

T.C.
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOFİZİK ANA BİLİM DALI

**CEP TELEFONU MARUZİYETİ KAYNAKLI
RF DOZİMETRİNİN
FDTD YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ZAHİD TÜYSÜZ

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Ayşe CANSEVEN KURŞUN

ANKARA
Temmuz 2007

T.C.
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOFİZİK ANA BİLİM DALI

**CEP TELEFONU MARUZİYETİ KAYNAKLI
RF DOZİMETRİNİN
FDTD YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ZAHİD TÜYSÜZ

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Ayşe CANSEVEN KURŞUN

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
SBE-01/2006-22 nolu proje ile desteklenmiştir.

ANKARA
Temmuz 2007

T.C.
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Sağlık Bilimleri Enstitüsü

Biyofizik Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı
çerçevesinde yürütülmüş olan bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından
Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi : 20/07/2007

Prof. Dr. Nesrin SEYHAN
Gazi Üniversitesi
Jüri Başkanı



Doç. Dr. Gülay TÖHUMOĞLU
Gaziantep Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Ayşe CANSEVEN KURŞUN
Gazi Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR	vii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Tarihçe	5
2.2. Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri	7
2.2.1. Oldukça Düşük Frekanslı (ELF, 0-300Hz) Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri	7
2.2.2. Radyo Frekans ve Mikrodalga Alanların (3kHz-300GHz) Biyolojik Etkileri	10
2.3. RF Alanlar İle Biyolojik Dokuların Etkileşim Mekanizması	12
2.3.1. Termal Mekanizmalar	12
2.3.2. Termal Olmayan Mekanizmalar	13
2.3.3. Elektrik Alan Etkileri	15
2.3.4. Manyetik Alan Etkileri.....	17
2.4. Dozimetri	17
2.4.1. Temel RF Parametreleri.....	18
2.4.2. SAR Tanımı	19
2.4.3. Dokulardaki Enerji Absorbsiyonunu Belirleyen Faktörler	22
2.4.3.1. Dielektrik Özellikler.....	22
2.4.3.2. Doku Geometrisi ve Boyutu.....	23
2.4.3.3. Doku Yönelimi ve Alan Polarizasyonu.....	23
2.4.3.4. Alan Frekansı	24
2.4.3.5. Kaynak Konumu	25
2.4.3.6. Maruziyet Ortamı.....	25
2.4.3.7. Zaman ve Şiddet Faktörleri	26
2.5. Dokuların Dielektrik Özellikleri	27
2.5.1. Alfa Dispersiyonu	29
2.5.2. Beta Dispersiyonu	30
2.5.3. Gama Dispersiyonu	30
2.6. FDTD Yöntemi.....	32
2.6.1. Absorblayıcı Sınır Koşulları.....	45
2.6.2. Sayısal Kararlılık	46
2.7. Ulusal ve Uluslararası Standartlar	47
3. GEREÇ VE YÖNTEMLER.....	49
3.1. Gereçler.....	49
3.1.1. Donanım	49
3.1.1.1. Simülasyon Bilgisayarı	49
3.1.1.2. Donanım Tabanlı Simülasyon Hızlandırıcı Kart.....	50
3.1.2. Yazılım	50

3.1.2.1. Simülasyon Yazılımı.....	51
3.1.2.2. Fantom.....	52
3.2. Simülasyon Uygulamaları.....	53
3.2.1. Genel Mobil Telefon Modeli.....	54
3.2.2. Cep Telefonlarının Konumlandırılması.....	56
3.2.3. Simülasyonda Kullanılan Aksesuarlar.....	58
3.2.3.1. Küpe.....	58
3.2.3.2. Gözlük.....	59
3.2.4. Çocuk Kafa Modeli.....	60
3.2.5. Dielektrik Özellikler.....	61
3.2.6. Maruziyet Koşulları.....	62
3.2.6.1. SAM Fantom IEEE Simülasyonları için Gerçekleştirilen Maruziyet Koşulları.....	64
3.2.6.2. SAM Fantom Simülasyonları için Maruziyet Koşulları.....	65
3.2.6.3. Yetişkin Dielektrik Özellikli Çocuk SAM Fantom Simülasyonları için Maruziyet Koşulları.....	77
3.2.6.4. Çocuk Dielektrik Özellikli Çocuk SAM Fantom Simülasyonları için Maruziyet Koşulları.....	84
4. BULGULAR.....	91
4.1. SAM Fantom IEEE Simülasyonları için Bulgular.....	91
4.2. SAM Fantom Simülasyonları için Bulgular.....	94
5. TARTIŞMA.....	114
6. SONUÇ.....	125
7. ÖZET.....	127
8. SUMMARY.....	128
9. KAYNAKLAR.....	129
10. ÖZGEÇMİŞ.....	144

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: E, H ve K polarizasyonları (Gabriel; 2005).....	24
Şekil 2: Düzlem Dalga	25
Şekil 3: Dokular için idealleştirilmiş dispersiyon bölgeleri.	29
Şekil 4: FDTD Hesaplama sıralaması.....	32
Şekil 5: Birim FDTD (Yee) hücresi (Speag, 2007)	35
Şekil 6: Donanım Tabanlı Simülasyon Hızlandırıcı Kart (Axware V1.5, Speag).....	50
Şekil 7: Simülasyonlarda kullanılan SEMCAD X programının grafik arayüzü	52
Şekil 8: Genel mobil telefon modelinin a) önden görünüşü b) yandan görünüşü.....	55
Şekil 9: Simülasyonlarda kullanılan Genel Telefon Modelleri, a) Model A, b) Model B ve c) Model C görülmektedir.....	56
Şekil 10: Cep telefonunun SAM fantomda Yanak ve Eğik konumlarındaki görünüşleri (TS EN 50361)	57
Şekil 11: SAM fantomdaki eğik konumu için mobil telefon açıları: a) yandan görünüş, b) üstten görünüş, c) önden görünüş (Christ, 2005).....	57
Şekil 12: Simülasyonda Kullanılan küpe modeli.....	59
Şekil 13: Simülasyonda kullanılan gözlük modeli.....	60
Şekil 14: SAM fantomda 835 MHz'de yanak pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı.....	92
Şekil 15: SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de yanak pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı.....	92
Şekil 16: SAM fantomda 835 MHz'de eğik pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı.....	93
Şekil 17: SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de eğik pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı.....	93
Şekil 18: Yetişkin SAM fantomda 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı	95
Şekil 19: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı.....	95
Şekil 20: Yetişkin SAM fantomda 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı	96
Şekil 21: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı.....	96
Şekil 22: Yetişkin SAM fantomda 835 MHz'de yanak pozisyonunda küpeli durum için SAR dağılımı	97
Şekil 23: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de yanak pozisyonunda küpeli durum için SAR dağılımı.....	97
Şekil 24: Yetişkin SAM fantomda 835 MHz'de yanak pozisyonunda gözlüklü durum için SAR dağılımı	98

