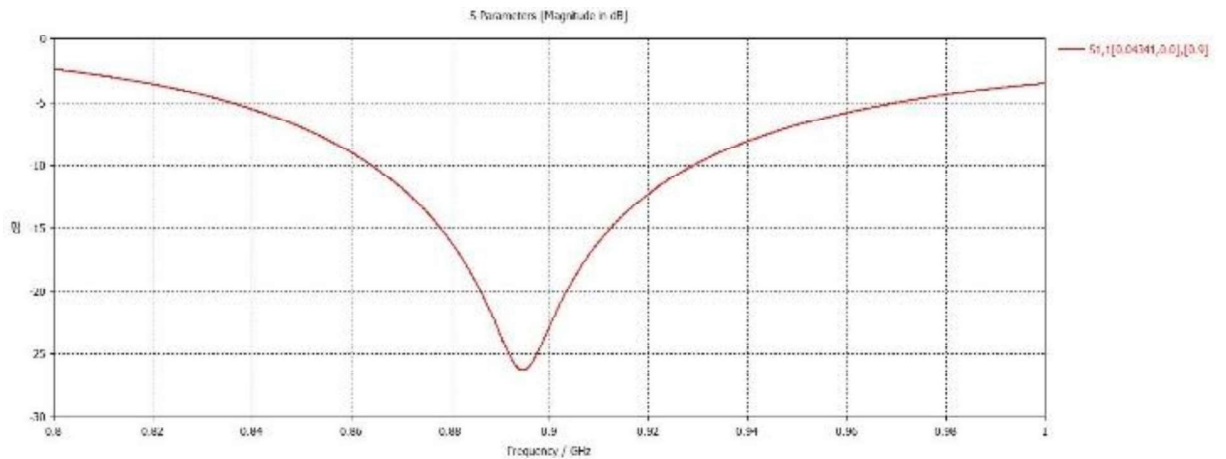
6.2.1.1. 900 MHz Monopol Anten

Monopol antenler en yaygın kullanılan ve en basit radyo anten tiplerinden biridir. Düşey olarak monte edilmiş, alt ucu doğrudan toprağa bağlanmış ya da topraklanmış, boyu genellikle çalıştığı frekansa ait dalga boyunun 1/4 uzunluğuna eşit düz bir metal çubuktan oluşur. 900 MHz de yapılan simülasyonlarda Şekil 6.6'da verilen anten kullanılmıştır. Kullanılan anten $\lambda/4$ monopol antendir. Uzunluğu yaklaşık olarak 8.3 cm olan bu antenin çıkış gücü CST STUDIO programında rahatlıkla değiştirilebilmektedir.



Şekil 6.6. 900 MHz de yapılan simülasyonlarda kullanılan monopo anten

Şekil 6.7.'de simülasyonlarda kullanılan monopol antenin s_{11} parametresi verilmiştir. Grafikden görülebileceği gibi kullanılan monopol anten 900 MHz bandında minimum kayıpla EMA yayılımı sağlamaktadır.



Şekil 6.7. 900 MHz monopol anten s_{11} parametresi

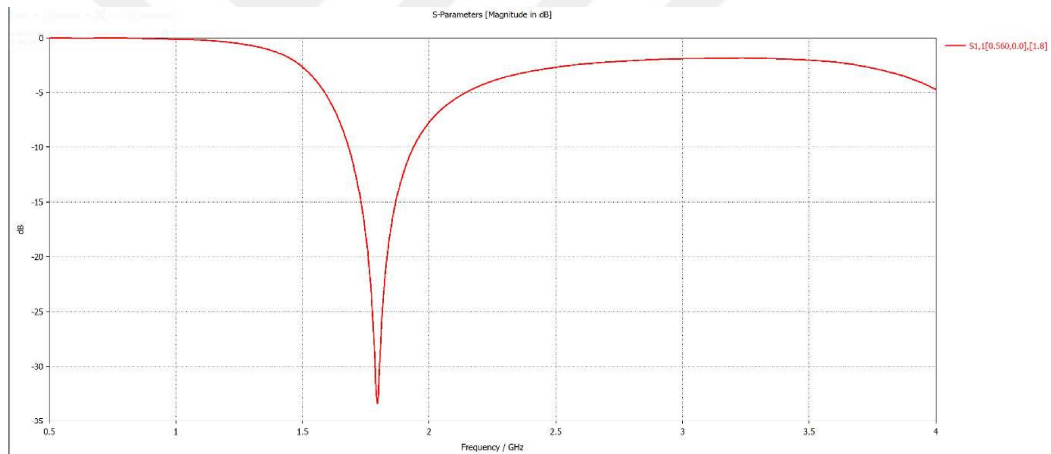
6.2.1.2. 1800 MHz Monopol Anten

1800 MHz de yapılan simülasyonlarda Şekil 6.8’de verilen anten kullanılmıştır. Kullanılan anten $\lambda/4$ monopol antendir. Uzunluğu yaklaşık olarak 4.2 cm olan bu antenin çıkış gücü CST STUDIO programında rahatlıkla değiştirilebilmektedir.



Şekil 6.8 1800 MHz de yapılan simülasyonlarda kullanılan monopol anten

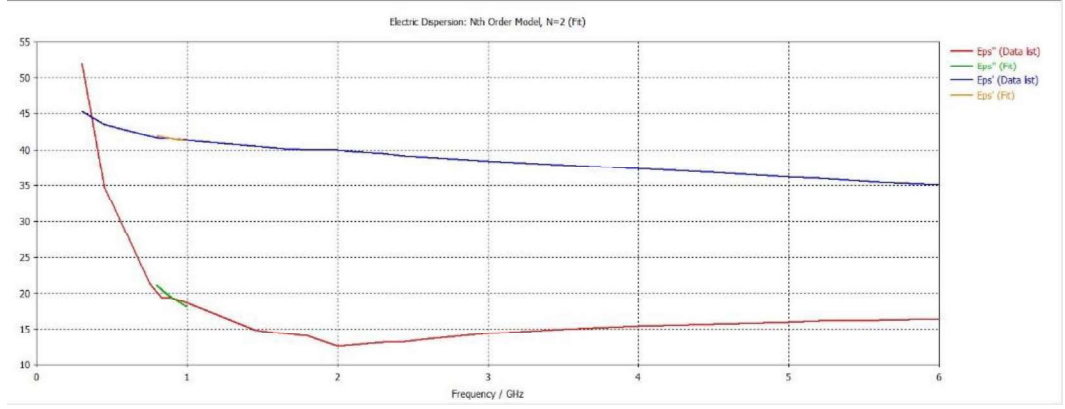
Şekil 6.9’da simülasyonlarda kullanılan monopol antenin s_{11} parametresi verilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi kullanılan monopol anten 1800 MHz bandında minimum kayıpla EMA yayılımı sağlamaktadır.



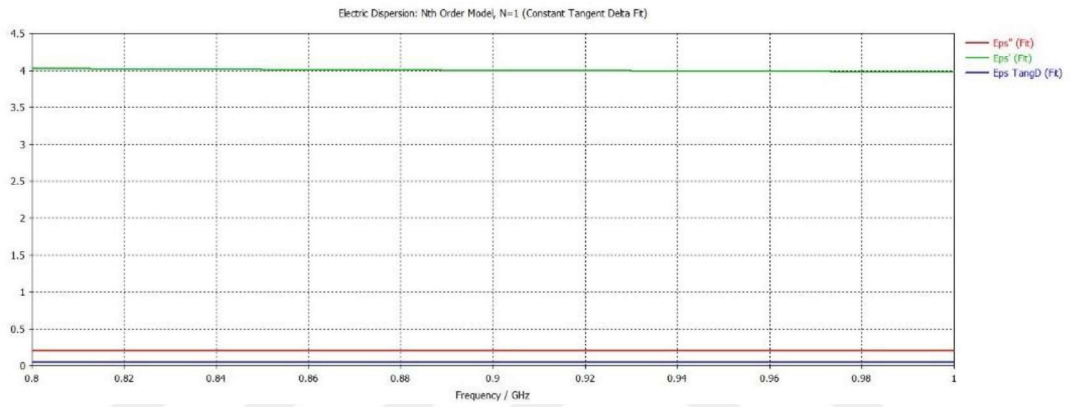
Şekil 6.9. 1800 MHz monopol anten s_{11} parametresi

6.2.2. 900 MHz ve 1800 MHz SAM

CST MICROWAVE STUDIO’da (Anonymous, 2019e) bulunan SAM kafa modeli, iki parçadan oluşan basitleştirilmiş homojen bir insan modelidir. Dış kabuk ve bir dokuyu simüle eden sıvıdan oluşmaktadır. SAM kafasının dielektrik özellikleri, anatomik bir kafada dokuların dielektrik özelliklerinin ortalaması olarak elde edilmektedir. SAM kafa modelinin dış kabuğu, 3.5 değerinde bağıl geçirgenliğe ve frekanstan bağımsız olarak 0.0016 S/m’lik elektrik iletkenliği değerine sahiptir.



Şekil 6.10. 900 MHz ve 1800 MHz de SAM ‘in bağıl geçirgenlik grafiği



Şekil 6.11. 900 MHz ve 1800 MHz de SAM’in elektrik iletkenlik değerleri

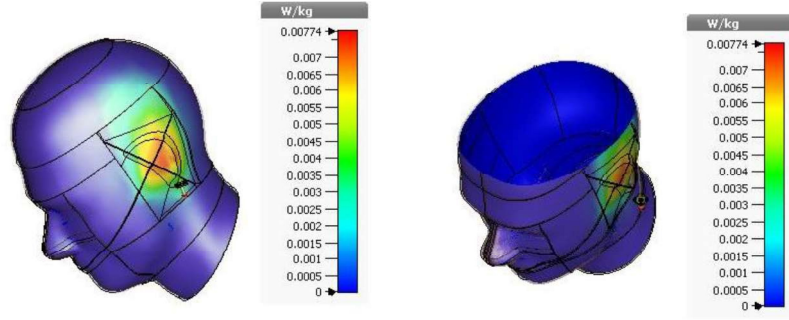
Dokuyu simüle eden sıvının SAM’in kafa modelinin dış kabuğunun aksine dielektrik özellikleri frekansa bağlıdır. İki tipik GSM frekansındaki değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. 900 MHz ve 1800 MHz’de SAM’in bağıl geçirgenlik ve iletkenlik değerleri

TSL	Bağıl Geçirgenlik	İletkenlik (S/m)
900 MHz	41.5	0.97
1800 MHz	40.0	1.4

Simülasyonlardaki SAM kafa modelinin kullanılması, insan kafasındaki SAR dağılımının hızlı bir şekilde düşük doğrulukta belirlenmesini sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında farklı güçlerde SAR değeri hesaplamalarında SAM’in kullanılmasının amacı PGM SAR Laboratuvarı ortamının bilgisayar ortamında benzetiminin oluşturulmasını sağlamaktır. Doku simülasyon sıvısı, gerçek insan kafasında maksimum SAR değerinin meydana geldiği dokuyu göstermeyen homojen bir sıvıdır.

Bu nedenle, herhangi bir cihazın SAR değerin ölçülmesi gerektiğinde homojen olmayan bir insan modelinin kullanılması daha gerçekçidir. Şekil 6.12’de CST STUDIO SUITE programında kullanılan SAM örneği görülmektedir.



Şekil 6.12. CST STUDIO SUITE Programında kullanılan SAM örneği

CST STUDIO programında kullanılan bu SAM örneğinin 900 MHz ve 1800 MHz kullanıldığındaki bağıl geçirgenlik (ϵ) ve iletkenlik (σ) değerleri PGM SAR laboratuvarında kullanılan doku fantom sıvısı ile örtüşmektedir. Çizelge 6.2’de PGM SAR laboratuvarından kullanılan örnek doku sıvısının ve CST STUDIO SUITE programında kullanılan SAM’in bağıl geçirgenlik değerleri alt alta verilmiştir.

Çizelge 6.2. 900 MHz’de laboratuvarında kullanılan doku örnek sıvısının ve SAM’in bağıl geçirgenlik değerleri

	Frekans (MHz)	Bağıl Geçirgenlik’	Bağıl Geçirgenlik’’
PGM Lab.	901.95	39.77	18.53
CST STUDIO	900	41.5	19.3732

Çizelge 6.3. 1800 MHz’de laboratuvarında kullanılan doku örnek sıvısının ve SAM’in bağıl geçirgenlik değerleri

	Frekans (MHz)	Bağıl Geçirgenlik’	Bağıl Geçirgenlik’’
PGM Lab.	1803.20	38.3	13.87
CST STUDIO	1800	40	13.9806

Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’ten görüleceği gibi bağıl geçirgenlik değerleri açısından laboratuvarında kullanılan doku fantom sıvısı başarıyla modellenmiştir. Çizelge 6.4’de 900 MHz ve 1800 MHz’de PGM SAR Laboratuvarında kullanılan doku sıvısı örneği ve SAM de bulunan dokuyu simüle eden sıvının iletkenlik değeri açısından karşılaştırılması verilmiştir. İletkenlik değerleri açısından, bağıl geçirgenlik

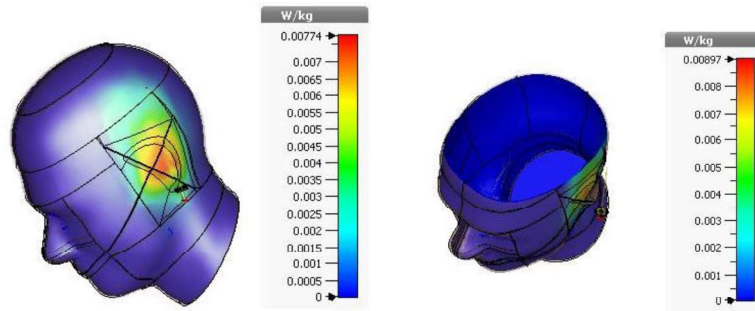
değerlerinde olduğu gibi insan doku sıvısının, CST STUDIO SUITE programında sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 6.4. 900 MHz ve 1800 MHz’de Laboratuvarında kullanılan doku örnek sıvısının ve SAM’in iletkenlik değerleri

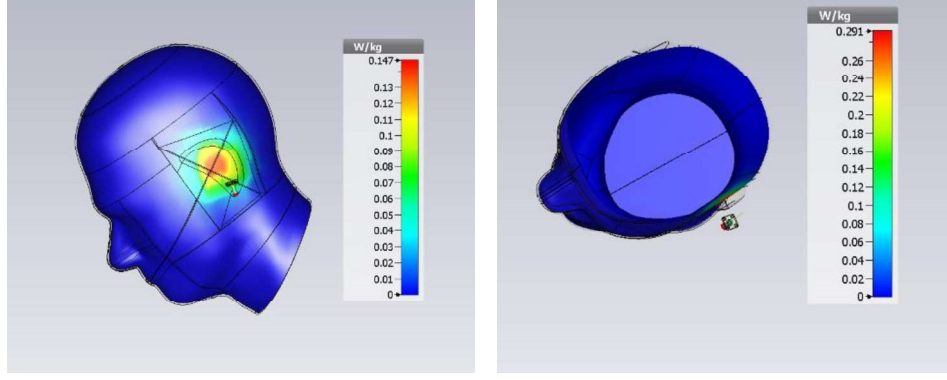
	Frekans (MHz)	İletkenlik (S/m)
PGM Lab.	901.95	0.93
PGM Lab.	1803.20	1.39
CST STUDIO	900	0.97
CST STUDIO	1800	1.4

6.2.3. CST STUDIO SUİTE Programında SAR Ölçüm Düzenekinin Kurulması

CST STUDIO SUITE programında simülasyon ortamı kurulurken PGM SAR Laboratuvarında elde edilen SAR değerleri referans alınmıştır. Laboratuvarında olduğu gibi bir monopol anten ile bağıl geçirgenlik ve iletkenlik değerleri doku fantom sıvısına yaklaşık olarak eşit olan SAM kullanılmıştır. Laboratuvarında kullanılan antenin çevrili olduğu plastik madde dikkate alınarak anten ile SAM arasında Şekil 6.14’den görüleceği gibi 10 mm’lik bir mesafe bırakılmıştır. Laboratuvarında elde edilen SAR değerleri simülasyon programında kullanılan antenin gücü ve buna bağlı olarak elektromanyetik alanın genlik değeri değiştirilerek elde edilmiştir.