Şekil 25: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de yanak pozisyonunda gözlüklü durum için SAR dağılımı	98
Şekil 26: Çocuk SAM fantomda 835 MHz'de çocuk dielektrik özelliklerin kullanıldığı yanak pozisyonunda SAR dağılımı	99
Şekil 27: Çocuk SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de çocuk dielektrik özelliklerin kullanıldığı yanak pozisyonunda SAR dağılımı	99
Şekil 28: 835 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Kafa Fantomlarının SAR Değerlerinin Karşılaştırması	105
Şekil 29: 900 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Kafa Fantomlarının SAR Değerlerinin Karşılaştırması	105
Şekil 30: 835 MHz için Yetişkin SAM Fantomda Anten Konumlarına göre SAR Değerlerinin Karşılaştırması	107
Şekil 31: 900 MHz için Yetişkin SAM Fantomda Anten Konumlarına göre SAR Değerlerinin Karşılaştırması	107
Şekil 32: 835 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR Değerlerine Etkisi.....	109
Şekil 33: 900 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR Değerlerine Etkisi.....	109
Şekil 34: 835 MHz'te Fantom Boyutlarının SAR Değerine Etkisi.....	111
Şekil 35: 900 MHz'te Fantom Boyutlarının SAR Değerine Etkisi.....	111
Şekil 36: Yetişkin SAM Fantomda Frekansın SAR Değerine Etkisi.....	113
Şekil 37: Farklı Fantomlarda Frekansın SAR Değerlerine Etkisi	113

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1: Dispersiyonlar ve gözlenen frekans aralıkları	28
Tablo 2: Ulusal ve uluslararası kurumlar tarafından tespit edilen kafa bölgesindeki SAR limitleri	48
Tablo 3: SAM Fantom Sıvısının IEEE 1528 ve IEC 62209-1 Standartlarında belirtilen dielektrik özellikleri.....	53
Tablo 4: Fantomlarda Yanak ve Eğik konumlarında kullanılan açđ ve uzaklıklar (Christ, 2005)	58
Tablo 5: Yetişkine kıyasla çocuk beyin dokusunun dielektrik özelliklerindeki artış oranı	61
Tablo 6: Çalışmada kullanılan SAM Fantom sıvısına ait dielektrik değerler	62
Tablo 7: İncelenen genel maruziyet koşullarında gerçekleştirilen simülasyonlar	63
Tablo 8: 1 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri (W/kg)	100
Tablo 9: 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri (W/kg)	101
Tablo 10: Maksimum SAR değerleri (W/kg)	102
Tablo 11: 835 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Fantomlardaki SAR Değişim Oranları	103
Tablo 12: 900 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Fantomlardaki SAR Değişim Oranları	104
Tablo 13: Yetişkin SAM Fantomda 835 MHz Frekans için Anten Konumlarından kaynaklı SAR Değişim Oranları	106
Tablo 14: SAM Fantomda 900 MHz Frekans için Anten Konumlarından kaynaklı SAR Değişim Oranları	106
Tablo 15: 835 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR değişim oranına etkisi	108
Tablo 16: 900 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR değişim oranına etkisi	108
Tablo 17: 835 MHz'te Fantom Boyutunun SAR değişim oranına etkisi..	110
Tablo 18: 900 MHz'te Fantom Boyutunun SAR değişim oranına etkisi..	110
Tablo 19: Frekansın SAR değerinde oluşan değişim oranına etkisi.....	112
Tablo 20: IEEE SCC-34/SC2/WG2 çalışması ile Gazi Biyofizik çalışmasının SAR (W/kg) Değerleri karşılaştırması.....	118

KISALTMALAR

AB	: Avrupa birliği
ABC	: Absorblayıcı Sınır Koşulları (Absorbing Boundary Condition)
AMPS (Advanced Mobile Phone System)	: Modern Mobil Telefon Sistemi
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
CENELEC	: Avrupa Elektroteknik Normalizasyon Komitesi (Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique)
CW (Continuous Wave)	: Sürekli Dalga
DC (Direct Current- Doğru Akım)	: Zamana göre değişmeyen akım
DNA	: Deoksiribonükleik Asit
E (Electric Field)	: Elektrik Alan
ELF (Exteremely Low Frequency)	: Oldukça Düşük Frekans Aralığı ($0 < f < 300$ Hz)
EM (Electromagnetic)	: Elektromanyetik
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk (ElektroMagnetic Compatibility)
EMF (Electromagnetic Field)	: Elektromanyetik Alan
f (Frequency)	: Frekans
FCC (Federal Communication Commission)	: Federal İletişim Komisyonu
FDTD	: Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain)
GSM (Global System for Mobile Commnication)	: Küresel Mobil İletişim Sistemi
H	: Manyetik Alan Şiddeti
HF (High Frequency)	: Yüksek Frekans
HP	: Hidroksiprolin
ICNIRP (International Commission Non- Ionizing Radiation Protection)	: Uluslararası Non-İyonizan Radyasyondan Korunma Komisyonu
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komitesi (International Electrotechnical Commision)
IEEE (Institute of Electric and Electronical Engineering)	: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü
IR (Infrared)	: Kızılötesi
K	: Yayılım Vektörü

MRI (Magnetic Resonance Imaging)	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
MW (Microwave)	: Mikrodalga
NK (Natural Killer Cell)	: Doğal Katil Hücreler
P (Power)	: Güç
PML	: Mükemmel Uyumlu Tabaka (Perfectly Matched Layer)
RF (Radio Frequency)	: Radyo Frekans
S	: Güç Yoğunluğu
SAM (Specific Anthropomorphic Mannequin)	: Antropomorfik Manken
SEMCAD	: RF Alan Simülasyon Yazılımı
SAR (Specific Absorption Rate)	: Özgül Soğurma Oranı (ÖSO)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