Şekil. 6.13 900 MHz de Monopol anten ve SAM fantomu ile kurulan deney düzeneği



Şekil.6.14 1800 MHz de Monopol anten ve SAM fantomu ile kurulan deney düzeneği

SAM fantomu ve anten ile CST STUDIO SUITE programında kurulan düzenek referans alınarak, kafada bulunan doku ve organlar için ölçümler yapılmıştır. 900 MHz de yapılan simülasyonlarda 2.20 GHz i7 işlemcili 8GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. 1800 MHz de yapılan simülasyonlarda 2.66 GHz i7 işlemcili 8GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

Bilgisayarda SAM ile yapılan benzetimler yaklaşık olarak 2 dakıda sürmektedir. Simülasyon süresi programda belirlenen örgü (mesh) sayısına göre değişiklik gösterebilmektedir.

CST STUDIO SUITE programında SAM kullanılarak yapılan simülasyonlarda, SAR (10 gr) değeri referans alınarak laboratuvar ortamı başarıyla bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonrasında SAM'in antene göre pozisyonu sabit tutularak, hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesi ile yer değiştirilmiştir ve SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) değerleri hesaplamalı insan modelleri için 900 MHz ve 1800 MHz de ayrı ayrı hesaplanmıştır.

6.2.4. Hesaplamalı İnsan Modelleri

2004'te yayınlanan Caon'un makalesinin (2004) ilk cümlesi “İnsan anatomisinin hesaplamalı bir modeli, insan vücudunun dış kılıfının iç organ ve dokuların sınırları ile birlikte matematiksel bir temsili” şeklindedir. Hesaplamalı insan modellerini geliştirmenin temel nedeni dozimetri hesaplamalarında kullanılmasıdır. İlk nesil sayısal insan modelleri 1960'lar ve 1980'ler arasında geliştirilmiştir. Bu zaman diliminde, en basit hesaplamalı insan modelleri, yalnızca geometrik şekilleri birleştirerek modellenmiştir. Böyle insan modeli modelleri insan modelleri Oak Ridge

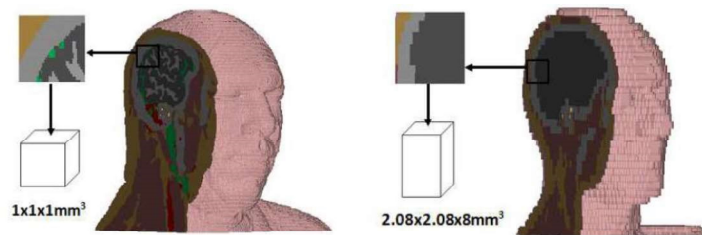
Ulusal Laboratuvarı (ORNL) tarafından geliştirilmiştir. Bu modellerde kafa, boyun, gövde ve bacaklar bulunmaktadır.

1980'lerde başlayan bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi, iç organların kesit görüntülerini yüksek doğrulukla üretebilen bilgisayarlı tomografi (BT) ve Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) cihazlarının üretiminin gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Tıbbi taramalardan bir veri seti mevcut olduğunda, insan vücudundaki organları ve dokuları tanımlamak için bir segmentasyon süreci yürütülmüştür. Segmentasyon işleminin sonunda, belirli bir simülasyon yazılımı türünde daha fazla kullanılmak üzere bir fantom oluşturulmuştur. Bunlar; Sonlu entegrasyon tekniği çözümleri (FIT), zaman bölgesinde sonlu farklar (FDTD) çözümleri, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözümleri, moment metodu (MoM) çözümleri veya Monte-Carlo iyonize radyasyon simülatörleri olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan CST STUDIO SUITE programında yapılan simülasyonlarda Sonlu Entegrasyon Tekniğini (FIT) kullanılmıştır.

Araştırmacılar tarafından oluşturulan ve yaygın olarak kullanılan iki tip hesaplamalı insan modeli bulunmaktadır. Bunlar yüzey tabanlı ve voksel tabanlı insan modelleridir.

Yüzey tabanlı insan modelleri insan vücudundaki dokuları temsil etmek için kullanılan üçgen yüzey ağlarından inşa edilmiştir. İnsan vücudundaki organ ve dokuların dış yüzeylerini ve şekillerini ayrıntılı olarak tahmin edebilmektedir.

Voksel tabanlı insan modelleri, tomografik modeller veya voksel fantomlar olarak bilinmektedir. Medikal taramalardan elde edilen 2D kesit görüntülerden elde edilmektedirler, böylece piksel verileri vokseller olarak adlandırılan üç boyutlu hacim elemanlarında dönüştürülmektedir. Şekil 6.15'de gösterildiği gibi, bir voksel bir küp veya dikdörtgen prizma şeklinde olabilmektedir.



Şekil 6.15. Farklı voksel şekillerini içeren voksel tabanlı insan kafa fantomları

Her voksel, belirli bir doku veya organı temsil eden bir ID numarası ile atanan bir malzeme ile doldurulmaktadır. Bununla birlikte, voksel bazlı modeller, yüksek oranda homojen olmayan doku dağılımlarını kolaylıkla haritalayabilmektedir ve çeşitli simülasyonlarda kullanılabilir.

Şu anda dünya çapında Uluslararası Elektromanyetik Güvenlik Komitesi (ICES) tarafından listelenen 28 tam vücut modeli bulunmaktadır. Burada listelenen modellerin çoğu voksel bazlıdır. Bu insan modelleri çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bunlara örnek olarak radyo frekansına maruz kalma, özgül emilim oranının hesaplanması verilebilir. Bu tez çalışmasında da CST STUDIO SUITE simülasyon programı ile yapılan özgül emilim oranı hesaplamalarında voksel tabanlı insan modelleri kullanılmıştır.

6.2.4.1. Voxel Tabanlı İnsan Modelleri

İnsan anatomisini oldukça doğru bir şekilde tanımlayan Voxel tabanlı insan modelleri, elektromanyetik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu insan modelleri farklı kaynaklardan elde edilmiştir. Kadavraların tüm vücut Computer Tomography (CT) taramaları, klinik muayenelerden elde edilen CT görüntüleri, gönüllülerin MRI görüntüleri ve “Görünür İnsan” projesinden bu insan modelleri elde edilmektedir. Bir insan vücudu CT ile tarandığında, radyasyonlu X ışınlarının çok sayıda hat boyunca zayıflaması, vücudun enine kesitleri ile ölçülmektedir. Her kesitten toplanan veriler taranan kesitin bir görüntüsünü elde etmek için kullanılır. MRI ise insan vücudundaki yumuşak dokuların ve buradaki metabolik süreçlerin ayrıntılı resimlerini üreten güçlü bir tıbbi görüntüleme tekniğidir. X-ışınları yerine güçlü manyetik alan kullanımıyla CT'den ayrılmaktadır. Bir sonraki adım olarak, bu kaynaklardan elde edilebilen görüntüler üzerinde bir segmentasyon süreci yürütülmektedir. Tıbbi görüntüde görülen her bir doku ve organın sınırlarının tanımlanması zaman alıcı bir süreçtir. Belli bir dokuya veya organa ait olan tüm pikseller, onları diğer dokulardan veya organlardan ayırmak için bir ID numarası ile atanmaktadır.

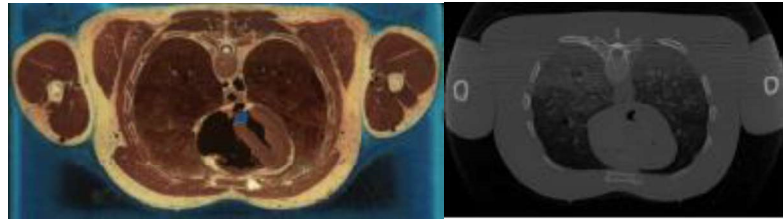
İnsan modellerinin üretimi için kullanılan tıbbi görüntülerle ilgili bazı olumsuzluklar bulunmaktadır. Kadavralardan alınan bazı görüntülerde sağlıklı bir insan anatomisiyle karşılaştırıldığında bazı kusurlar olabilmektedir. Ayrıca çoğu medikal görüntü kadavradan veya yatar pozisyonda olan bir hastadan elde edilmektedir. Bu nedenle iç organların pozisyonları ayakta duran bir kişinin

organlarının pozisyonlarından farklıdır. Ek olarak, benzer boyuttaki bireylerde organların boyutunda farklılıklar olabilmektedir. (Petoussi-Henss vd, 2001)'de listelenen modeller yaş, cinsiyet, boyut ve ağırlık olarak farklı voksel tabanlı insan modelleridir. Voksel modellerin avantajı, incelenen insan modellerinin boyutlarına uyacak şekilde ölçeklendirilebilmeleridir, böylece boyut olarak hem artırılabilen hem de azaltılabilmektedir.

Birçok olumlu özelliğine rağmen, voksel-insan modellerinin de bazı dezavantajları vardır. Birincisi voksel şeklidir. Voksel kullanarak insan modelinin temsili, pürüzsüz değil merdiven şeklindedir. Bu temsil şekli, belirli organların büyüklüğünün olması gerekenden daha büyük tahmin edilmesine yol açabilmektedir. Diğer bir dezavantajı, voksel boyutlarından daha küçük boyutlara sahip dokuların segmentasyonu ile ilgili olan problemdir. Bazı durumlarda bu, yanlış simülasyon sonuçlarına yol açabilmektedir.

1986'da ABD Ulusal Tıp Kütüphanesi (NLM), Görünür İnsan Projesi'ni (VHP) (Anonymous, 2019y) başlatmıştır. Bu projenin amacı, bir erkeğin ve bir kadının tam, anatomik olarak ayrıntılı, üç boyutlu insan bedenlerinin oluşturulmasıdır. 1994/95'de, erkek ve kadın insan bedenlerinden ilk veri setleri elde edilmiştir. Bu veri setleri, erkek ve dişi kadavraların enine CT, MR ve donuk kesit resimlerinden oluşmaktadır.

Görünen insan erkeği, mahkeme emri ile ölümcül bir enjeksiyondan ölen 38 yaşındaki bir gönüllünün kadavrasından elde edilmiştir. Donmuş kadavralardan elde edilen MR ve CT görüntüleri bozulmuş olabileceğinden, vücut ilk önce MR ve CT ile taramıştır. CT taraması, 1 mm'lik dilim kalınlığında, 1 mm'lik merkezlerde, baştan aşağıya doğru, donmuş bir vücut üzerinde ayak parmaklarına kadar gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki adımda kadavra 1 mm aralıklarla kesitlenmiştir ve anatomik kesitlerin fotoğraflanmıştır. Bu kadavradan 1871 CT ve anatomik görüntü elde edilmiştir. Her iki görüntü türünün bir örneği Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



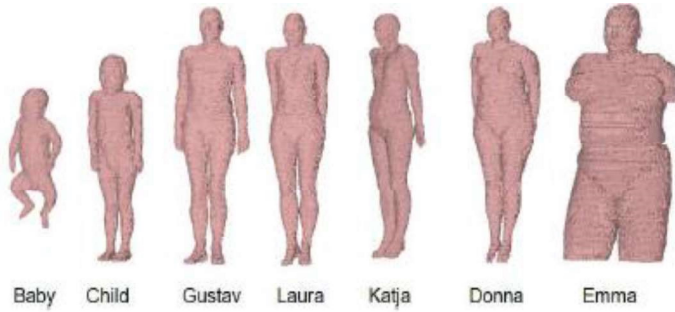
Şekil 6.16. Görünür insan erkeğinin bir donuk kesiti ve dondurulduktan sonra yapılan CT taraması

6.2.4.1.1. CST Voxel Ailesi

CST voxel ailesi Şekil 6.17' de görüldüğü gibi çeşitli boyut yaş ve cinsiyetlerde yedi farklı insan modelinden oluşmaktadır. Çizelge 6.5'te CST voksel ailesinin karakteristik özellikleri verilmiştir. Bu modeller GSF voksel ailesinden gelmektedir (N. Petoussi-Hens vd,2002), (M. Zankl vd, 2003). Bu insan modelleri hastaların CT ve MR görüntülerinden oluşturulmuş ve iki-beş milyon voksele yerleştirilmiş 135 doku ve organ ihtiva etmektedir. Bu tez çalışmasında bu aileden Gustav, Laura, Baby ve Child hesaplamalı insan modelleri kullanılmıştır.

Çizelge 6.5. CST voksel ailesi karakteristikleri

Model	Yaş	Cinsiyet	Boy (cm)	Kilo (kg)	Çözünürlük (mm)
Baby	8 hafta	kadın	57	4.2	$0.85 \times 0.85 \times 4.0$
Child	7 yıl	kadın	115	21.7	$1.54 \times 1.54 \times 8.0$
Donna	40 yıl	kadın	176	79	$1.875 \times 1.875 \times 10.0$
Emma	26 yıl	kadın	170	81	$0.98 \times 0.98 \times 10.0$
Gustav	38 yıl	erkek	176	69	$2.08 \times 2.08 \times 8.0$
Laura	43 yıl	kadın	163	51	$1.875 \times 1.875 \times 5.0$
Katja	43 yıl	kadın (hamile)	163	62	$1.775 \times 1.775 \times 4.84$



Şekil 6.17. CST Voksel ailesi

6.2.4.2. Biyolojik Dokuların Dielektrik Özellikleri

Herhangi bir çalışmada kullanılan modelin, elektromanyetik simülasyon senaryolarında maruz kaldığı tüm frekanslar için biyolojik dokularının dielektrik özellikleri elde edilmelidir.

Bu amaçla kullanılan Cole-Cole denklemi, insan doku ve organlarının dielektrik özelliklerinin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı ticari yazılımlar, belirli

bir frekansta biyolojik malzeme özelliklerini elde etmek için Cole-Cole modelini kullanmaktadır. Ayrıca, Cole-Cole modeline dayalı dielektrik malzeme özelliklerini kontrol etmek için çevrimiçi bir platform sağlayan araştırma enstitüleri bulunmaktadır. 4-Cole Cole modeline dayalı dielektrik özellikleri (C. Gabriel vd, 1996) bir web aracında paylaşılan ilk ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC) 'dir (Anonymous, 2019ü).

Verilen linkten 43 tane insan vücut dokusunun göreceli geçirgenliği ve iletkenliği 10 MHz ve 6 GHz arasındaki frekanslar için elde edilebilmektedir. İkincisi, aynı modele dayalı olarak insan dokularının dielektrik parametrelerinin hesaplanması için hem çevrimiçi bir araç hem de bağımsız bir Win32 aracı sağlayan Nello Carrara Uygulamalı Fizik Enstitüsü (IFAC) 'dır (Anonymous, 2019v). İletkenlik ve bağıl geçirgenliğin hesaplanmasına ek olarak, kayıp tanjant, penetrasyon derinliği ve dalga boyu da buradan hesaplanabilmektedir. Önceki araçla karşılaştırıldığında, bu araç 10 Hz ile 100 GHz arasındaki frekanslar için çeşitli hesaplamalar sağlamaktadır. Ayrıca IFAC'ın sunduğu dielektrik parametreler, tek bir frekanstaki tüm dokular, belirli bir frekans aralığında tek doku ve tek bir frekansta tek bir doku için elde edilebilmektedir.

Bu tez kapsamında insan dokularının dielektrik özellikleri Cole-Cole modeli kullanılarak elde edilmiştir. CST STUDIO SUITE programında sadece 100 MHz ve 900 MHz de kullanılan hesaplamalı insan modellerin dokularının dielektrik özellikleri hazır olarak sunulmaktadır. Bu nedenle 900 MHz de yapılan simülasyonlarda dokuların dielektrik özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapılmazken, 1800 MHz de yapılan hesaplamalarda dokuların dielektrik özellikleri program üzerinde Cole-Cole modeline dayalı olarak değiştirilerek SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) değerleri elde edilmiştir.