BİRİMLER

NİCELİK	BİRİM	BOYUT
Manyetik Alan Şiddeti (H)	Amper/metre	A/m
Manyetik Akı Yoğunluğu (B)	Tesla	T
	Gauss	G
Elektrik Alan (E)	Volt/metre	V/m
	Newton/Coulomb	Nt/C
Elektrik Akı Yoğunluğu (D)	Coulomb/metrekare	C/m ²
Elektriksel İletkenlik (σ)	Siemens/metre	S/m
Frekans	Hertz	Hz
Dalga Boyu (λ)	Metre	M
Güç (P)	Watt	W
Güç Yoğunluğu (S)	Watt/metrekare	W/m ²
Özgül Soğurma Oranı (SAR)	Watt/kilogram	W/kg
Akım Yoğunluğu (J)	Amper/metrekare	A/m ²
	Joule	J
Enerji (E)	Kilokalori	Kcal
	Elektronvolt	eV
Uzaklık	Metre	m
Kütle Yoğunluğu (ρ)	Kilogram/metreküp	Kg/m ³
Manyetik Geçirgenlik (μ)	Henry/metrekare	H/m ²
Dielektrik Geçirgenlik (ϵ)	Farad/metrekare	F/m ²
Sıcaklık (T)	Kelvin	K
Isı Kapasitesi (c_i)	Joule/kilogram Kelvin	J/kg K

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince ve bu tezin hazırlanması aşamasında tüm çalışmalarımda büyük destek ve yardımlarını gördüğüm danışman hocam ve tez yöneticim Yrd. Doç. Dr. Ayşe CANSEVEN KURŞUN'a, gerekli dökümanlara ulaşmamız konusunda yardımını esirgemeyen Prof. Dr. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na ve SEMCAD X yazılımının temin edilmesinde ve kullanımında büyük desteğini gördüğüm Dr. Erdem OFLİ'ya çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında gece gündüz demeden yardıma koşan ve katkılarını esirgemeyen Arın TOMRUK'a ve Osman ÖZCAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca gerektiğinde maddi, manevi desteklerini esirgemeyen tüm bölüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mehmet Zahid TÜYSÜZ
ANKARA 2007

1. GİRİŞ

Hızla gelişen teknoloji ile birlikte Elektromanyetik (EM) Alan kaynaklarının çeşitliliği ve sayısı çığ gibi artmaktadır. Özellikle 1990'lardan sonra hayatımıza girmeye başlayan mobil telefonlar nedeniyle her yaşta ve cinsten bireylerin Radyo Frekans (RF) Alan maruziyetinde ciddi bir artış yaşanmaktadır. Üstelik bu alan kaynağı, hem beyin gibi önemli ve hassas bir organa çok yakın mesafede kullanılmaktadır hem de gelişme sürecinde bulunan çocuklar da dahil olmak üzere her yaşta bireyler tarafından çok yaygın bir şekilde kabul görmektedir. Bu nedenle cep telefonu kullanımından kaynaklı muhtemel sağlık etkileri bilimsel alanda yoğun şekilde çalışılmaktadır.

Ulusal ve uluslararası standartlarda Özgül Soğurma Oranı (ÖSO), (Specific Absorption Rate, SAR) ile belirtilen EM Alan doz limitleri konularak olası sağlık etkilerinin önlenmesine çalışılmaktadır. EM Alan maruziyetinden kaynaklı alınan doz değerinin, doğrudan insan üzerinde ölçümünün mümkün olmaması nedeniyle ya laboratuvar ortamında doku eş değeri sıvı ile dolu fantomlarda ya da bilgisayar ortamındaki simülasyonlar kullanılarak tespiti mümkündür. SAR'ın bilgisayar simülasyonları tespitinde, canlıyı EM Alana maruz bırakmadan ve prob bağlantısı olmaksızın, yüksek çözünürlüklü Manyetik Rezonans Görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging, MRI) tabanlı fantomlar ile doku ve organlardaki doz değeri belirlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar deneysel ve epidemiyolojik sonuçların değerlendirilmesinde önemli katkılar sağlamaktadır.

Simülasyon (modelleme), teorik ya da gerçek fiziksel bir sisteme ait neden-sonuç ilişkilerinin bir bilgisayar modeline yansıtılması tekniğidir ve simülasyon çalışmaları değişik koşullar altında gerçek sisteme ait davranışların bilgisayar modelinde izlenmesini sağlar. Kısacası simülasyon, gerçek hayattaki olayların bilgisayar ortamına aktarılması işlemidir. Bu tanıma uygun olarak, simülasyon çalışmalarında gerçek hayatta karşılaşılabilecek en olası durumlar ele alınmaktadır. Bu amaca uygun olarak yaptığımız çalışmada aşağıda belirtilen konulara açıklık getirilmeye çalışılmıştır;

- Gelişme döneminde olan ve yetişkinlere kıyasla çevresel etkilere daha hassas olan çocukların, cep telefonu kaynaklı aldıkları doz değerlerinin tespiti
- Yetişkin bireylerin cep telefonu kaynaklı aldıkları doz değerlerinin tespiti
- Yetişkin bireyler ile çocuklar arasındaki SAR oranları arasındaki farkın tespiti

- Farklı anten konumlarından kaynaklı radyasyon desenlerinin tespiti ve doz değerlerine etkisi
- Cep telefonlarının farklı kullanım konumlarından kaynaklı doz değerlerinin tespiti
- Cep telefonu frekansının SAR değerine etkisinin tespiti
- Dielektrik özelliklerin SAR değerine etkisinin tespiti
- Günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan küpe ve gözlük gibi aksesuarların alınan doz değerine etkisinin tespiti yapıldı.

Yaptığımız modelleme çalışmasında cep telefonu kullanımı sırasında aşağıda verilen birbirinden bağımsız altı parametrenin kafada oluşan SAR değerine etkileri ayrı ayrı incelendi. Bu parametreler:

- Cep telefonunun başa göre pozisyonu (yanak ve eğik konumları)
- Cep telefonu frekansı (835 MHz ve 900 MHz)
- Kafanın boyutu (yetişkin ve çocuk boyutları)
- Kafanın dielektrik özellikleri (yetişkin ve çocuk dielektrik özellikleri)
- Anten konumu (kasanın sağında, solunda ve ortada olduğu konumlar)
- Kullanılan metalik aksesuarlar (gözlük ve küpe)

Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) yaptığı geniş kapsamlı uluslararası bir çalışmanın sonuçları ile yaptığımız çalışmayı kıyaslayabilmek amacı ile 835 MHz frekansı seçilmiştir. Ayrıca Türkiye'de halen mevcut üç GSM operatöründen ikisi tarafından kullanılan ve en yaygın kullanım frekansı olan 900 MHz için, cep telefonunun kafada oluşturduğu SAR değerleri tespit edilmiştir. Cep telefonları ve anten tasarımları markaya ve modele göre çok çeşitlilik gösterdiği için IEEE'nin *genel mobil telefon* modeline uygun şekilde dizayn edilen $\lambda/4$ monopol antenli, antenin mobil telefon kasası üzerinde farklı yerlerde konumlandırılması ile elde edilen üç ayrı mobil telefon modeli kullanılmıştır. Telefonlar IEEE ve Uluslararası Elektroteknik Komitesi (International Electrotechnical Commission, IEC) tarafından belirtilen standartlara uygun *yanak* ve *eğik* pozisyonlarında kafa fantomu yakınına konumlandırılmıştır. Çocukların gerek boyutları gerekse dielektrik özelliklerinin farklı oluşu nedeni ile aldıkları doz değerleri de farklıdır. Bu farkı belirleyebilmek amacıyla homojen yapılı SAM fantom kullanılarak çeşitli simülasyonlar yapılmıştır. Gerçek hayatta aldığımız doz değerlerini saptayabilmek amacı ile sıkça kullanılan gözlük, küpe gibi aksesuarların doz değerine etkisi incelendi.

SAR hesabı, Maxwell denklemlerinin diferansiyel şeklinin merkezi fark denklemleri ile değiştirilip zaman ve konumda sayısallaştırılmasına dayanan Zamanda Sonlu Farklar (Finite Difference

Time Domain, FDTD) yöntemini kullanan SEMCAD X simülasyon yazılımı ile bilgisayar ortamında yapılmıştır.

Giriş bölümünden sonra ikinci bölüm, EM alan dozimetri çalışmalarının tarihçesinin verildiği bir bölüm ile başlanmakta, EM alanların biyolojik etkileri ile RF alanların biyolojik dokular ile etkileşim mekanizmasına değinildikten sonra dozimetri, dokuların dielektrik özellikleri, RF dozimetride kullanılan FDTD yönteminden bahsedilmektedir. Daha sonra ise yaygın olarak kullanılan Mükemmel Uyumlu Katmanlar (Perfectly Match Layer, PML) sınır koşulları ile ilgili bilgi verilmektedir. Konu ile ilgili ulusal ve uluslararası standartlar verilmesi ile bölüm tamamlanmaktadır.

Üçüncü bölümde, simülasyon çalışmalarında kullanılan donanım ve yazılımlar belirtilmekte, kullanılan bilgisayar, hızlandırıcı kart, SEMCAD X yazılımı ve fantomlara ilişkin bilgiler verilmektedir. Daha sonra simülasyon uygulamalarında kullanılan telefon modeli, uygulama pozisyonları, simülasyonda kullanılan aksesuarlar, çocuk kafa modelinin özellikleri ve dielektrik özelliklere değinilmektedir. Bölüm simülasyon çalışmalarında uygulanan maruziyet koşullarının belirtilmesi ile son bulmaktadır.

Dördüncü bölümde, yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen değerler ve resimler verilmekte, sonuçlar birbiri ile kıyaslanmaktadır.

Beşinci bölümde, simülasyon çalışmalarında elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslanmakta, neden-sonuç ilişkisi değerlendirilmektedir.

Altıncı bölüm ise yapılan çalışmalara ait sonuç kısmından oluşmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, literatüre yapılan orijinal katkılar şu şekilde sıralanabilir:

- Amerikalı ve Avrupalı araştırmacıların sonuçlarının kıyaslanabilir hale gelmesi amacıyla, Amerika'da kullanılan 835 MHz ve Avrupa'da kullanılan 900 MHz cep telefonu çalışma frekanslarından kaynaklı SAR değerlerinin literatürde ilk karşılaştırılması yapılmıştır.
- SAM fantomda mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip gözlük modeli ile ilgili kontrollü simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

- SAM fantomda mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip küpe modeli ile ilgili kontrollü simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.
- Çocuk boyutlarına ölçeklenmiş SAM fantomda deneysel olarak tespit edilen dielektrik özelliklerin kullanımıyla, dielektrik özelliklerle ilgili kontrollü simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Tarihçe

EM alanlar yayan cihazların hızla hayatımıza girmesi ile birlikte bu alanlara maruz kalan insanların absorbladığı EM enerjii hesaplayan dozimetrimin önemi de gün geçtikçe artmıştır.

Dozimetriyi etkileyen en önemli faktörler; uygulanan alanın frekansı, şiddeti, doğrultusu, dalga şekli, canlının pozisyonu, maruziyet süresi ve EM alana maruz kalan canlının boyutlarıdır^{1,2}. Bu nedenle, deney hayvanları ile yapılan araştırmaların sonuçlarının insanlar için ne anlama geldiğinin saptanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Modelleme ve ölçülendirme çalışmaları ile deney hayvanlarında indüklenen alan ve akım yoğunluğunun insanlardaki boyutu saptanabilmektedir. Canlının maruz kaldığı E ve B alanların; vücut yüzeyinde veya dokuda indükleyeceği alan ve akım değerleri biyolojik etki boyutunun belirlenmesinde önemli bir ölçüttür³⁻⁵. Deney hayvanı dış alanlara maruz kaldığında gözlenen etkinin vücudun yüzeyindeki alanların mı, vücudun içinde indüklenen alan ve akımların mı, yoksa her ikisinin mi sonucu olduğu bilinmemektedir³.

Modelleme çalışması, canlıyı temsil eden fiziksel özelliklerde modeller oluşturarak, dışarıdan uygulanan alanların modelde indüklediği alan ve akım yoğunluğunun laboratuvarında ölçüldüğü (deneysel modelleme) ve/veya matematiksel yöntemler kullanılarak modelin teorik analizinin yapıldığı (teorik modelleme) çalışmalardır.

Teorik yöntemler, analitik yöntemler ve sayısal yöntemleri kapsamaktadır. Analitik yöntemlerde EM alan denklemleri doğrudan çözülmektedir. Sayısal yöntemlerde ise büyük sistemlerde, eş zamanlı ve sayısal olarak çözülmektedir⁶.

Literatürde dışarıdan uygulanan ELF manyetik alanlar için insan ya da deney hayvanı boyutunda gerçekleştirilen modelleme çalışmaları ve bu yolla indüklenmiş alan (ya da akım) saptanmasına ilişkin veriler oldukça kısıtlıdır. Bu konuda gerçekleştirilen çalışmaların başlıcaları deney hayvanı ve insanı küresel model varsayan Polk ve Stuchly ile elipsoid şekilli varsayan Kaune çalışmalarıdır^{7,8,9}. Canseven ve ark. çalışmalarında, Polk, Stuchly ve Kaune yaklaşımlarından yararlanarak dış manyetik alanların dokuda indüklediği alan ve akım yoğunluklarını analitik yolla hesaplamış ve kobay ile insan arasında ölçülendirme faktörü saptamışlardır^{2,10-14}.

RF absorpsiyon karakteristiğini anlamak amacı ile hem analitik hem de sayısal EM teknikler kullanılmıştır.