7. HESAPLAMALI İNSAN MODELİ KULLANILARAK SAR HESAPLAMA

BTK PGM SAR Laboratuvarında, 900 MHz ve 1800 MHz için kullanılan insan doku sıvısı üzerinde her frekans değerinde altı farklı güç değerinde olmak üzere toplamda on iki farklı SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) ölçümü yapılmıştır. CST STUDIO SUITE programında SAM kullanılarak ve antenin çıkış gücü laboratuvarında elde edilen SAR (10 gr) değerleri referans alınarak değiştirilmiş ve Laboratuvar ortamının benzetimi başarıyla oluşturulmuştur. SAR Laboratuvarında iki farklı frekansta ve altı farklı güç değerinde elde edilen SAR (10 gr) değerleri ve bu SAR değerlerine karşılık gelen elektrik alan (E) değerleri Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. 900 MHz’de SAR Laboratuvarında ölçülen SAR değerleri ve bu değerlere karşılık gelen E değerleri

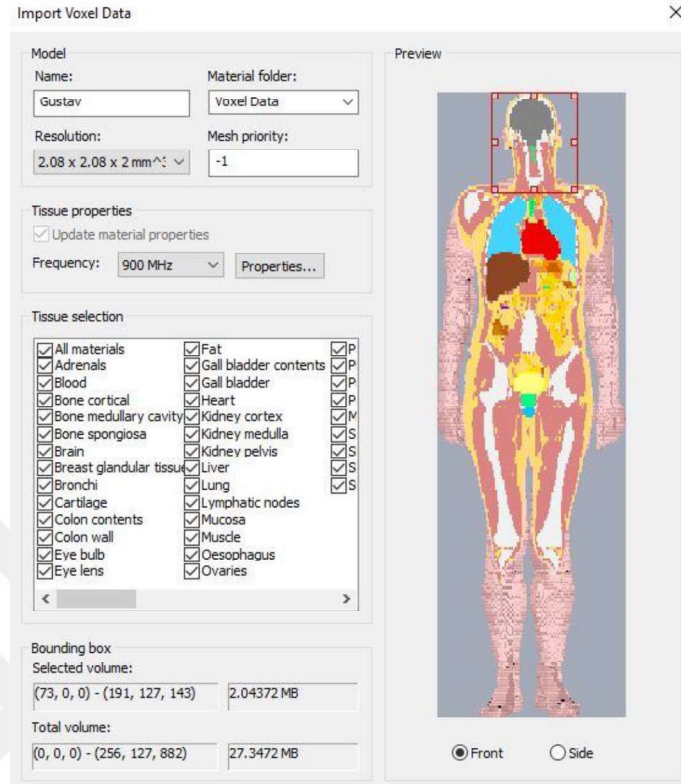
900 MHz					
	Güç	$\sigma(S/m)$	$\rho(kg/m^3)$	SAR(10 gr)(W/kg)	E(V/m)
1.Ölçüm	0.5 W	0.926476	1000	0.007741	2.89
2.Ölçüm	1 W	0.926476	1000	0.175244	13.7532
3.Ölçüm	1.5 W	0.926476	1000	0.340988	19.184
4.Ölçüm	2 W	0.926476	1000	0.691897	27.327
5.Ölçüm	3 W	0.926476	1000	1.338633	38.011
6.Ölçüm	4 W	0.926476	1000	2.332720	50.178

Çizelge 7.2. 1800 MHz’de SAR Laboratuvarında ölçülen SAR değerleri ve bu değerlere karşılık gelen E değerleri

1800 MHz					
	Güç	$\sigma(S/m)$	$\rho(kg/m^3)$	SAR(10 gr)(W/kg)	E(V/m)
1.Ölçüm	0.25 W	1.386887	1000	0.146821	10.289
2.Ölçüm	0.5 W	1.386887	1000	0.662952	21.683
3.Ölçüm	1. W	1.386887	1000	1.748332	35.50
4.Ölçüm	1.25 W	1.386887	1000	2.522159	42.644
5.Ölçüm	1.5 W	1.386887	1000	3.122695	47.450
6.Ölçüm	2 W	1.386887	1000	3.129226	47.50

Bu aşamadan sonra CST STUDIO SUITE programında, altı farklı güç değerinde laboratuvarında elde edilen SAR (10 gr) değerlerinin yaklaşık olarak elde edildiği SAM, farklı yaş, boy, cinsiyet ve kilodaki hesaplamalı insan modellerinin kafasıyla değiştirilmiştir. Bu değişim yapılırken ilk olarak hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesi, programda sağlanan arayüz sayesinde vücuttan ayrılmış ve SAM ile aynı

pozisyonda konumlandırılmıştır. Şekil 7.1 de hesaplamalı insan modeli kafasının vücuttan ayrılması görülmektedir.



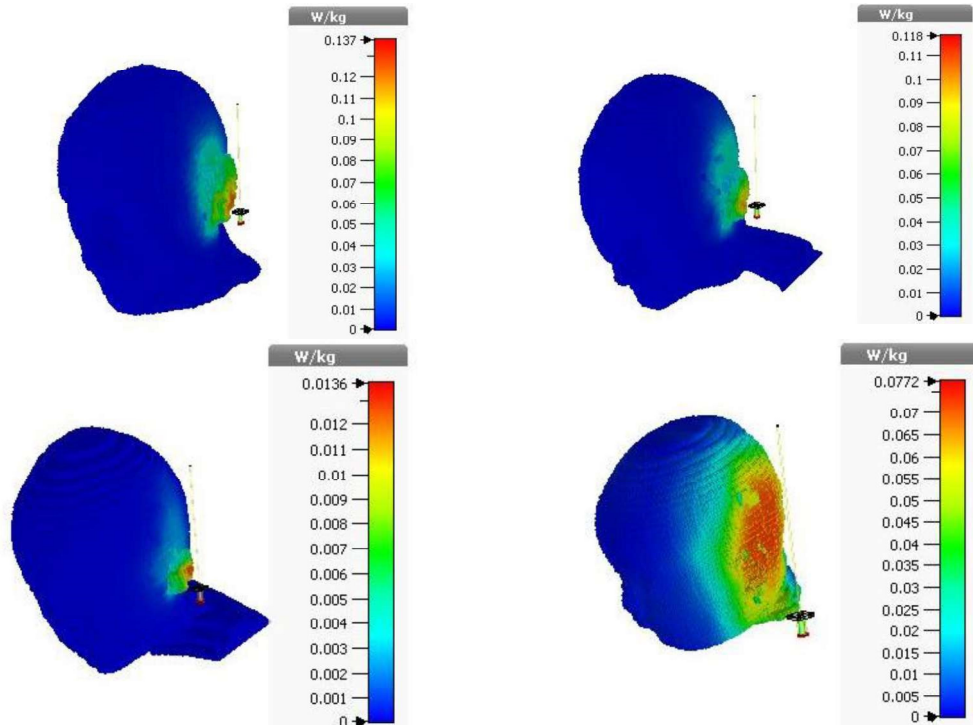
Şekil 7.1. Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesinin vücuttan ayrılması

SAM ile hesaplamalı insan modeli kafa bölgesi, simülasyon ortamında aynı kordinatlarda konumlandırıldıktan sonra, hesaplamalı insan modeli kafasının SAM ile büyüklüğünün farklı olmasından kaynaklı olarak antene olan mesafenin değiştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kulak bölgesinin antene olan mesafesi referans alınarak hesaplamalı insan modeli antene göre yeniden konumlandırılmıştır. Konumlandırma işlemi tamamlandıktan sonra laboratuvarında elde edilen SAR (10 gr) değerlerine karşılık gelen, simülasyon ortamında kullanılan monopol anten güçleri değiştirilmeden, Gustav, Laura, Child ve Baby olarak isimlendirilen dört farklı hesaplamalı insan modeli kafasında, tüm kafa, beyin, yağ dokusu, kas dokusu, göz ve deri için ayrı ayrı SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) hesaplamaları yapılmıştır. İki farklı frekansta, dört farklı insan modelinde, altı farklı güçte, tüm kafa ve beş farklı doku olmak üzere toplamda altı farklı bölgede, SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) için ayrı ayrı olmak üzere toplamda 566 adet hesaplama yapılmıştır. Sonrasında baz istasyonlarının hedef dokuda oluşturduğu SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) değerleri diğer dokuların da hedef dokudaki SAR değerine etkisi gözetilerek tekrar hesaplanmıştır. Bu hesaplama

için ise iki farklı frekansta, dört farklı insan modelinde, altı farklı güçte, beş farklı doku da SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) ayrı ayrı olmak üzere toplamda 320 adet hesaplama yapılmıştır.

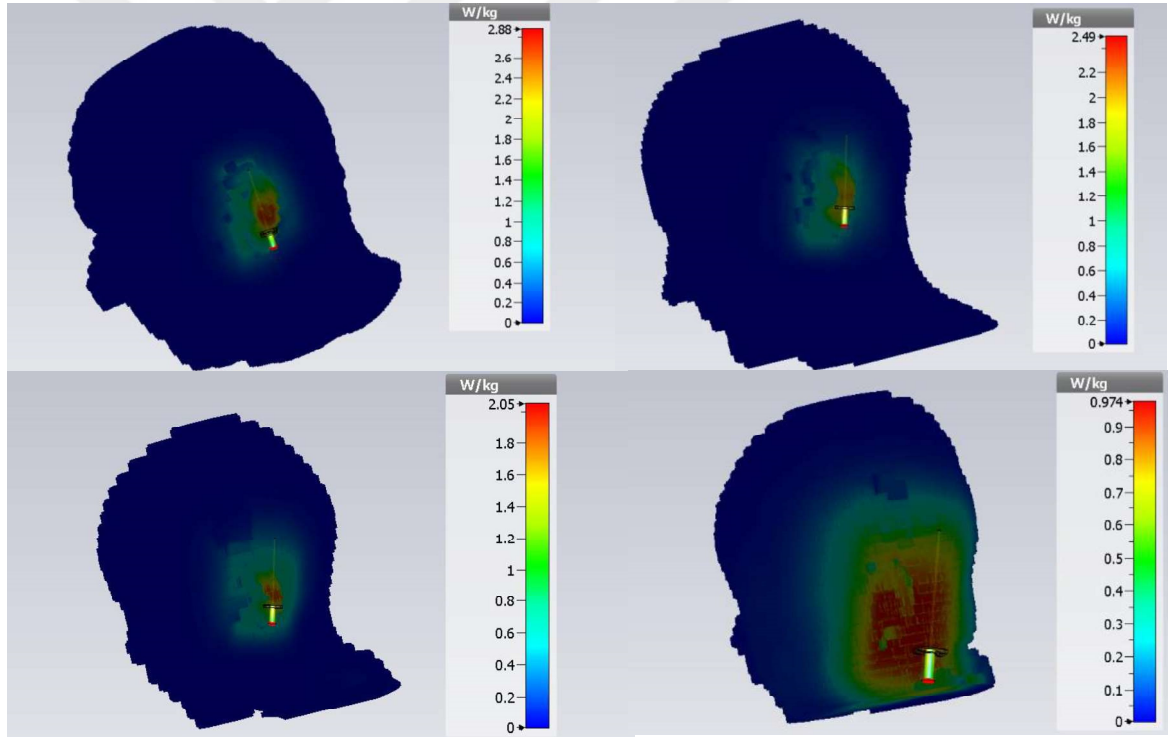
7.1. Sabit Güçte Laboratuvarında Oluşturulan Benzetim

SAR Laboratuvarında 900 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici 1W güç değerine ayarlandığında elde edilen SAR (10 gr) değeri; simülasyon ortamında monopul antenin güç değeri 0.0213997 W değerine ayarlandığında SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesiyle değiştirildiğinde, 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeğin kafa bölgesini temsilen kullanılan Gustav hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 0.137442 W/kg, yetişkin bir kadının kafa bölgesini temsilen kullanılan Laura hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 0.118042 W/kg, çocuk kafasını temsilen kullanılan Child hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 0.106794 W/kg, bebek kafasını temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 0.0772101 W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.0213997 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modelleriyle yapılan benzetim görüntüleri Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. 900 MHz ‘de Gustav, Laura, Child, Baby için, tüm kafa SAR (10 gr) hesaplamaları

SAR Laboratuvarında 1800 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici 1W güç değerine ayarlandığında elde edilen SAR (10 gr) değeri; simülasyon ortamında monopul antenin güç değeri 0.1568 W değerine ayarlandığında SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesiyle değiştirildiğinde, 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeğin kafa bölgesini temsilen kullanılan Gustav hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 2.87674 W/kg, yetişkin bir kadının kafa bölgesini temsilen kullanılan Laura hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 2.49047 W/kg, çocuk kafasını temsilen kullanılan Child hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 2.04772 W/kg, bebek kafasını temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinin tüm kafasında 0.973995W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.1568 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modelleriyle yapılan benzetim görüntüleri Şekil 7.3’ de verilmiştir.



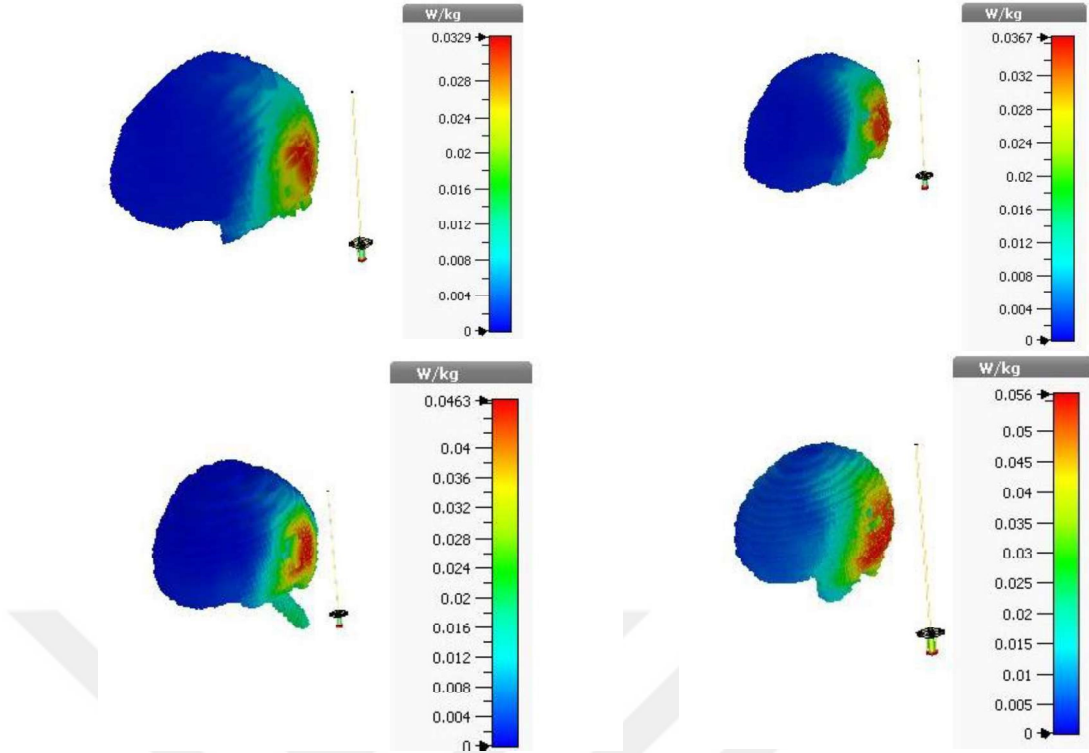
Şekil 7.3. 1800 MHz’de Gustav, Laura, Child, Baby için tüm kafa SAR (10 gr) hesaplamaları

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz’de, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit elektrik alan değerinde, kullanılan insan modellerinden, yetişkin erkeği temsilen kullanılan Gustav

hesaplamalı insan modelinde en yüksek, bebeği temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinde ise en düşük SAR değerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

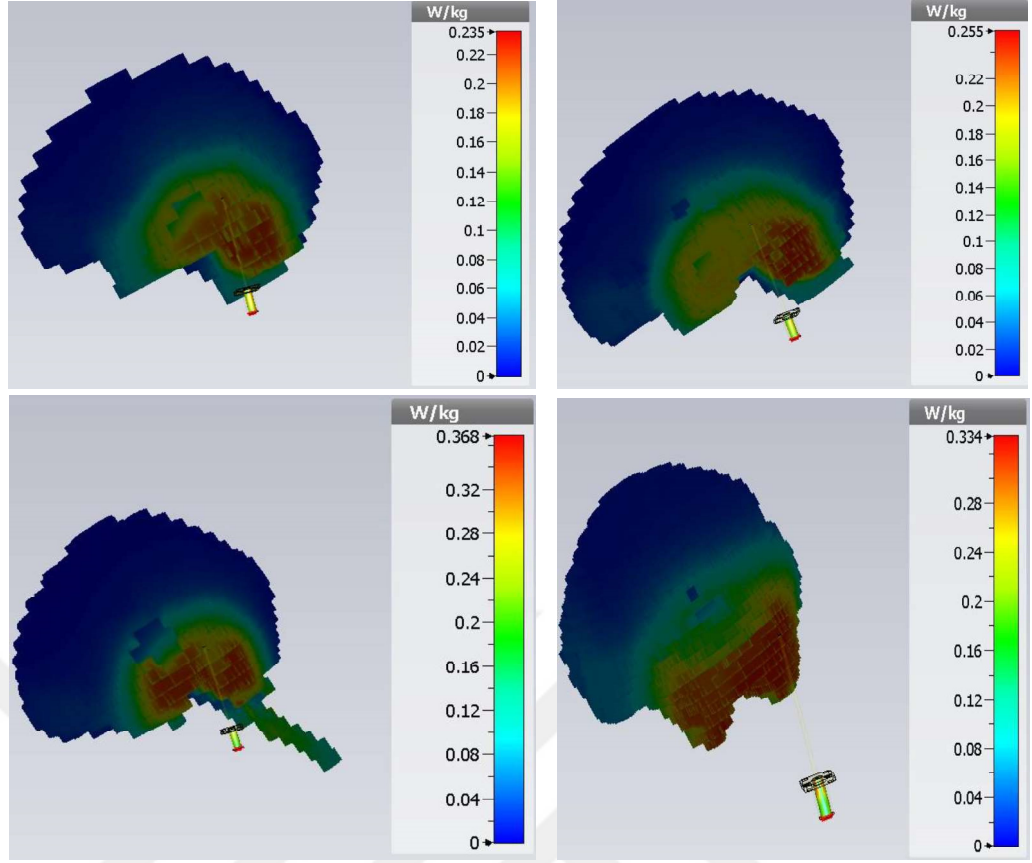
7.2. Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi İhmal Edildiğinde Beyin Dokusu SAR Değerleri

SAR Laboratuvarında 900 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici 1W güç değerine ayarlandığında elde edilen SAR (10 gr) değeri; simülasyon ortamında monopol antenin güç değeri 0.0213997 W değerine ayarlandığında, SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında beş farklı dokuda oluşan SAR değerleri; ilk olarak diğer dokuların etkisi yok sayılarak, sonrasında diğer dokuların da etkisi hesaba katılarak hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi yok sayıldığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeğin beyin dokusunu temsilen kullanılan Gustav hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0,0328615 W/kg, yetişkin bir kadının beyin dokusunu temsilen kullanılan Laura hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0,0366637 W/kg, çocuk beyin dokusunu temsilen kullanılan Child hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0,0462564 W/kg, bebek beyin dokusunu temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.0560198 W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.0213997 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinin beyin dokusuyla yapılan benzetim görüntüleri Şekil 7.4’de verilmiştir.



Şekil 7.4. 900 MHz’de Gustav, Laura, Child, Baby için, beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplamaları

1800 MHz’de 1W’lık GSM Sinyal Üretici güç değerine karşılık gelen 0.1568 W değerinde diğer dokuların etkisi yok sayıldığında, 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeğin beyin dokusunu temsilen kullanılan Gustav hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.234984 W/kg, yetişkin bir kadının beyin dokusunu temsilen kullanılan Laura hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.255245 W/kg, çocuk beyin dokusunu temsilen kullanılan Child hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.367847 W/kg, bebek beyin dokusunu temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.334019 W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.1568 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinin beyin dokusuyla yapılan simülasyon görüntüleri Şekil 7.5’te verilmiştir.



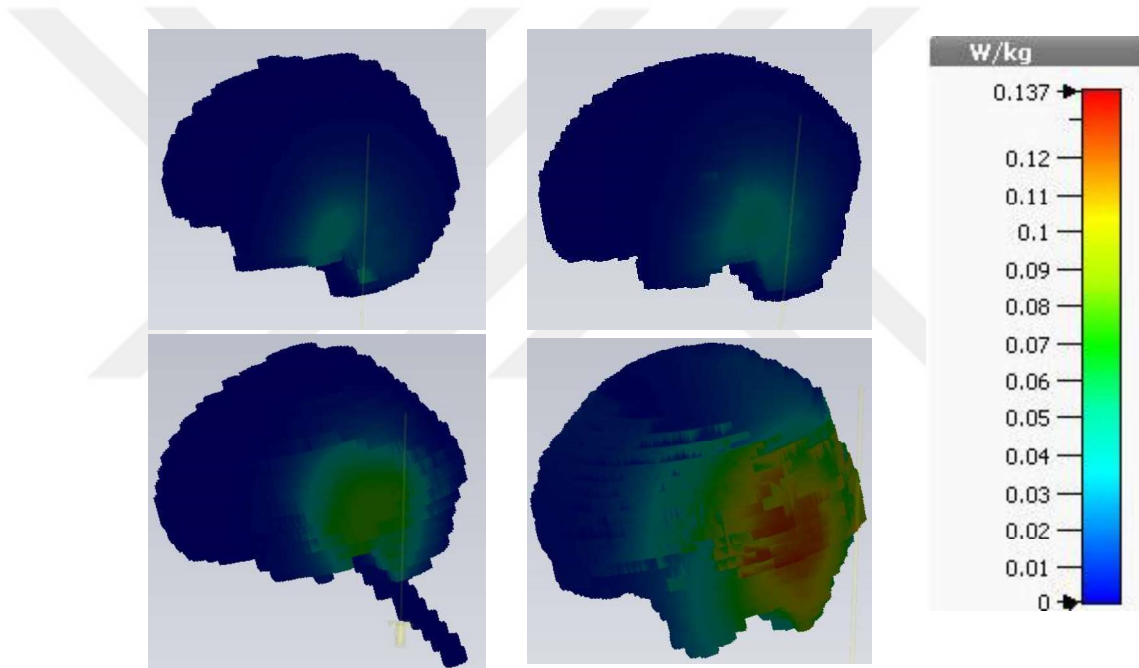
Şekil 7.5. 1800 MHz’de Gustav, Laura, Child, Baby için, beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplamaları

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz’de, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi ihmal edildiğinde beyin dokularından, çocuk beyin dokusunu temsilen kullanılan Child beyin dokusunda en yüksek, yetişkin erkek beyin dokusunu temsilen kullanılan Gustav beyin dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir.

7.3. Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi Dikkate Alınarak Beyin Dokusu SAR Değerleri

Bu bölümde Bölüm 7.2’de verilen güç değerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında beş farklı dokuda oluşan SAR değerleri diğer dokuların da etkisi hesaba katılarak hesaplanmıştır. Bu amaçla ilk olarak 900 MHz’de hesaplamalı insan modelinin tüm kafası alınarak ilgili doku haricindeki diğer dokular “gizle” komutuyla gizlenerek, ilgili dokuya diğer dokuların etkisi hesaba katılmıştır. Sonrasında dokuda oluşan maksimum SAR değerleri; tüm kafa için olan SAR aralığı sürekli olarak daraltılarak ve dokuda bu aralıkta en yüksek

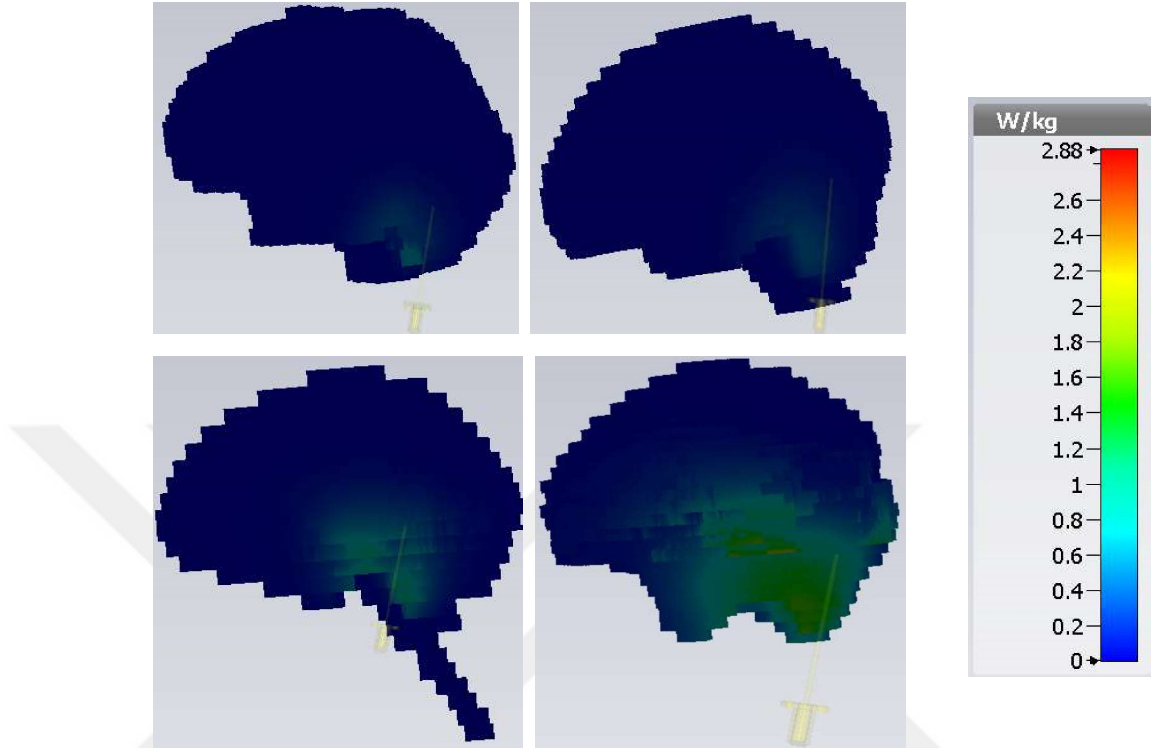
SAR değerinin olup olmadığının imleç yardımıyla sürekli kontrolü yapılarak, tespit edilmiştir. Diğer dokuların etkisi göz önüne alındığında yetişkin bir erkeğin beyin dokusunu temsilen kullanılan Gustav hesaplamalı insan modelinin 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: beyin dokusunda 0.03977 W/kg, yetişkin bir kadının beyin dokusunu temsilen kullanılan Laura hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.0396 W/kg, çocuk beyin dokusunu temsilen kullanılan Child hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.0606 W/kg, bebek beyin dokusunu temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.0742 W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.0213997 W güç değerinde, diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında ve 0-0.137442 W/kg SAR ölçeklendirmesi yapıldığında, hesaplamalı insan modellerinin beyin dokusunun görüntüleri Şekil 7.6’de verilmiştir.



Şekil 7.6. 900 MHz’de Gustav, Laura, Child, Baby için, diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında alınan beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

1800 MHz’de 1W’lık GSM Sinyal Üretici güç değerine karşılık gelen 0.1568 W değerinde diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında, yetişkin bir erkeğin beyin dokusunu temsilen kullanılan Gustav hesaplamalı insan modelinin 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: beyin dokusunda 0.646 W/kg, yetişkin bir kadının beyin dokusunu temsilen kullanılan Laura hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.4 W/kg, çocuk beyin dokusunu temsilen kullanılan Child hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.79 W/kg, bebek beyin dokusunu temsilen kullanılan Baby hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.665 W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.1568 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, diğer

dokuların etkisi hesaba katıldığında ve 0-2.87674 W/kg SAR ölçeklendirmesi yapıldığında, hesaplamalı insan modellerinin beyin dokusuyla yapılan simülasyon görüntüleri Şekil 7.7’de verilmiştir.



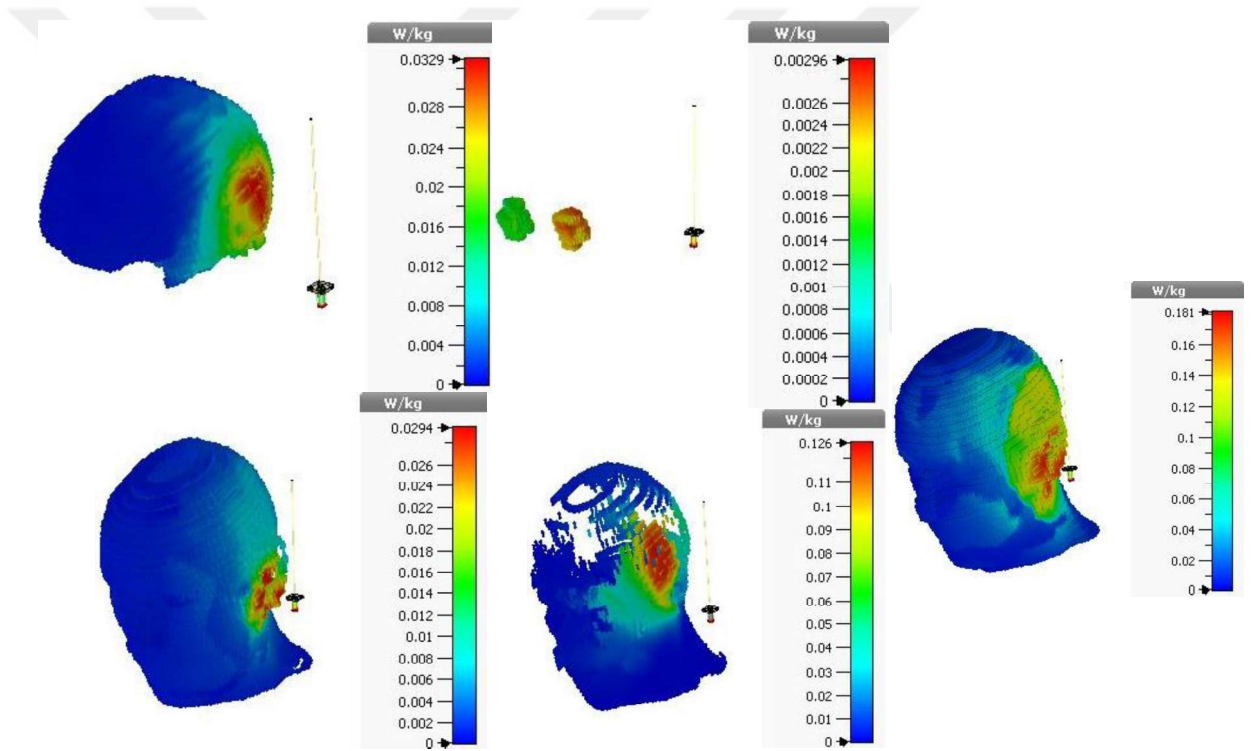
Şekil 7.7. 1800 MHz’de Gustav, Laura, Child, Baby için, diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında alınan beyin dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz’de, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi dikkate alındığında 900 MHz’de beyin dokularından, bebek beyin dokusunu temsilen kullanılan Baby beyin dokusunda en yüksek, yetişkin kadın beyin dokusunu temsilen kullanılan Laura beyin dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir. 1800 MHz’de beyin dokularından, çocuk beyin dokusunu temsilen kullanılan Child beyin dokusunda en yüksek, yetişkin kadın beyin dokusunu temsilen kullanılan Laura beyin dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir.