Absorblanan enerjinin hesaplanmasında genel yaklaşım, absorblayıcıyı temsil eden özel bir model için Maxwell denklemlerinin çözülmesidir. Ancak denklemlerin karmaşıklığından dolayı çeşitli tekniklerin ve modellerin kombinasyonu kullanılmıştır⁶.

Ortalama SAR değerinin yanı sıra lokal SAR değerlerinin de elde edilebilmesi, sayısal tekniklerin önemli avantajlarından biridir.

Teorik dozimetrisinin erken dönemlerinde Schwan ve ark., ile Johnson ve ark. tarafından düzlemsel tabakalı modellerde absorblanan enerji hesaplanmıştır^{6,15,16}. Daha sonra SAR hesabı için düzlemsel modele göre daha karmaşık olan küresel insan ve hayvan modelleri kullanılmıştır^{6,17-24}. Küresel model bazı genel SAR karakteristiğini anlamaya yardımcı olmuş fakat polarizasyon etkisini tespit etmekte yeterli olamamıştır. Lin; düşük frekanslarda manyetik alandan kaynaklanan SAR bileşenlerinin, E alandan kaynaklanan SAR bileşenlerine göre daha önemli olduğunu göstermiştir^{6,21}. Daha sonraları çok katmanlı küresel modeller kullanılarak insan kafasındaki rezonans özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmaları Durney ve ark., Johnson ve ark., ve Massoudi ve ark.'nın elipsoid model çalışmaları takip etmiştir^{6,25-28}.

Silindirik modeller elipsoidal modellere göre insan şekil ve boyutunu daha az temsil etmelerine rağmen, daha fazla bellek ve işlem gücü gerektiren yüksek frekanslarda hesaplama yapılabilmesine izin verdiği için faydalı olmuştur^{6,29}.

Geometrik modeller basit matematiksel işlemleri nedeni ile tercih edilmiştir. Daha sonraları kübik hücrelerden oluşan insan modelleri³⁰⁻³³ ve elipsoidal modeller²⁵⁻²⁸ ile silindirik modeller²⁹ kullanılmaya başlanmıştır⁶.

Kübik hücrelerden oluşan blok modeli ilk olarak Chen ve arkadaşları kullanmıştır⁶. Hagmann ve ark. da kübik hücrelerden oluşan blok modeli kullanılmıştır^{6,33-36}. Livesay ve Chen geliştirdikleri moment metodunu SAR hesaplamasında kullanmışlardır^{6,30-32}.

Sayısal dozimetride moment metodundan sonra FDTD metodu giderek tercih edilmeye başlanmıştır. Gandhi ve Stuchly tarafından ELF ve RF dozimetride bu metod kullanılarak literatüre önemli katkılar sağlanmıştır. Dimbylow'un MRI tabanlı fantom çalışmaları ile birlikte fantomlar daha gerçekçi bir hale bürünmüşlerdir.

Günümüzde ELF dozimetride Gandhi tarafından geliştirilen Empedans metodu, alanında en etkili olan sayısal yöntemdir. RF dozimetride ise FDTD yöntemi daha fazla tercih edilmesine karşın Sonlu

Elemanlar (Finite Element, FE) yöntemi ve Sonlu Entegraller Tekniği (Finite Integral Technique) gibi uygulamalar bulunmaktadır.

2.2. Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri

2.2.1. Oldukça Düşük Frekanslı (ELF, 0-300Hz) Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri

Son 50 yıldır elektrik dağılımı ve kullanımının tüm dünyada göstermiş olduğu hızlı artıştan dolayı EM alanların biyolojik sistemlerle etkileşimi sonucunda oluşabilecek olası biyoetkiler önemli bir araştırma konusu olmuştur^{37,38}. Bu konudaki in vivo, in vitro ve epidemiyolojik çalışmalar halen sürdürülmektedir.

Çok Düşük Frekansta (VLF) ve Oldukça Düşük Frekansta (ELF - Extremely Low Frequency) EM alanlar, bir insan boyundan çok daha büyük dalga boyuna sahiptir. Elektrik ve Manyetik alanlar kuasi statik hale gelir. Elektrik ve manyetik alanların insan vücudu ile etkileşimleri birbirlerinden oldukça farklıdır. İnsan vücudu, elektriksel özellikleri açısından heterojen bir yapıya sahiptir ve neredeyse hiç manyetik materyal içermediğinden düşük frekanslı manyetik alanlar, azalma olmaksızın vücuda girebilmektedir. Ancak elektrik alanlar, alternatif manyetik alanlar tarafından indüklenerek, vücut içerisinde indüksiyon akımının oluşmasına neden olmaktadır.

ELF EM alanların karsinojenik ve genetik etkiler oluşturabildiği, serbest radikaller, protein sentezi, bağışıklık (immun), üreme, büyüme ve gelişme sistemlerini etkilediği gösterilmiştir³⁹⁻⁸³.

Elektromanyetik alan maruziyetlerinin DNA hasarına neden olabildiği ve tümör gelişim riskini arttırdığı bilinmektedir. Genel olarak, 50/60 Hz EM alanların doğrudan DNA hasarına neden olabilecek yeterlilikte enerjiyi hücrelere transfer etmediği kabul edilmektedir. Ancak EM alan maruziyetinin, serbest radikallerin tetiklediği bazı hücresel olaylarda değişimlere neden olduğu ve bu alanların DNA üzerinde dolaylı olarak etki gösterdiği yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir³⁹. Araştırmacılar bu genotoksik etkileri, kromozomal bozukluklar, mikro çekirdek oluşumunda gözlenen artış, DNA'da meydana gelen bağ kırıkları ve bu kırıkların onarımı, hücre ölümlerinin de dahil olduğu sitotoksik etkiler şeklinde sınıflandırmışlardır³⁹. Nordenson ve ark. (1992) insan amniyotik hücrelerini sinüzoidal 50 Hz 0.3 mG manyetik alana 72 saat süresince maruz bırakmışlar ve kromozomal bozukluklarda önemli ölçüde artış olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı bilim insanları, elektromanyetik alanların kromozomlar üzerindeki etkilerini daha detaylı değerlendirmek amacıyla

amniyotik hücrelere 50 Hz frekansında 0.3 mG kesikli alan maruziyeti uygulamışlardır. Kesikli alan maruziyetinin de kromozomlar üzerinde olumsuz etkileri olduğunu, hatta sürekli alan maruziyetinden daha etkili olduğunu rapor etmişlerdir⁴⁰. Ivancsits ve ark. (2003), insan fibroblastlarından hazırlanmış hücre kültürlerini 50 Hz frekanslı 0.2-10 G aralığındaki manyetik alanlara 1-24 saatlik sürelerde kesikli olarak maruz bırakmışlar; uygulanan doza ve uygulama zamanına göre DNA tek ve çift ipliklerinde kırılmaların olduğunu ve oluşan DNA hasarının termal etkilerden kaynaklanmadığını tespit etmişlerdir⁴¹.

Sobczak ve ark. (2002); 50 Hz frekanslı 20 V/m elektrik alan, 2 A/m manyetik alana maruz kalan çelik işçilerinin plazma antioksidan enzim aktivitelerini incelemiş, elde edilen bulgular sonucunda elektromanyetik alanların serbest radikal aktivasyonunda artışa neden olduğunu saptamışlardır⁵⁰. Canseven ve ark., 50 Hz manyetik alanların farklı şiddet ve sürelerle uygulandığı kobaylarda deri, kalp, karaciğer, akciğer, böbrek ve beyin dokusunda protein sentezi, antioksidan enzim aktivitesi, serbest radikal oluşumu ve solunum patlamasına etkisi olabileceğini rapor etmişlerdir^{59,64-66,74-79}. Güler ve ark. değişik şiddet, doğrultu ve uygulama sürelerinde 0.3-1.8 kV/m aralığında statik ve 50 Hz frekanslı alternatif elektrik alanların kobaylarda plazma, karaciğer, akciğer ve böbrek dokularında serbest radikal oluşumu ve antioksidan enzim aktivitesinde artışa neden olduğunu göstermişlerdir^{51-53,80,81}.

Seyhan ve ark., 50 Hz frekanslı 2 G – 30 G aralığındaki manyetik alan maruziyetlerinin, kollajen sentezi, epilepsi, elektrolitler, lipid peroksidasyonu (MDA), Nitrik oksit (NO_x), solunum patlaması (MPO), antioksidan savunma sistemi (GSH) ve immün sisteme ilişkin etkilerini dalak, deri, akciğer, böbrek, beyin ve plazma dokularında incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ELF manyetik alanların çalışılan dokular üzerinde etkili olduğu rapor edilmiştir^{54,56}.

Seyhan ve ark., farklı yönde ve farklı sürelerle uygulanan 0.3 - 1.9 kV/m aralığındaki statik ve ELF elektrik alan maruziyetlerinin kobayların beyin, karaciğer, akciğer, böbrek, dalak, testis ve plazma dokularında serbest radikal oluşumu, antioksidan enzim seviyesi ve kollajen sentezine etkilerini incelemiştir. Dokulardaki elektrik alan etkisinin, elektrik alanın türüne, büyüklüğüne ve maruziyet süresine önemli ölçüde bağlı olduğu rapor edilmiştir^{55,56}.

Güler ve ark. tarafından statik ve ELF frekanslı düşey ve yatay uygulanan E alanların kobaylarda kollajen sentezi üzerinde etkili olabileceği ve düşey alan uygulamalarının yatay alan uygulamalarından daha etkili olduğu rapor edilmiştir^{58,60,6182,83}.

De Seze ve ark. (1993) çalışmasında homojen darbeli manyetik alana (uniform pulsed magnetic field square-wave 0.8 Hz-120mT) günde 10 saat süre ile 5 gün boyunca maruz bırakılan farelerin, maruziyet sonrası Doğal Katil hücrelerinin (Natural Killer Cells, NK) aktivitesini incelemişlerdir. Uygulanan alan şiddeti etkisiyle NK hücrelerinin sitotoksik aktivitesinde artış olduğunu tespit etmişlerdir⁶². House ve ark. (2000) çalışmasında fareleri 60 Hz frekanslı 0.02 – 10 G aralığında manyetik alanlara günde 18 saat olmak üzere 13 hafta süresince maruz bırakmışlar ve uygulanan manyetik alanların NK hücrelerin aktivitesini baskıladığını tespit etmişlerdir⁶³. Canseven ve ark.'nın çalışmalarında elektromanyetik alan maruziyetinin immün sistem fonksiyonları üzerine etkisi araştırılmıştır. 50 Hz frekanslı 20 G manyetik alana maruz bırakılan kobayların dalak dokularından alınan makrofajlardaki NK hücrelerin in vitro ortamda aktiviteleri incelenmiştir. Özellikle kanserli hücrelerin öldürülmesinde önemli rollere sahip bu hücrelerin aktivitelerinde uygulanan alan sonucunda bir azalma olduğu tespit edilmiş, 50 Hz frekansında manyetik alanın immün sistem aktivitesinde baskılayıcı bir özelliğe sahip olabileceği rapor edilmiştir^{64,67-69}.

Oldukça Düşük Frekanstaki elektrik ve manyetik alan maruziyetlerinin olası zararlı etkileri göz önüne alındığında, bu alanlar ABD Ulusal Çevre Sağlığı Bilimleri Enstitüsünün (NIEHS) 1998 ve Uluslararası Kanser Araştırmaları Kurumunun (IARC) 2002 yıllarında yayınlanmış yönergelerinde, sırasıyla 3 ve 2B sınıfı karsinojen olarak tanımlanmıştır^{84,85}. Elektrik enerjisinin üretildiği, dağıtıldığı veya yoğun olarak kullanıldığı bölgelerde sürekli olarak yaşayan veya meslekleri gereği uzunca bir süre bulunmak zorunda olan insan grupları ile yapılan çalışmalar sonucunda:

- 2 mG şiddetindeki manyetik alan maruziyeti lösemi, lenfoma ve yumuşak doku sarkomlarını daha fazla olmak üzere tüm kanser türlerini 1.4 - 2 katı arttırmaktadır⁸⁶⁻⁸⁷.
- 3 mG şiddetindeki manyetik alan maruziyeti çocuklarda lösemi insidansını 1.7 kat arttırmaktadır⁸⁸.
- 4 mG şiddetinde elektromanyetik alan maruziyeti çocuklarda lösemi insidansını 2 kat arttırmaktadır⁸⁹.
- Yüksek gerilim hattının 150 m yakınındaki yakınında yaşayan ve 0.1 - 0.5 G aralığındaki manyetik alanlara maruz kalan çocuklarda kanser insidansının 2 kat arttığı rapor edilmiştir⁹⁰.

2.2.2. Radyo Frekans ve Mikrodalga Alanların (3kHz-300GHz) Biyolojik Etkileri

Elektromanyetik spektrumda 3 kHz ve 300 GHz frekans aralığını kapsayan Radyo Frekans (RF) ve Mikrodalga (MW) alanlara günlük yaşamımızın her anında maruz kalmaktayız. Özellikle günlük yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelen cep telefonlarının, mikrodalga ile çalışan ev aletlerinin, çeşitli haberleşme araçlarının, endüstriyel ve radar teknolojilerinin yaydığı RF sinyallerin biyolojik etkileri 50 yılı aşkın bir süredir araştırılan önemli konular arasında yer almaktadır⁹¹.