7.4. Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi İhmal Edildiğinde Gustav’daki Farklı Dokularda SAR Değerleri

SAR Laboratuvarında 900 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici 1W güç değerindeyken elde edilen SAR (10 gr) değeri; simülasyon ortamında monopol antenin

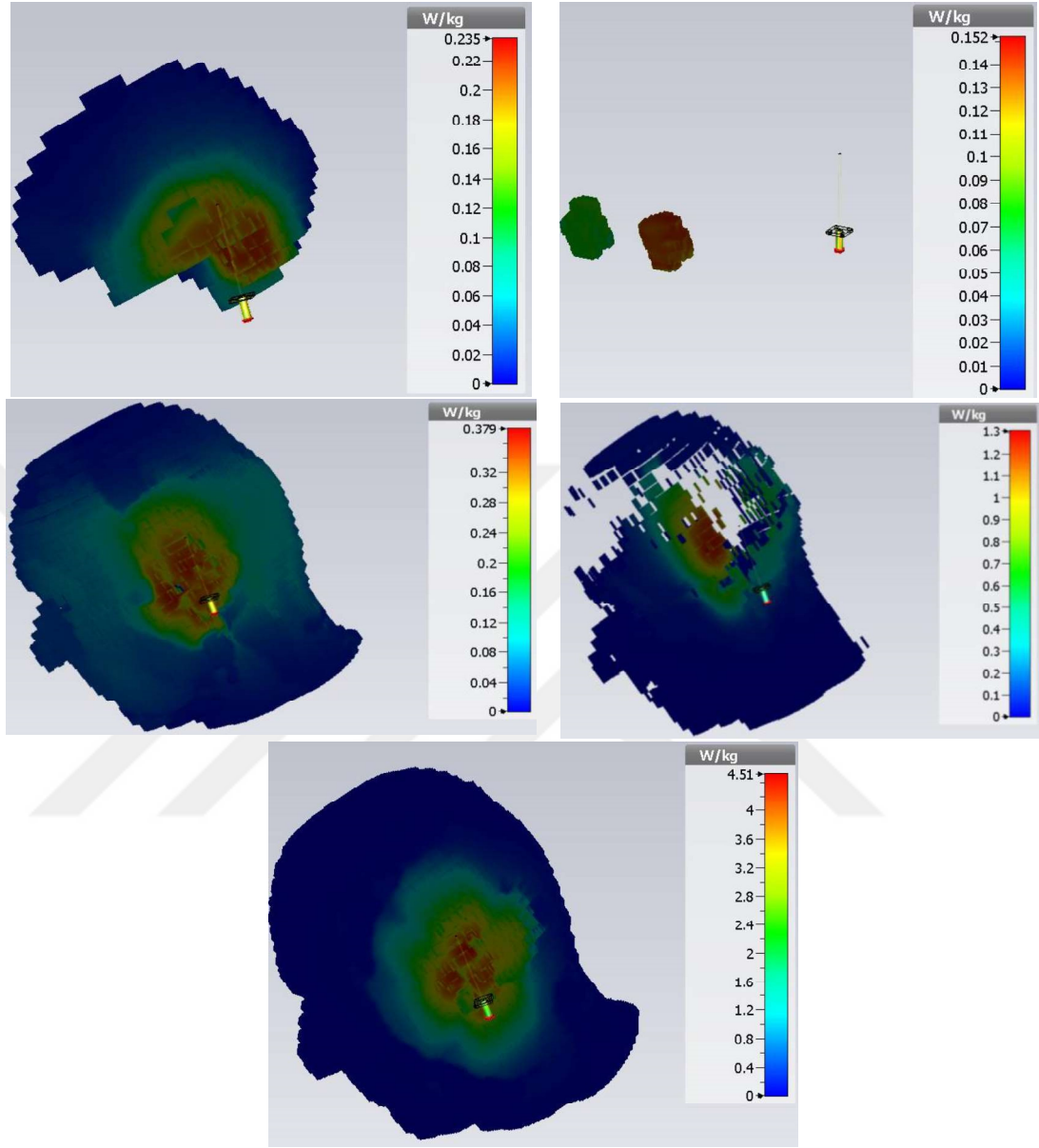
güç değeri 0.0213997 W değerine ayarlandığında, SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinden Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında bu insan modelinde bulunan beş farklı dokuda oluşan SAR değerleri, diğer dokuların etkisi yok sayılarak, hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi yok sayıldığında yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: beyin dokusunda 0.0328615 W/kg, göz dokusunda 0,0366637 W/kg, yağ dokusunda 0.0293574 W/kg, kas dokusunda 0.0560198 W/kg, deri dokusunda 0.180769 W/kg, değerleri elde edilmiştir. 0.0213997 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav'ın beş farklı dokusunda yapılan SAR (10 gr) hesaplaması görüntüleri Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.8. 900 MHz'de Gustav hesaplamalı insan modelinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınmayarak elde edilen beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu, deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

1800 MHz'de 1W'lık GSM Sinyal Üretici güç değerine karşılık gelen 0.1568 W değerinde diğer dokuların etkisi yok sayıldığında yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: beyin dokusunda 0.234984 W/kg, göz dokusunda 0.151725 W/kg, yağ dokusunda 0.378676 W/kg, kas dokusunda 1.3044 W/kg, deri dokusunda 4.5116, değerleri elde edilmiştir. 0.1568 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan

modellerinden Gustav'ın beş farklı dokusunda yapılan SAR (10 gr) hesaplaması görüntüleri Şekil 7.9'da verilmiştir.



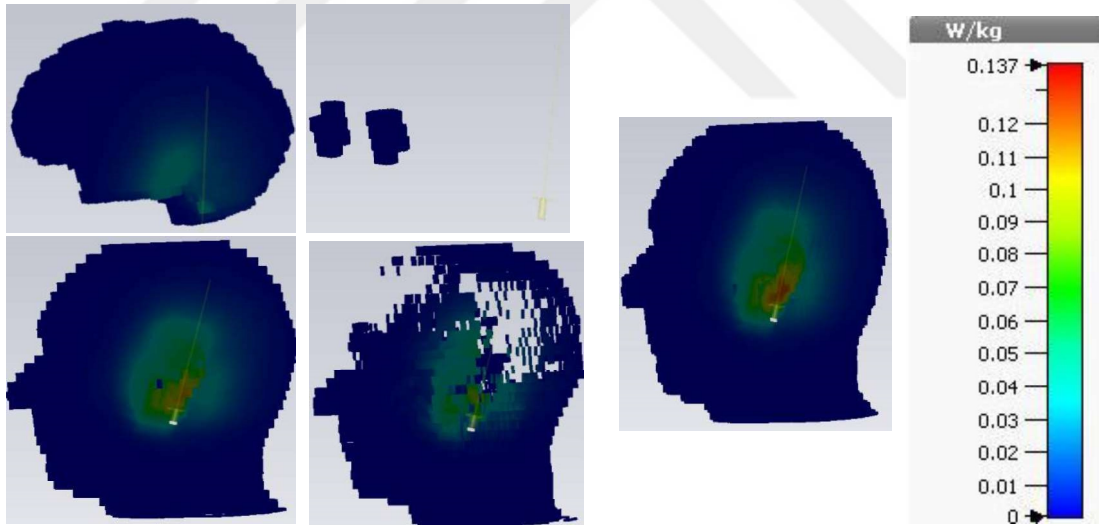
Şekil 7.9. 1800 MHz'de Gustav hesaplamalı insan modelinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınmayarak elde edilen beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu, deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz'de, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi ihmal edildiğinde 900 MHz'de Gustav'ın kafa bölgesinde bulunan dokulardan deri dokusunda en yüksek, yağ dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir. 1800 MHz'de Gustav'ın kafa bölgesinde bulunan

dokulardan deri dokusunda en yüksek, göz dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir.

7.5.Sabit Güçte Diğer Dokuların Etkisi Dikkate Alınarak Gustav'daki Farklı Dokularda SAR Değerleri

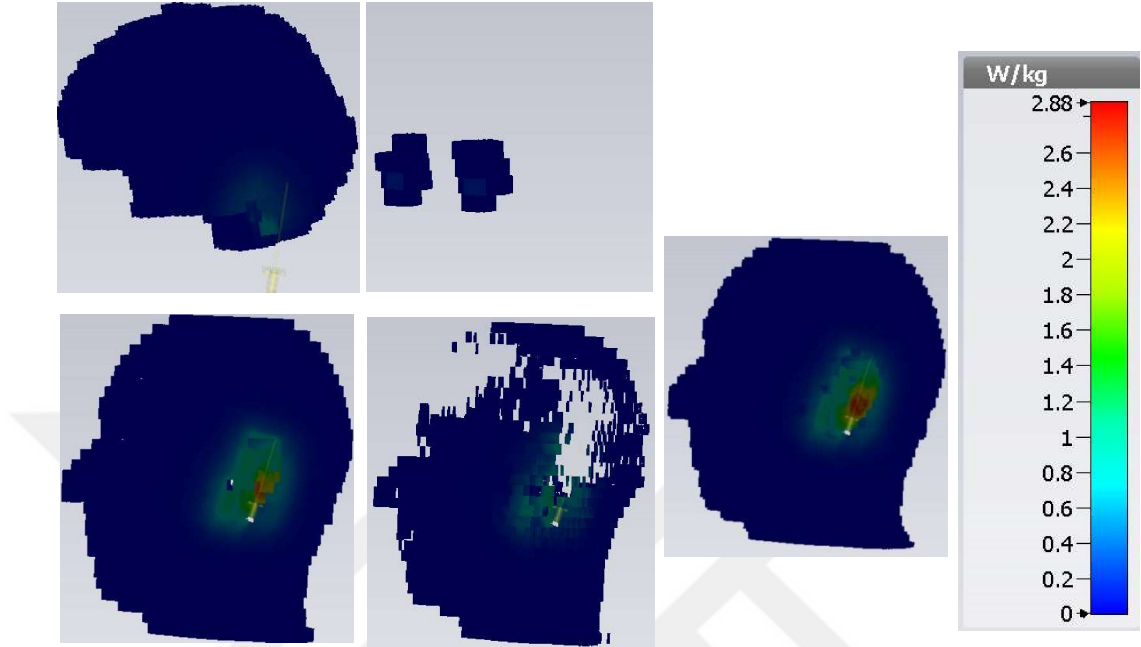
900 MHz de bölüm 7.4'te verilen güç değerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinden Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında bu insan modelinde bulunan beş farklı dokuda oluşan SAR değerleri, diğer dokuların etkisi hesaba katılarak hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.03977 W/kg, göz dokusunda 0.000579 W/kg, yağ dokusunda 0.113 W/kg, kas dokusunda 0.0854 W/kg, deri dokusunda 0.180769 W/kg değerleri elde edilmiştir. 0.0213997 W güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav'ın beş farklı dokusunda 0-0.137442 W/kg SAR ölçeklendirmesi yapıldığında elde edilen SAR (10 gr) hesaplaması görüntüleri, Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.10. 900 MHz'de ve Sabit güç değerinde diğer dokuların etkisi hesaba katılarak Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu, deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

1800 MHz'de 1W'lık GSM Sinyal Üreteci güç değerine karşılık gelen 0.1568 W değerinde diğer dokuların etkisi hesaba katıldığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin beyin dokusunda 0.646 W/kg, göz dokusunda 0.00333 W/kg, yağ dokusunda 2.68 W/kg, kas dokusunda 1.12 W/kg, deri dokusunda 2.88 W/kg, değerleri elde edilmiştir. 0.1568 W

güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav'ın beş farklı dokusunda 0-2.87674 W/kg SAR ölçeklendirmesi yapıldığında elde edilen SAR (10 gr) hesaplaması görüntüleri, Şekil 7.11'de verilmiştir.

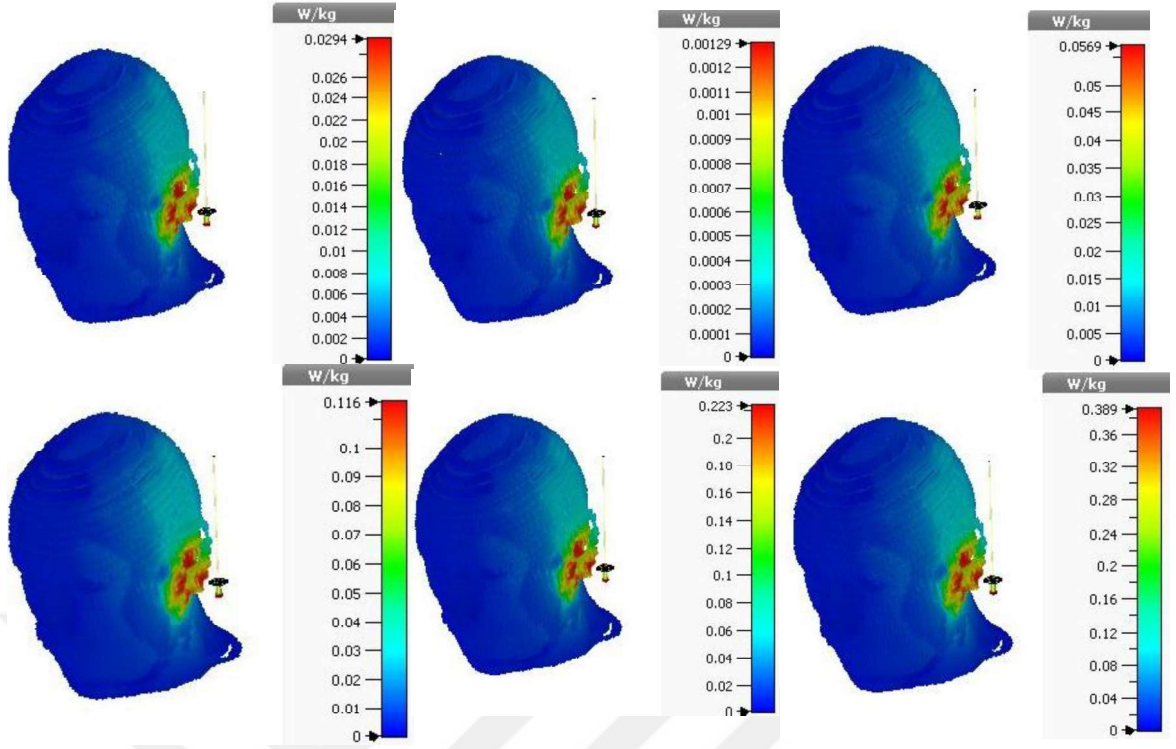


Şekil 7.11. 1800 MHz'de ve Sabit güç değerinde diğer dokuların etkisi hesaba katılarak Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan beyin dokusu, göz dokusu, yağ dokusu, kas dokusu ve deri dokusu SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz'de, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınarak 900 MHz'de Gustav'ın kafa bölgesinde bulunan dokulardan deri dokusunda en yüksek, göz dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir. 1800 MHz'de Gustav'ın kafa bölgesinde bulunan dokulardan deri dokusunda en yüksek, göz dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir.

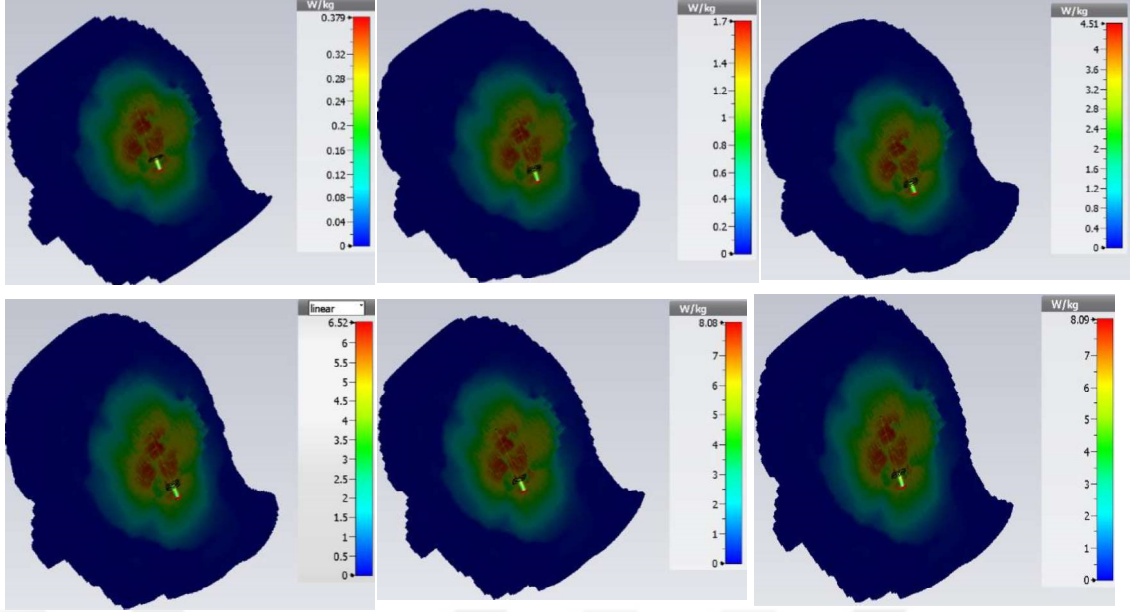
7.6. Altı Farklı Güç Değerinde Diğer Dokuların Etkisi İhmal Edildiğinde Gustav Deri Dokusu SAR Değerleri

SAR Laboratuvarında 900 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici Çizelge 7.1’de verilen güç değerlerindeyken elde edilen SAR (10 gr) değerleri; simülasyon ortamında monopoll antenin güç değeri sırasıyla 0.000942214 W, 0.0213997 W, 0.041472 W, 0.0841997 W, 0.16245 W, 0.283881 W değerlerine ayarlandığında, SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerlerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinden Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında bu insan modelinde bulunan deri dokusunda oluşan SAR değerleri, diğer dokuların etkisi yok sayılarak, hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi yok sayıldığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin deri dokusunda birinci güç kademesinde 0.00129258 W/kg, ikinci güç kademesinde 0.0293574 W/kg, üçüncü güç kademesinde 0.0568937 W/kg, dördüncü güç kademesinde 0.11551 W/kg, beşinci güç kademesinde 0.222858 W/kg, altıncı güç kademesinde 0.389445 W/kg değerleri elde edilmiştir. Altı farklı güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav’ın deri dokusunda yapılan SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.12 900 MHz’de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate almayarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

SAR Laboratuvarında 1800 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici Çizelge 7.2’de verilen güç değerlerindeyken elde edilen SAR (10 gr) değeri; simülasyon ortamında monopul antenin güç değeri sırasıyla 0.0131869 W, 0.059168 W, 0.1568 W, 0.226646 W, 0.28095 W, 0.28125W değerlerine ayarlandığında, SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerlerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinden Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında bu insan modelinde bulunan deri dokusunda oluşan SAR değerleri, diğer dokuların etkisi yok sayılarak, hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi yok sayıldığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin deri dokusunda birinci güç kademesinde 0.379426 W/kg, ikinci güç kademesinde 1.70244 W/kg, üçüncü güç kademesinde 4.5116 W/kg, dördüncü güç kademesinde 6.52127 W/kg, beşinci güç kademesinde 8.08375 W/kg, altıncı güç kademesinde 8.09238 W/kg değerleri elde edilmiştir. Altı farklı güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav’ın deri dokusunda yapılan SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri Şekil 7.13’te verilmiştir.