RF alan kaynaklarından olan TV ve Radyo vericileri çevre sağlığı için önemli tehdit oluşturmaktadır. Bu vericilerin kurulması sırasında sağlık riskleri açısından uyulması gereken kurallar mevcuttur ve ülkemizde henüz bu konuya gereken önem verilmemektedir. Sınav ve ark.'nın çalışmasında uyulması gereken kurallar ile dünyadaki uygulamalar sunulmuş ve radyo TV vericilerinden kaynaklanan RF radyasyonun güç yoğunluğu hesaplaması yapılmıştır. Vericilerde kaynaklanan RF radyasyon için pilot bölge seçilen Şentepe-Dededoruk tepesindeki TV-Radyo verici kulelerinin bulunduğu bölgede vericilerin altında RF radyasyon miktarı hesaplanmıştır⁹²⁻⁹⁴.

RF alan kaynaklarının biyolojik yapılarda oluşturdukları etkiler termal ve termal olmayan (non-termal) olarak sınıflandırılmaktadır:

- **Termal etkiler;** biyolojik dokularda ısı etkisi oluşturacak güçte RF alanların uygulanması sonucunda, ısı artışı nedeniyle oluşan etkilerdir. Yüksek seviyedeki RF radyasyonun sebep olduğu termal etkiler dolaylı etkileşimlerdir.
- **Termal olmayan etkiler;** dokulara uygulanan RF alanlar ısı etkisi yaratmayacak seviyede olduğu halde, dokuda fizyolojik değişimlere neden oluyorsa, bu etkiler termal olmayan (non-termal) etkiler olarak tanımlanır. Çoğunlukla, düşük seviyedeki RF radyasyonun sebep olduğu bu etkiler Elektromanyetik (EM) alanların biyolojik sistemlerle doğrudan etkileşimleridir⁹⁵.

Elektromanyetik alanların etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda çoğunlukla düşük seviyedeki RF enerjinin biyolojik sistemler üzerindeki termal olmayan etkileri araştırılmış, tekrarlanabilirliği olmayan termal etkilerin olağanüstü çevre koşulları altında dahi oluşabileceği açıklanmıştır⁹⁶. Teorik olarak açıklanan etki mekanizmalarının laboratuvar deneyleriyle desteklenmediği takdirde kabul edilebilir olmadığı konusunda fikir birliğine varılmıştır.

Çok sayıda sistem organ ve fonksiyonun düşük seviyedeki ve uzun süreli RF maruziyetten etkilenebileceği açıklanmıştır^{90,91,95-98}. Shaposhnikov ve ark. düşük yoğunluktaki MW alanların uzun süre uygulanmasının yara iyileşmesinde etkili olup olmadığını histomorfolojik olarak incelemiştir. Kobaylar ile yapılan çalışmada düşük yoğunlukta uygulanan MW radyasyonun yara iyileşmesinde etkili olduğu saptanmıştır. MW alanlara maruz bırakılan kobaylarda iyileşmenin daha hızlı olduğu tespit edilmiştir⁹⁹.

Behari ve ark. çalışmasında, MW radyasyon etkisinde kemiğin ve onun iki bileşeni olan kollagen ve apetitin dielektrik sabiti hesaplanmış, 9.2 GHz maruz bırakılan örneklerde maruziyet sonrası normale oranla dielektrik sabitinin gerçek (reel) ve sanal kısımlarında azalma olduğu saptanmıştır¹⁰⁰.

Ozgur ve ark.'nın çalışmasında 1800 MHz RF radyasyonun kobaylarda karaciğer kollajen sentezine etkisi incelenmiştir. Kobaylara günde 10 dakika ve 20 dakika olmak üzere 1 hafta boyunca uygulanan RF Radyasyonun kollajen sentezine etkisi karaciğer dokusunda hidroksiprolin seviyesini belirleyerek saptanmıştır. Uygulanan alanların karaciğer dokusunda hidroksiprolin seviyesini arttırdığı ancak bu artışın istatistiksel olarak anlamlı bulunmadığı tespit edilmiştir¹⁰¹.

RF ve MW (3 kHz ve 300 GHz) alanların genetik etkilerinin araştırıldığı çoğu çalışmada bu alanların DNA bağ kırıklarına ve kromozomal bozukluklarda artışa neden olduğu açıklanmıştır. Düşük seviyelerde MW radyasyon etkisi ile DNA ipliklerinde kırıkların oluştuğunu ilk kez Lai ve Singh (1995) çalışmasında rapor edilmiştir. Bu çalışmada iki saat süreli 2.45 GHz RF radyasyona tüm vücut maruziyeti gerçekleştirilmiş (SAR değerleri: 0.6 W/kg - 1.2 W/kg) ve sıçanların beyin hücrelerinde uygulanan alan şiddetine bağlı olarak DNA tek ve çift ipliklerinde kırılmaların olduğu tespit edilmiştir¹⁰². Philips ve arkadaşları (1998) 813.5–836.5 MHz frekanslarının düşük SAR değerlerinde (ortalama 2.4 ve 24µW/g) DNA ipliklerinde kırılmaların meydana geldiğini rapor etmiştir. RF radyasyonun DNA onarım mekanizması üzerinde bu mekanizmayı engelleyici yönde etkili olduğu öne sürülmüştür¹⁰³.

Memeli testislerinin normalde sıcaklıkları 33–35°C iken çeşitli faktörlerle abdominal sıcaklığın 37–38°C' ye ulaşması sonucu kısırılık meydana gelmektedir. Isı değişimlerine duyarlı olması nedeniyle RF enerjinin testislerin sıcaklığında artışa neden olması, üremeyi ve sperm morfolojisini kötü etkileyebileceği konusunu gündeme getirmiştir^{72,104}. Hayvan modellerinde RF alan maruziyetinin olası teratojenik etkilerini araştıran çalışmalar göstermektedir ki, fetüste sıcaklığa bağlı olarak artış gösteren anormallik olayı, anneye ait sıcaklık değerinin yaklaşık 2–2.5 °C'lik artışından kaynaklanmaktadır. Hamile kemirgenlerle (fare, sıçan,

Suriye kobayı) yapılan çalışmalarda, annelerin ortalama SAR ≥ 9 W/kg değerlerinde RF alanlara tüm vücut maruziyetlerinde yeni doğan yavrularda fetal malformasyonlar gözlenmiştir^{105,106}. Hamile sıçanların 7.3 W/kg SAR değerindeki RF alana uzun süreli tüm vücut maruziyeti neticesinde fetal vücut ağırlıklarında bir azalma tespit edilmiştir¹⁰⁷.