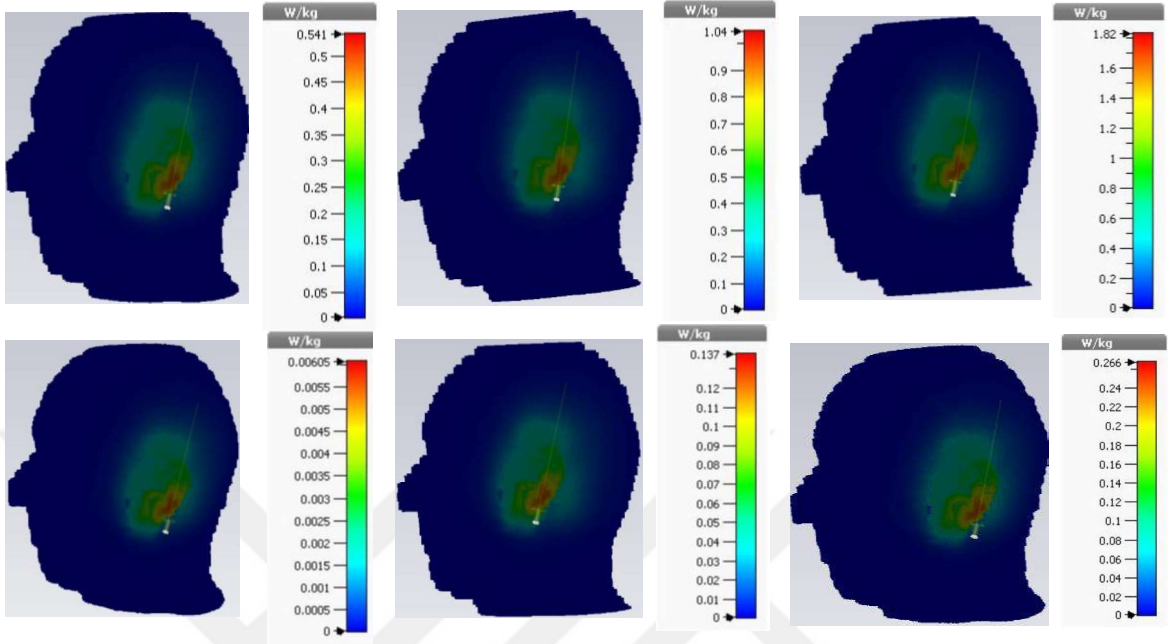
Şekil 7.13. 1800 MHz’de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate almayarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz’de, altı farklı güç kademesinde ve buna bağlı olarak oluşturulan altı farklı elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınmaksızın, en yüksek SAR (10 gr) değerinin beklendiği üzere altıncı güç kademesinde, en düşük SAR (10 gr) değerinin ise birinci güç kademesinde olduğu gözlemlenmiştir.

7.7. Altı Farklı Güç Değerinde Diğer Dokuların Etkisi Dikkate Alınarak Gustav Deri Dokusunda SAR Değerleri

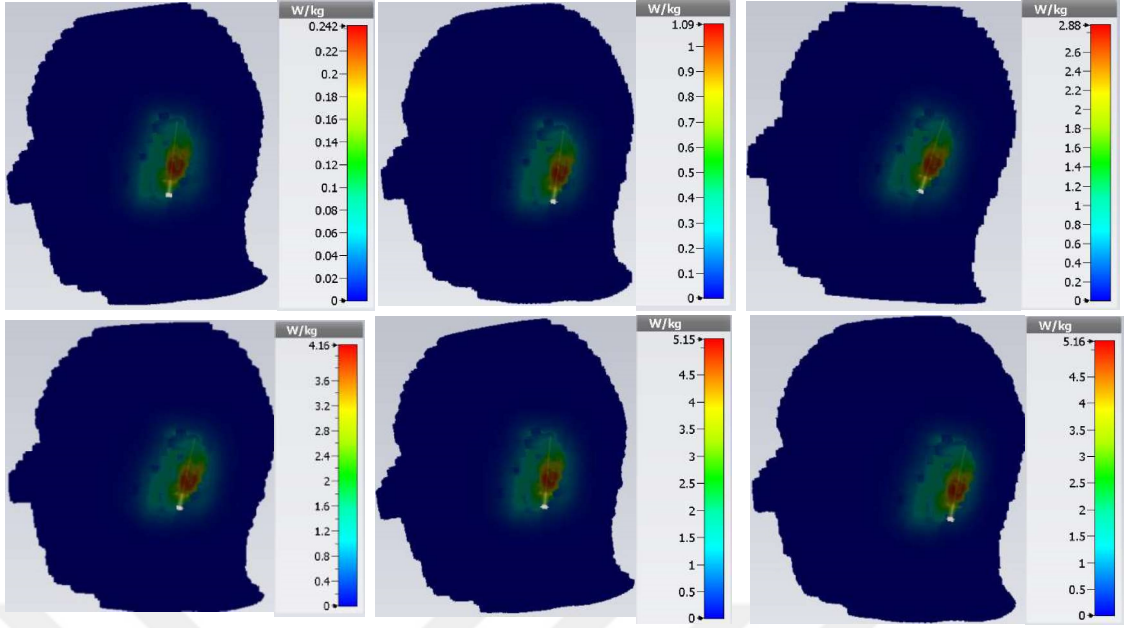
SAR Laboratuvarında 900 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici Çizelge 7.1’de verilen güç değerlerindeyken elde edilen SAR (10 gr) değerleri; simülasyon ortamında monopul antenin güç değeri sırasıyla 0.000942214 W, 0.0213997 W, 0.041472 W, 0.0841997 W, 0.16245 W, 0.283881 W değerlerine ayarlandığında, SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerlerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinden Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında bu insan modelinde bulunan deri dokusunda oluşan SAR değerleri, diğer dokuların etkisi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi dikkate alındığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin deri dokusunda birinci güç kademesinde 0.0054 W/kg, ikinci güç kademesinde 0.124 W/kg, üçüncü güç kademesinde 0.242 W/kg, dördüncü güç kademesinde 0.491 W/kg, beşinci güç kademesinde 0.948 W/kg, altıncı

güç kademesinde 1.6565 W/kg değerleri elde edilmiştir. Altı farklı güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav'ın deri dokusunda yapılan SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri Şekil 7.14'de verilmiştir.



Şekil 7.14. 900 MHz'de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate alınarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

SAR Laboratuvarında 1800 MHz için kullanılan GSM Sinyal Üretici Çizelge 7.2'de verilen güç değerlerindeyken elde edilen SAR (10 gr) değerleri; simülasyon ortamında monopul antenin güç değeri sırasıyla 0,0131869 W, 0,059168 W, 0,1568 W, 0,226646 W, 0,28095 W, 0,28125W değerlerine ayarlandığında, SAM üzerinde yaklaşık olarak elde edilmiştir. Bu güç değerlerinde SAM, hesaplamalı insan modellerinden Gustav hesaplamalı insan modelinin kafa bölgesiyle değiştirilmiş ve sonrasında bu insan modelinde bulunan deri dokusunda oluşan SAR değerleri, diğer dokuların etkisi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Diğer dokuların etkisi dikkate alındığında 10 gr doku için ortalama SAR değerleri: yetişkin bir erkeği temsil eden Gustav hesaplamalı insan modelinin deri dokusunda birinci güç kademesinde 0.242W/kg, ikinci güç kademesinde 1.08 W/kg, üçüncü güç kademesinde 2.88 W/kg, dördüncü güç kademesinde 4.16 W/kg, beşinci güç kademesinde 5.15 W/kg, altıncı güç kademesinde 5.16 W/kg değerleri elde edilmiştir. Altı farklı güç değerinde, CST STUDIO SUITE programında, hesaplamalı insan modellerinden Gustav'ın deri dokusunda yapılan SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri Şekil 7.15'de verilmiştir.



Şekil 7.15. 1800 MHz’de ve altı farklı güç değerinde diğer dokuların etkisini dikkate alınarak yapılan, Gustav hesaplamalı insan modelinde bulunan deri dokusunda, SAR (10 gr) hesaplama görüntüleri

Yukarıda verilen SAR (10 gr) değerlerinden yola çıkılarak, 900 MHz ve 1800 MHz’de, altı farklı güç kademesinde ve buna bağlı olarak oluşturulan altı farklı elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi dikkate alındığında, en yüksek SAR (10 gr) değerinin beklendiği üzere altıncı güç kademesinde, en düşük SAR (10 gr) değerinin ise birinci güç kademesinde olduğu gözlemlenmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, baz istasyonlarından kaynaklı elektrik alan değerlerinin, insan kafasına ve kafasında bulunan dokulara olası etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda, ilk olarak 900 MHz ve 1800 MHz de çalışan iki farklı GSM Sinyal Üretici yardımıyla, bu frekanslarda elektrik alan yayan baz istasyonları temsil edilmiştir. Sonrasında standartlara uygun olarak hizmet veren BTK PGM SAR Laboratuvarında bu cihazlar için altı farklı güçte SAR ölçümü yapılmıştır. Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de verilen bu güç değerlerinden, ilk güç değeri, BTK tarafından belirlenen, ortam ve tek bir cihaz için belirlenen sınır değerlerin altındaki elektrik alan değerini temsil ederken, diğer beş güç değerleri BTK’nın belirlediği standartların üzerindeki elektrik alan değerlerini temsil etmektedir.

SAR Laboratuvarında, altı farklı güç ve buna bağlı olarak oluşan altı farklı elektrik alan değerinde yapılan ölçümlerin, CST STUDIO SUITE programında SAR (10 gr) değerleri referans alınarak ve SAM kullanılarak bezeşiği oluşturulmuştur. Bu işlemin başarıyla tamamlanmasının ardından SAM, hesaplamalı insan modellerinin kafa bölgesiyle değiştirilerek, BTK standartlarının belirlediği sınırların altında ve üstünde gerçek bir insan kafasında doğabilecek olası etkiler, ayrıntılı SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) değerleri hesaplanarak incelenmiştir.

İnsan modeli olarak, CST hesaplamalı insan modeli ailesinden Gustav, Laura, Child ve Baby seçilerek olası etkiler yetişkin erkek, yetişkin kadın, çocuk ve bebek olmak üzere, farklı yaş, boy, cinsiyet ve kilodaki insan modellerinde incelenmiştir. CST programı kullanılarak yapılan SAR hesaplamaları belirtilen insan modellerinin kafa bölgesinde vücuttan ayrı olarak yapılmıştır.

Kullanılan bu insan modellerinin kafa bölgesinde bulunan beyin, yağ, kas, göz ve deri dokuları ayrı ayrı SAR incelemesine tabi tutulmuştur. Bu dokularda SAR hesabı hem diğer dokuların SAR değerine etkisini ihmal ederek hem de diğer dokuların da dokuda oluşacak SAR değerine etkisini hesaba katarak yapılmıştır. Bu doğrultuda diğer dokuların etkisinin ihmal edildiği yapılan ilk hesaplamalarda, hedef doku haricindeki tüm dokular silinerek SAR değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında ise diğer dokular ‘gizle’ komutuyla gizlenerek diğer dokuların da etkisi hesaba katılarak hedef dokuda SAR hesaplaması yapılmıştır.

CST STUDIO SUITE programı, 100 MHz ve 900 MHz olmak üzere yalnızca iki farklı frekans değerinde dielektrik özelliklere sahip, hesaplamalı insan modelleri sunmaktadır. 900 MHz de yapılan SAR hesaplamalarında 900 MHz için hazır olarak sunulan hesaplamalı insan modelleri kullanılmıştır. 1800 MHz de yapılan ölçümlerde ise; ϵ ve σ değerleri, hesaplamalı insan modellerinin kafasında bulunan tüm dokularda değiştirilerek SAR hesaplaması yapılmıştır. 100 MHz’de seçilen bir dokunun dielektrik özellikleri 900 MHz’e göre değiştirilip, 900 MHz de bu doku için yapılan SAR hesaplamasıyla karşılaştırılarak yaklaşık olarak aynı sonucun elde edildiği görülmüştür. Bu sağlamayla birlikte CST STUDIO programında dokuların dielektrik özelliklerinin değiştirilerek istenilen frekansta SAR hesabı yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm SAR hesaplamalarından çıkartılan bazı sonuçları şu şekilde sıralayabiliriz. 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit 13.7532 V/m lik ve 35.50 V/m elektrik alan değerlerinde, en yüksek etki yetişkin erkeklerde oluşurken en düşük etki bebeklerde oluşmaktadır.

900 MHz ve 1800 MHz’de, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit 13.7532 V/m lik ve 35.50 V/m elektrik alan değerlerinde, diğer dokuların etkisi ihmal edildiğinde beyin dokularından, çocuk beyin dokusunda en yüksek etki oluşurken en düşük etki yetişkin erkek bireyin beyin dokusunda oluşmaktadır. Diğer dokuların etkisi dikkate alındığında 900 MHz’de beyin dokularından, bebek beyin dokusunda en yüksek etki oluşurken, yetişkin kadın beyin dokusunda en düşük etkinin olduğu gözlemlenmiştir. 1800 MHz’de ise beyin dokularından, çocuk beyin dokusunda en yüksek, yetişkin kadın beyin dokusunda en düşük etkinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan değerlerinden frekans değerinin de insanlar üzerindeki elektrik alan etki sıralamasını değiştirebileceği sonucuna varılmıştır.

İki farklı frekansta, sabit güç ve buna bağlı olarak oluşturulan sabit 13.7532 V/m lik ve 35.50 V/m elektrik alan değerlerinde, diğer dokuların etkisi ihmal edildiğinde 900 MHz’de yetişkin erkek bireyin deri dokusunda en yüksek, yağ dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir. 1800 MHz’de ise yetişkin erkek bireyin deri dokusunda en yüksek, göz dokusunda ise en düşük etkinin olduğu gözlemlenmiştir. Yine bu frekans ve elektrik alan değerlerinde, diğer dokuların etkisi dikkate alındığında ise 900 MHz’de yetişkin erkeğin deri dokusunda en yüksek, göz

dokusunda ise en düşük etkinin olduğu gözlemlenmiştir. 1800 MHz’de yetişkin erkeğin deri dokusunda en yüksek, göz dokusunda ise en düşük SAR değerinin olduğu gözlemlenmiştir. Buradan, dokularda oluşan elektrik alan etkisinde, kafada bulunan diğer dokuların da etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

İki farklı frekansta, altı farklı güç kademesinde ve buna bağlı olarak oluşturulan Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de verilen altı farklı elektrik alan değerinde, diğer dokuların etkisi dikkate alınmaksızın, yetişkin erkeğin deri dokusunda en yüksek etkinin altıncı güç kademesinde, en düşük etkinin ise birinci güç kademesinde olduğu gözlemlenmiştir. Diğer dokuların etkisi dikkate alındığında da en yüksek etkinin altıncı güç kademesinde, en düşük etkinin ise birinci güç kademesinde olduğu gözlemlenmiştir. Buradan, gücün ve buna bağlı olarak elektrik alan değerinin arttığında dokudaki etkinin de buna bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışması için; elektrik alan etkisinde dokuların birbirlerini etkilemesi ihmal edildiğinde, iki farklı frekansta, dört farklı insan modelinde, beş farklı doku ve tüm kafada, altı farklı güç değerinde, SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) olmak üzere 576 farklı etki incelenmiştir. Elektrik alan etkisinde dokuların birbirlerine olan etkisi hesaba katılarak, iki farklı frekansta, dört farklı insan modelinde, beş farklı doku, altı farklı güç değerinde, SAR (10 gr) ve SAR (1 gr) olmak üzere 320 farklı etki incelenmiştir. Örgü (mesh) boyutlarından dolayı, göz dokusunun SAR (10 gr) değerinin hesaplanamaması gibi durumları hesaba kattığımızda yaklaşık olarak 890 farklı etkiyi içeren bir veritabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanından farklı güç, frekans, doku ve bireylerde elektrik alan etkisi rahatlıkla karşılaştırılıp yukarıda verilen sonuçlar geliştirilebilir.

Yukarıdaki sonuçlardan anlaşılacağı gibi yapılan bu tez çalışmasında ana hedef; herhangi bir canlı denek veya kadavra kullanmaksızın baz istasyonlarının insan üzerindeki etkisini hesaplamalı insan modelleri üzerinden incelemektir. Oluşturulan veritabanı sayesinde, herhangi bir ortamda farklı elektrik alan değerlerine maruz kalınması durumunda, oluşacak etki rahatlıkla öngörülebilir.

Bu çalışmada kullanılan insan modeli sayısı artırılarak, toplumda bulunan daha fazla birey temsil edilebilir ve çalışılan iki farklı frekans değerinin haricinde başka frekans değerlerinde de elektrik alan etkisi incelenebilir. Bunun yanında kan dokusu, kemik dokusu, tiroid bezi gibi farklı bölgelerde de SAR incelemesi yapılarak elektrik

alan etkisi daha da ayrıntılandırılabilir. Ayrıca yalnızca kafa bölgesine etkinin incelendiği bu çalışma kapsamında yapılan laboratuvar ölçümleri ve simülasyonlar vücut için tekrarlanarak baz istasyonlarının vücuda olan etkisi de incelenebilir. Ölçümlerde tam güçte çalışan gerçek bir baz istasyonu kullanılabilir ve laboratuvar ortamında uzak alan SAR ölçümü yapılabilmesi için bir düzenek hazırlanabilir.



KAYNAKLAR

- Abbasi, M. A. B., Nikolaou, S. S., Antoniadis, M. A., Stevanović, M. N., and Vryonides, P. 2017. Compact EBG-backed planar monopole for BAN wearable applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(2), 453-463.
- Adair, E. R., and Petersen, R. C. 2002. Biological effects of radiofrequency/microwave radiation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 953-962.
- Agarwal, K., Guo, Y. X., and Salam, B. 2016. Wearable AMC backed near-endfire antenna for on-body communications on latex substrate. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 6(3), 346-358.
- Alcaras, A., and Frere, J. 2017, September. Thermal risks due to land vehicle radioelectric exposure: Results of Thales research and study for military purpose. In *Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE, 2017 International Symposium on* (pp. 1-7). IEEE.
- Anonymous, 1966 USAS C95.1-1966, Safety Level of Electromagnetic Radiation With Respect to Personnel, United States of America Standards Institute, New York, NY
- Anonymous, 1974 ANSI C95.1-1974, Safety Level of Electromagnetic Radiation With Respect to Personnel, American National Standards Institute, New York, NY
- Anonymous, 1981 NCRP, Radiofrequency Electromagnetic Fields Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction, and Measurements NCRP Report no. 67, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Anonymous, 1982 ANSI C95.1-1982, American National Standard Safety Levels with respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300 kHz to 100 GHz, American National Standards Institute, New York, NY
- Anonymous, 1986 NCRP, Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields. Bethesda: NCRP Report no. 86, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 1986
- Anonymous, 1991 IEEE C95.1-1991, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields 3 kHz to 300 GHz, IEEE New York, NY
- Anonymous 1999a, EC, Council Recommendation 1999/519/EC, July 1999 <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9509b04f-1df0-4221-bfa2-c7af77975556/language-en> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 1999b, EC, 1999/5/EC RveTTE Directive <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0005> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous, 2005a. IEEE, International Committee on Electromagnetic Safety Safety, Status Report, WHO IAC Meeting, 13-14 June, 2005 https://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/ices_iac2005.pdf?ua=1 (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous, 2005b. IEEE C95.1-2005, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields 3 kHz to 300 GHz, IEEE New York, NY

Anonymous, 2006. C-K.Chou N IEEE C95.1-2005 Rf Safety Standard" presentation, Lima, Peru, 19 June 2006 <https://slideplayer.com/slide/6224270/> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous, 2007. Bioinitiative, The Existing Public Exposure Standards http://www.bioinitiative.org/report/wp-content/uploads/pdfs/sec03_2007_Existing_Public_Exposure_Standards.pdf (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous 2008. Inter-American Telecommunication Commission, Update on international activities related to SAR and RF evaluations, 2008 http://www.oas.org/en/citel/infocitel/2008/noviembre/sar_i.asp (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2017a. IEEE 62704-1-2017 - IEC/IEEE International Standard for Determining the Peak Spatial Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body from Wireless Communications Devices, 30 MHz - 6 GHz. Part 1: General Requirements for using the Finite Difference Time Domain (FDTD) Method for SAR Calculations <https://standards.ieee.org/standard/62704-1-2017.html> (Erişim Tarihi 3.1.2019)

Anonim 2017b. IEEE 62704-1-2017 - IEC/IEEE International Standard for Determining the Peak Spatial Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body from Wireless Communications Devices, 30 MHz - 6 GHz. Part 1: General Requirements for using the Finite Difference Time Domain (FDTD) Method for SAR Calculations <https://standards.ieee.org/standard/62704-1-2017.html> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous, 2019a. Wikipedia, Özgöl Emilim Oranı https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%96zg%C3%BCl_emilim_oran%C4%B1 (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous, 2019b. Nonionising Radiation (Chapter 3) <http://mragheb.com/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Nonionizing%20Radiation.pdf> (4.2.2019)

Anonim, 2019c. TS EN 50361, Mobil Telefonlardan Yayılan Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalan İnsanla İlgili Özgöl Soğurma Oraninin Ölçölmesi İçin

Temel Standard (300 mhz - 3 ghz),
<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073082113049067104075088117116117116> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous, 2019d. OET SupplementC, FCC
<https://fccid.io/GZ5TERNUSB1/RF-Exposure-Info/SAR-report-1-1166504.pdf>
(Erişim tarihi:4.02.2019)

Anonymous, 2019e. CST STUDIO SUITE <https://www.cst.com/products/csts2>
(Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous, 2019f Clearwire, Evaluation Of Compliance With Guidelines For Human Exposure To Radio Frequency Radiation
<https://planningdocuments.saccounty.net/DocOpen.aspx?PDCID=9653> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous, 2019g FCC, Radiofrequency Safety <https://www.fcc.gov/general/radio-frequency-safety-0> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous, 2019h. The Office of Engineering and Technology(OET), FCC
<https://www.fcc.gov/general/office-engineering-and-technology-oet-organization-chart> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous 2019ı <https://webstore.iec.ch/publication/6590> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous 2019i <https://webstore.iec.ch/publication/28673> (Erişim tarihi:3.01.2019)

Anonymous 2019j <https://webstore.iec.ch/publication/25336> (Erişim Tarihi 3.01.2019)

Anonymous 2019k, CENELEC, Standards Numbering
https://www.cenelec.eu/faq/faq_entry.htm (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019l CENELEC - EN 50383 Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz - 40 GHz)
<https://standards.globalspec.com/std/1616738/en-50383> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019m, TS EN 50383, Telsiz haberleşme sistemleri için (110 mhz-40 ghz) radyo baz istasyonlarından ve sabit terminal istasyonlarından kaynaklanan insan maruziyetine ilişkin sar değeri ile elektromanyetik alan şiddetinin ölçülmesi ve hesaplanması için temel standard
<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073089108054075082043107111115056119> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019n. IEEE International Committee on Electromagnetic Safety.
<https://www.ices-emfsafety.org/> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019o. <https://standards.ieee.org/standard/1528-2013.html> (Erişim Tarihi 3.01.2019)

Anonymous 2019ö, <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073097121105049098090115106100083121> (Erişim Tarihi 3.01.2019)

Anonymous 2019p, TS EN 50360, 300 MHz'ten 6 GHz'e kadar olan frekans aralığında insanın elektromanyetik alanlara maruz kalması ile ilgili temel kısıtlamalar ve maruz kalma sınır değerleri ile telsiz iletişim elemanlarının uygunluğunu göstermek için ürün standardı: Kulağa yakın/bitişik olarak kullanılan elemanlar <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073083049043081053049048116075115054> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019r, Triton X-100 https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/x100?lang=en®ion=TR&gclid=EAIaIQobChMI8JC7gd2h4AIVg-FRCh3TaQAXEAAAYASAAEgKzLfD_BwE (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019s, J.T.Baker, DGBE <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?term=112-34-5&interface=CAS%20No.&N=0&mode=partialmax&lang=en®ion=TR&focus=product> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2019t, J.T.Baker, propanediol <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?term=57-55-6&interface=CAS%20No.&N=0&mode=partialmax&lang=en®ion=TR&focus=product> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonymous 2010 a,b,c,d,e,f TS EN 62209-1, Elde tutulan ve vücuda takılan telsiz haberleşme cihazlarından kaynaklanan radyo frekans alanlarına insanların maruz kalması - İnsan modelleri, ölçme cihazları ve işlemler - Bölüm 1: Kulağa çok yakın kullanılan ve elde tutulan cihazlar için özgül soğurma oranının (sar) belirlenmesi için işlem (300 mhz - 3 ghz frekans aralığı) <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073097121105049098090115106100083121> (Erişim tarihi:4.2.2019)

Anonim 2019u <https://www.btk.gov.tr/uploads/boarddecisions/yonetmelik-degisikligi/117-12-yonetmelik-degisikligi-12-04-2018.pdf> (Erişim tarihi:4.2.2019)

- Anonymous 2019y. The visible human project
https://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html (Erişim tarihi: 4.2.2019)
- Anonymous 2019v. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php> (Erişim Tarihi:3.01.2019)
- Anonymous 2019ü. <https://www.fcc.gov/general/body-tissue-dielectric-parameters> (Erişim Tarihi:31.01.2019)
- El Amrani, L., Mazri, T., and Hmina, N. 2017, November. Electric field and specific absorption rate on human approach at point and in whole geographical area. In *Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), 2017 International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Arduino, A., Zilberti, L., Chiampi, M., and Bottauscio, O. 2017. CSI-EPT in presence of RF-shield for MR-coils. *IEEE transactions on medical imaging*, 36(7), 1396-1404.
- Atilgan, E., Coskun, O., and Comlekci, S. 2015. Experimental finding of temperature rise and SAR values created by 900 MHz-1800 MHz-2450 MHz electromagnetic radiation on human brain tissue. *OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS-RAPID COMMUNICATIONS*, 9(9-10), 1224-1229.
- Bahrani, H., Mirbozorgi, S. A., Ameli, R., Rusch, L. A., and Gosselin, B. 2016. Flexible, polarization-diverse UWB antennas for implantable neural recording systems. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 10(1), 38-48.
- Bakogianni, S., and Koulouridis, S. 2016, April. Design of a novel miniature implantable rectenna for in-body medical devices power support. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 10th European Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Bakogianni, S., and Koulouridis, S. 2016. An implantable planar dipole antenna for wireless medradio-band biotelemetry devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 234-237.
- Björninen, T., and Yang, F. 2016. Low-profile head-worn antenna with a monopole-like radiation pattern. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 15, 794-797.
- Campi, T., Cruciani, S., Maradei, F., and Feliziani, M. 2017. Near-field reduction in a wireless power transfer system using LCC compensation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(2), 686-694.
- Can, S., and Yılmaz, A. E. 2016. Reduction of specific absorption rate with artificial magnetic conductors. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 26(4), 349-354.

- Caon, M. (2004). Voxel-based computational models of real human anatomy: a review. *Radiation and environmental biophysics*, 42(4), 229-235.
- Chamma, W., and Kashyap, S. 2002, July. Radio frequency specific absorption rate inside a human body due to a manpack radio. In *Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 2002. ANTEM 2002. 9th International Symposium on (pp. 1-7). IEEE.
- Chen, C. 2017, October. The research on shielding effectiveness measurement for electromagnetic shielding garments. In *Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE)*, 2017 7th IEEE International Symposium on (pp. 336-340). IEEE.
- Cheng, X., and Monebhurrin, V. 2017. Application of Different Methods to Quantify Uncertainty in Specific Absorption Rate Calculation Using a CAD-Based Mobile Phone Model. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(1), 14-23.
- Chrissoulidis, D. P., and Laheurte, J. M. 2016. Radiation from an encapsulated Hertz dipole implanted in a human torso model. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(12), 4984-4992.
- Chung, M. A., and Yang, C. F. 2016. Built-in antenna design for 2.4 GHz ISM band and GPS operations in a wrist-worn wireless communication device. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 10(12), 1285-1291.
- Cihangir, A., Panagamuwa, C. J., Whittow, W. G., Jacquemod, G., Giancesello, F., Pilard, R., and Luxey, C. 2017. Dual-band 4G eyewear antenna and SAR implications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(4), 2085-2089.
- Clemens, M., and Weiland, T. 2001. Discrete Electromagnetism With the Finite Integration Technique-Abstract. *Journal of electromagnetic waves and applications*, 15(1), 79-80.
- Cobianu, C., Fidel, N., Stan, M. F., and Husu, A. G. 2016, June. Case study concerning to the radiation levels emitted by mobile phones on the human body. In *Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2016 8th International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- Dagheyay, A. G., Molaei, A., Obermeier, R., and Martinez-Lorenzo, J. 2016, August. Preliminary imaging results and SAR analysis of a microwave imaging system for early breast cancer detection. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2016 IEEE 38th Annual International Conference of the (pp. 1066-1069). IEEE.
- Das, R., and Yoo, H. 2017. A multiband antenna associating wireless monitoring and nonleaky wireless power transfer system for biomedical implants. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(7), 2485-2495.

- Ferreira, M., Oliveira, C., Cardoso, F., and Correia, L. M. 2016, April. SAR assessment of google glasses at cellular wireless frequency bands. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 10th European Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Foster, K. R., and Chou, C. K. 2016. Response to “Children Absorb Higher Doses of Radio Frequency Electromagnetic Radiation From Mobile Phones Than Adults” and “Yes the Children Are More Exposed to Radiofrequency Energy From Mobile Telephones Than Adults”. *IEEE Access*, 4, 5322-5326.
- Frere, J., Alcaras, A., Zhadobov, M., Lemoine, C., Le Cadre, G., and Sauleau, R. 2017, March. Evaluation of currents induced in human body by plane wave exposure at 1–90 MHz. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2017 11th European Conference on* (pp. 3614-3618). IEEE.
- Gabriel, C. 1996. Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies. KING'S COLL LONDON (UNITED KINGDOM) DEPT OF PHYSICS.
- Gil, I., and Fernández-García, R. 2017, March. SAR impact evaluation on jeans wearable antennas. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2017 11th European Conference on* (pp. 2187-2190). IEEE.
- Gong, Y., Capstick, M. H., Kuehn, S., Wilson, P. F., Ladbury, J. M., Koepke, G., ... and Kuster, N. 2017. Life-Time Dosimetric Assessment for Mice and Rats Exposed in Reverberation Chambers for the Two-Year NTP Cancer Bioassay Study on Cell Phone Radiation. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 59(6), 1798-1808.
- Guo, R., Chen, M., Zheng, J., Yang, R., Chen, J., and Kainz, W. 2017, August. Comparison of in-vivo and in-vitro MRI RF heating for orthopedic implant at 3 tesla. In *Electromagnetic Compatibility and Signal/Power Integrity (EMCSI), 2017 IEEE International Symposium on* (pp. 123-128). IEEE.
- Han, K., Swaminathan, M., Pulugurtha, R., Sharma, H., Tummala, R., Yang, S., and Nair, V. 2016. Magneto-dielectric nanocomposite for antenna miniaturization and SAR reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 72-75.
- Herman, G., and Udupa, J. 1983. Display of 3-D digital images: Computational foundations and medical applications. *IEEE Computer Graphics and Applications*, (5), 39-46.
- Haridim, M. 2016. Use of rod reflectors for SAR reduction in human head. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(1), 40-46.
- Hong, S., Kang, S. H., Kim, Y., and Jung, C. W. 2016. Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(7), 2797-2804.

- Horváth, B., Horváth, P., Badics, Z., Pávó, J., and Csurgai-Horváth, L. 2016, April. Computational model validation of wireless devices for specific absorption rate evaluation. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 10th European Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Ibrahim, A., and Kiani, M. 2016. A figure-of-merit for design and optimization of inductive power transmission links for millimeter-sized biomedical implants. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 10(6), 1100-1111.
- il Kwak, S., Sim, D. U., Kwon, J. H., and Yoon, Y. J. 2017. Design of PIFA with metamaterials for body-SAR reduction in wearable applications. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 59(1), 297-300.
- Inum, R., Rana, M. M., and Quader, M. A. 2016, September. Modeling of an efficient microstrip patch antenna for microwave brain imaging system. In *Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), 2016 3rd International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Ishak N. I. A., Seman N., Kamarudin M. R. ve Samsuri N. A. 2017. Specific absorption rate investigation on multiple antennas. 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Oct. 30 2017-Nov. 2 2017, 1-2.
- Al Islam, N., Aleef, T. A., Arafat, U., and Islam, A. J. 2016, May. Design improvement and performance comparison of an existing slot dipole bendable antenna for biomedical applications. In *2016 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)* (pp. 508-512). IEEE.
- Jegadeesan R, Agarwal K, Guo Y-X, Yen S-C ve Thakor N V (2017). Wireless power delivery to flexible subcutaneous implants using capacitive coupling. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(1): 280-292
- Jin, Y., Tak, J., and Choi, J. 2016, February. Broadband hybrid water antenna for ISM-band ingestible capsule endoscope systems. In *Antenna Technology (iWAT), 2016 International Workshop on* (pp. 82-85). IEEE.
- Kaka, A. O., and Toycan, M. 2016, May. Dual band implant antenna design with miniaturized and biocompatible characteristics for wireless health monitoring. In *Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), 2016 24th* (pp. 1725-1728). IEEE.
- Kazemipour, A., Kleine-Ostmann, T., Schrader, T., Allal, D., Charles, M., Zilberti, L., ... and Chiampi, M. 2016. Safety checkpoints. *IEEE Microwave Magazine*, 17(6), 76-81.
- Khan, H. A., Ullah, S., Afridi, M. A., and Saleem, S. 2016, January. Patch antenna using EBG structure for ISM band wearable applications. In *Intelligent Systems Engineering (ICISE), 2016 International Conference on* (pp. 157-160). IEEE.
- Khan, M. W. A., Björninen, T., Sydänheimo, L., and Ukkonen, L. 2016. Characterization of two-turns external loop antenna with magnetic core for

efficient wireless powering of cortical implants. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 15(4), 1410-1413.

Khattak, M. K., and Kahng, S. 2016, August. Thin AMC-backed printed loop antenna for ISM band with improved antenna performance and lower SAR. In *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)* (pp. 1227-1230). IEEE.

Koga, Y., Kai, M., Fujieda, K., and Egawa, H. 2016, September. Design of a low SAR multiband antenna for mobile applications. In *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2016 IEEE-APS Topical Conference on (pp. 47-50). IEEE.

Koga, Y., Kai, M., Fujieda, K., and Egawa, H. 2016, June. Low-SAR multiband antenna with ground slit and parasitic elements for tablet computers. In *Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016 IEEE International Symposium on (pp. 449-450). IEEE.

Koohestani, M., Zhadobov, M., and Ettorre, M. 2017. Design methodology of a printed WPT system for HF-band mid-range applications considering human safety regulations. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, 65(1), 270-279.

Kopanoglu, E., Yilmaz, U., Gokhalk, Y., and Atalar, E. 2013. Specific absorption rate reduction using nonlinear gradient fields. *Magnetic resonance in medicine*, 70(2), 537-546.

Kordzadeh, A., and De Zanche, N. 2017. Control of mutual coupling in high-field MRI transmit arrays in the presence of high-permittivity liners. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(9), 3485-3491.

Koulouridis, S., Bakogianni, S., Diet, A., Le Bihan, Y., and Pichon, L. 2016, June. Investigation of efficient wireless charging for deep implanted medical devices. In *Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016 IEEE International Symposium on (pp. 1045-1046). IEEE.

Kozlov, M., Bazin, P. L., Möller, H. E., and Weiskopf, N. 2016, April. Influence of cerebrospinal fluid on specific absorption rate generated by 300 MHz MRI transmit array. In *Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016 10th European Conference on (pp. 1-5). IEEE.

Krayni, A., Hadjem, A., Sibille, A., Roblin, C., and Wiart, J. 2016. A novel methodology to evaluate uplink exposure by personal devices in wireless networks. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(3), 896-906.

Lin S. Y. and Chen M. H. 2017. WWAN antenna for handset application. 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), 8-10 March 2017, 372-373.

- Liu, J., Van de Moortele, P. F., Zhang, X., Wang, Y., and He, B. 2016. Simultaneous Quantitative Imaging of Electrical Properties and Proton Density From B_1 Maps Using MRI. *IEEE transactions on medical imaging*, 35(9), 2064-2073.
- Liu, X., Di, Y., Liu, H., Wu, Z., and Tentzeris, M. M. 2016. A planar windmill-like broadband antenna equipped with artificial magnetic conductor for off-body communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 64-67.
- Liu, X. Y., Wu, Z. T., Fan, Y., and Tentzeris, E. M. 2017. A miniaturized CSRR loaded wide-beamwidth circularly polarized implantable antenna for subcutaneous real-time glucose monitoring. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 577-580.
- Liu, Z., Zhong, Z., and Guo, Y. X. 2017. In vivo high-efficiency wireless power transfer with multisine excitation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(9), 3530-3540.
- Makarov, S. N., Noetscher, G. M., Yanamadala, J., Piazza, M. W., Louie, S., Prokop, A., ... and Nummenmaa, A. 2017. Virtual Human Models for Electromagnetic Studies and Their Applications. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 10, 95-121.
- Manoufali, M., Abbosh, A., and Bialkowski, K. 2016, December. Compact meander tapered patch antenna for wireless biomedical telemetry. In *Microwave Conference (APMC), 2016 Asia-Pacific* (pp. 1-3). IEEE.
- Manoufali, M., Abbosh, A., and Bialkowski, K. 2016, December. Design of a miniaturized circular implantable antenna. In *Microwave Conference (APMC), 2016 Asia-Pacific* (pp. 1-4). IEEE.
- Martínez-Vázquez, M., Simon, W., Stavrou, E., and Savaidis, S. P. 2016, April. Evaluation of human exposure to an HPM pulsed signal in the near field of a horn antenna. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 10th European Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Masumnia-Bisheh, K., Ghaffari-Miab, M., and Zakeri, B. 2017. Evaluation of different approximations for correlation coefficients in stochastic FDTD to estimate SAR variance in a human head model. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(2), 509-517.
- Meng, W., and Qian, L. 2018. MedFDTD: A Parallel and Open-Source Cross-Platform Framework for Bioelectromagnetics Field Simulation. *IEEE Access*, 6, 12940-12944.
- Miaskowski, A., Gas, P., and Krawczyk, A. 2016, September. SAR calculations for titanium bar-implant subjected to microwave radiation. In *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2016 17th International Conference* (pp. 1-4). IEEE.

- Ojaroudi, M., and Civi, Ö. A. 2016, June. High efficiency loop sleeve monopole antenna for array based UWB microwave imaging systems. In *Antennas and Propagation (APSURSI), 2016 IEEE International Symposium on* (pp. 1781-1782). IEEE.
- Ojerinde, O., Panagamuwa, C. J., Whittow, W. G., and Edwards, R. M. 2009, March. SAR variations in the face due to semi-rimmed spectacles and polarized sources at GSM900 and GSM1800. In *Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on* (pp. 2962-2966). IEEE.
- Okano, Y., Shimofusa, R., Anbai, M., and Someno, K. 2017. Broadband Measurement Methodology for Specific Absorption Rates Above 300 MHz. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(10), 2693-2702.
- Park, B. S., Razjouyan, A., Angelone, L. M., McCright, B., and Rajan, S. S. 2017. RF Safety Evaluation of a Breast Tissue Expander Device for MRI: Numerical Simulation and Experiment. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 59(5), 1390-1399.
- Petoussi-Henss, N., Zankl, M., Fill, U., and Regulla, D. 2001. The GSF family of voxel phantoms. *Physics in Medicine and Biology*, 47(1), 89.
- Rana, K. S. 2018, January. Contemporary work in energy harvesting and importance of radiation free future 5-G WCN. In *Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES), 2018 Conference on* (pp. 12-15). IEEE.
- Rashid, M. M. U., Sarkar, A. K., Paul, L. C., Bouazizi, A., Sen, R., and Podder, B. 2016, December. An investigation of SAR inside human heart for antenna directivity, surface current variations and effect on antenna frequency in presence of heart. In *Electrical, Computer and Telecommunication Engineering (ICECTE), International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Russo, A. A., Valeri, S., Baccani, G., Delia, F., and Delia, R. 2016, May. SAR measurement and distribution in defined body volumes through the development of MRI phantoms. In *Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2016 IEEE International Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.
- Safari, M., and Abdolali, A. 2016. Dental implants and mobile-phone use. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 58(5), 43-51.
- Schuhmann, R., and Weiland, T. 2001. Conservation of Discrete Energy and Related Laws in the Finite Integration Technique-Abstract. *Journal of electromagnetic waves and applications*, 15(4), 477-478.
- Simakov A., Onishchenko E., Gurkovskiy B., Butuzov V., Bocharov Y., Vodokhlebov I., . . . Trifonova N. 2017. Microwave dosimeters for domestic use. 2017 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), 24-25 July 2017, 1-4.

- Soltani, N., Aliroteh, M. S., Salam, M. T., Velazquez, J. L. P., and Genov, R. 2016. Low-radiation cellular inductive powering of rodent wireless brain interfaces: Methodology and design guide. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 10(4), 920-932.
- Song, Y., Song, K., Wu, X., Huang, Z., Kuang, X., and Zhu, Y. 2017, October. A high efficiency wireless charging antenna with embedded magnetic core of segmented two-turns loop. In *Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), 2017 7th IEEE International Symposium on* (pp. 100-102). IEEE.
- Sorgucu, U., Develi, I., and Ozen, S. 2015. How to prepare head tissue-equivalent liquids for SAR calculations, dosimetry and hyperthermia researches at 900 and 1800 MHz GSM frequencies. *Radiation protection dosimetry*, 168(3), 365-373.
- Stoecklin, S., Yousaf, A., Volk, T., and Reindl, L. M. 2016. Efficient Wireless Powering of Biomedical Sensor Systems for Multichannel Brain Implants. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 65(4), 754-764.
- Takei, R., Nagaoka, T., Saito, K., Watanabe, S., and Takahashi, M. 2017. SAR variation due to exposure from a smartphone held at various positions near the torso. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(2), 747-753.
- Tang, M. C., Shi, T., and Ziolkowski, R. W. 2017, October. A 28-GHz, multi-layered, circularly polarized, electrically small, Huygens source antenna. In *Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing), 2017 IEEE 5th International Symposium on* (pp. 1-3). IEEE.
- Tang, M. C., Shi, T., and Ziolkowski, R. W. 2017. A Study of 28 GHz, Planar, multilayered, electrically small, broadside radiating, huygens source antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6345-6354.
- Thoma, P., and Weiland, T. 1996. A consistent subgridding scheme for the finite difference time domain method. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 9(5), 359-374.
- Trajkovikj, J., and Skrivervik, A. K. 2016, April. Comparison of SAR of UHF wearable antennas. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 10th European Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Tsai, C. L., Chen, K. W., and Yang, C. L. 2016. Implantable Wideband Low-Specific-Absorption-Rate Antenna on a Thin Flexible Substrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 1048-1052.
- Van Rienen, U., and Weiland, T. 1986. Triangular discretization method for the evaluation of RF-fields in waveguides and cylindrically symmetric cavities. Part. *Accel.*, 20(DESY-86-004), 239.

- Vazquez, F. 2016, August. An insertable sensor for SAR quantification in 2.4 GHz wireless applications. In Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) (pp. 1422-1422). IEEE.
- Wang, H., Wang, Y., Wu, J., Chen, P., Wu, Z., and Yang, G. 2016. Small-size reconfigurable loop antenna for mobile phone applications. *IEEE Access*, 4, 5179-5186.
- Wang, M., Yang, Z., Wu, J., Bao, J., Liu, J., Cai, L., ... and Li, E. 2018. Investigation of SAR Reduction Using Flexible Antenna With Metamaterial Structure in Wireless Body Area Network. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(6), 3076-3086.
- Weiland, T. 1984. On the unique numerical solution of Maxwellian eigenvalue problems in three dimensions. Part. *Accel.*, 17(DESY-84-111), 227-242.
- Yan, S., and Vandenbosch, G. A. 2016. Radiation pattern-reconfigurable wearable antenna based on metamaterial structure. *IEEE Antennas and wireless propagation Letters*, 15, 1715-1718.
- Zankl, M., Petoussi-Henss, N., Fill, U., and Regulla, D. 2003. The application of voxel phantoms to the internal dosimetry of radionuclides. *Radiation protection dosimetry*, 105(1-4), 539-547.
- Zheng, Y. F., Sun, G. H., Huang, Q. K., Wong, S. W., and Zheng, L. S. 2016, February. Wearable PIFA antenna for smart glasses application. In *Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 2016 IEEE International Conference on (pp. 370-372). IEEE.
- Zhang, W., White, J. C., Malhan, R. K., and Mi, C. C. 2016. Loosely coupled transformer coil design to minimize EMF radiation in concerned areas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4779-4789.
- Zhao, K., Ying, Z., and He, S. 2016. EMF exposure study concerning mmWave phased array in mobile devices for 5G communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 1132-1135.
- Zhao, L., Ye, Q., Wu, K. L., Chen, G., and Yu, W. 2016. A New High-Resolution Electromagnetic Human Head Model: A useful resource for a new specific-absorption-rate assessment model. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 58(5), 32-42.
- Zheng, J., Li, D., Chen, J., and Kainz, W. 2016, July. Numerical study of SAR for multi-component orthopaedic hip replacement system during MRI. In *Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2016 IEEE International Symposium on (pp. 116-120). IEEE.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ahmet TURGUT

Doğum Yeri : Kırşehir

Doğum Tarihi : 20.06.1987

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise	Çağrıbey Anadolu Lisesi (2010)
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği (2013) Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği (2013)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği (2016-Halen)

Yayınlar

1. TURGUT AHMET, ÖZBİLGİN FERDİ,ÇAVUŞ BARIŞ (2017). Determination of the Success of the Raised Cosine Filter According to Modulation Types. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4069908)
2. TURGUT AHMET,KORUNUR ENGİZ BEGÜM (2017). SAR Estimation Due To Exposure from a Realistic Computational Smartphone. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4069779)
3. KURNAZ ÇETİN,KORUNUR ENGİZ BEGÜM,TURGUT AHMET (2017). Monitoring of the Change in Electric Field Strength Levels on Samsung Light

Rail System. The Fourth International EMC Conference (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3905638)

4. KURNAZ ÇETİN, KORUNUR ENGİZ BEGÜM, TURGUT AHMET (2017). Hastane Ortamında Maruz Kalınan Elektromanyetik Alan Seviyelerinin Belirlenmesi. International Engineering Research Symposium (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3905908)
5. ÖZBİLGİN FERDİ, TURGUT AHMET, AYVENLİ FATİH, DURMUŞ FATİH, ÇAVUŞ BARIŞ (2017). YÜKSELTİLMİŞ KOSİNÜS FİLTRESİNİN ROLLOFF FAKTÖRÜNE GÖRE BAŞARIMININ BELİRLENMESİ. International Engineering Research Symposium (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4070739)
6. KURNAZ ÇETİN, KORUNUR ENGİZ BEGÜM, TURGUT AHMET (2017). Monitoring of Long Term RF Radiation from Cellular Base Stations. Fifth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3906049)
7. KORUNUR ENGİZ BEGÜM, TURGUT AHMET, (2018). SAR Estimation Due To Exposure From A Realistic Computational 900 Mhz Operating Smartphone.
8. KORUNUR ENGİZ BEGÜM, TURGUT AHMET, (2018). SAR Estimation Due To Exposure From A Realistic Computational 1800 Mhz Operating Smartphone.
9. TURGUT AHMET, KORUNUR ENGİZ BEGÜM, (2018). SAR Evaluation Due To Exposure From Base Stations Operating At 900 MHz And 1800 MHz

Projeler

1. Elektrikli Araç İçin Mekanik Aksamların Geliştirilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı: TURGUT AHMET, Yürütücü: AKTAŞ, MUSTAFA, 18/03/2016 - 14/12/2017 (ULUSAL)