RF alanların davranış ve öğrenme üzerinde etkili olduğu ifade edilmektedir. Moe ve ark. çalışmasında, 918 MHz CW (SAR değeri: 3.6 W/kg) RF radyasyona, günde 600 dakika, 21 gün boyunca maruz bırakılan sıçanlarda hareketlerde ve yemek yeme isteğinde azalma gözlemlenmiştir¹⁰⁸. D'Andrea ve ark.'nın çalışmasında sıçanlar 915 MHz, CW, (SAR değeri: 2.5 W/kg) RF radyasyona günde 480 dakika olmak üzere 80 gün boyunca maruz bırakılmış ve aktivitelerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir¹⁰⁹. 2450 MHz (SAR değeri: 1.2 W/kg) MW radyasyona günde 480 dakika olmak üzere 80 gün boyunca maruz bırakılan sıçanların aktivitelerinde, uygulanan alana bağlı olarak bir azalma olduğu saptanmıştır¹¹⁰. Lai ve Singh (1996) RF ve MW radyasyonun, sıçanlarda öğrenme aktivitesi üzerine etkisini araştırdığı çalışma sonucunda 2450 MHz MW alana 45 dakika maruziyet sonrasında labirent üzerine bırakılan sıçanların saklı bulunan yemleri, kontrol gruplarına nazaran daha zor bulduklarını tespit etmişlerdir. Bu öğrenme zorluğunun mikrodalga radyasyonun merkezi sinir sisteminde öğrenme sürecinde önemli rollere sahip kolinerjik ve endojen opioid nörotransmitter sistemlerini etkilemesi neticesinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir¹¹¹.

2.3. RF Alanlar İle Biyolojik Dokuların Etkileşim Mekanizması

RF alanlar ile dokuların termal ve termal olmayan mekanizmalar ile elektrik alan ve manyetik alan mekanizmaları yoluyla etkileştiği öne sürülmektedir. Termal mekanizmalar RF alan maruziyeti sonucu dokuda oluşan sıcaklık değişimlerinden kaynaklanır ve ısıya duyarlı biyokimyasal reaksiyonları etkileyebilir. RF alanlar ile biyolojik dokular arasındaki bu tip etkileşimler dokuya enerji transferi ve buna bağlı sıcaklık artışından kaynaklanır. Fakat termal olmayan mekanizmalar doğrudan sıcaklık artışı ile ilgili olmayıp RF elektrik ve manyetik alanın dokuda oluşturduğu değişikliklerden kaynaklanmaktadır¹¹².

2.3.1. Termal Mekanizmalar

Termal mekanizmalar temel olarak farklı elektriksel iletkenliğe sahip biyolojik dokuların RF enerjisiyi absorblaması ile ilgilidir. Elektriksel iletkenlik yüklü parçacık ve iyonların kısmi ötelenme hareketidir. RF elektrik alan titreşen akımlar oluşturmakta ve bu akım enerjisinin moleküler hareket ile hızlı transferi sırasında biyolojik dokularda sıcaklık artışı

gözenmektedir. Bir diğer termal katkı moleküllerin dönüş hareketlerinin engellenmesinden kaynaklanmaktadır. Su molekülü rastgele yönelimli, büyük ve kalıcı bir dipol momente sahiptir. Elektrik alan uygulandığında bu dipol momentler, kısmen alan yönünde yönlendirilir. Suyun akışkan olması nedeniyle, elektrik alan dipolleri çevirmeye çalışırken sıvıya enerji, dolayısı ile de ısı transfer etmiş olur. Bu mekanizma özellikle mobil iletişim frekans aralığında çok etkindir¹¹².

Birim hacimdeki güç dağılımı $\sigma \cdot E^2$ ilişkili olup, dokunun iletkenliği (σ) ve elektrik alanın karesi (E^2) ile değişir; buna bağlı olarak iletkenliği birbirlerinden farklı biyolojik dokularda absorblanan güçler de farklı olacaktır. Tüm termal etkiler, alana maruz kalan dokunun elektriksel parametrelerine, özellikle de elektriksel iletkenliğe bağlıdır. Çocuklarda dokuların dielektriksel özelliklerinin yetişkinlerden farklı olması nedeni ile RF alan maruziyetinden kaynaklı risk, yetişkinlere oranla çocuklarda daha fazladır¹¹².

2.3.2. Termal Olmayan Mekanizmalar

Termal olmayan etkileşim mekanizmaları ile ilgili birkaç yaklaşım mevcuttur.

a. RF Foton Enerjisinin Büyüklüğü

Elektromanyetik bir dalga olan fotonun enerjisi; h Planck sabiti, ν frekans olmak üzere, $h \cdot \nu$ ile bulunur. Frekansı 1 GHz olan, EM dalganın foton enerjisi $4 \cdot 10^{-6}$ eV 'tur. Bu foton enerjisi tipik bir molekülü iyonize etmek için gerekli 1 eV'tan yaklaşık olarak $2 \cdot 10^5$ kat daha küçüktür. Bu nedenle RF alan maruziyetinden kaynaklı DNA hasarı meydana gelse bile bunun iyonizasyon mekanizmasından kaynaklanmadığı ve nedenini başka bir süreçte aramak gerektiği öne sürülmektedir¹¹².

b. RF Alanlar ile Moleküler Titreşimin Uyarılması

Ses dalgalarında olduğu gibi, RF alanlar ile moleküler titreşimin uyarılmasını dikkate alan birkaç etkileşim mekanizması mevcuttur. Bu uyarımın olabilmesi için enerjinin ve momentumun korunması gerekmektedir¹¹².

Enerjinin korunumu için RF alanın foton enerjisi ile titreşimin fonon enerjisi birbirine eşit ve $h \cdot \nu$ olmalıdır. Bu şartın sağlanabilmesi için frekansların eşit olması yeterlidir¹¹².

Momentumun korunumu için RF dalga boyunun ultrasonik dalga boyuna eşit olması gerekmektedir. Bu durum optik modlar için ($\lambda < R$); yani dalga boyunun (λ) cismin boyundan (R) küçük olduğu 1 GHz üstü frekanslarda geçerlidir¹¹³. 1 GHz frekanslı ses dalgaları piezoelektrik yapılar kullanılarak elde edilebilir fakat RF dalgalar kullanılarak doğrudan elde edilemez. Protein gibi kompleks biyolojik yapılardaki lokal merkezlerin RF alanlar ile uyarılması ve gevşeme esnasında fonon salınımı mümkündür¹¹².

c. RF Frekanslarda Hücre Membranı Boyunca Potansiyel

Biyolojik dokularda 1 MHz altı frekanslarda elektrik alan dağılımı çok düzensizdir. Doku örneği boyunca elektrik alan uygulandığında en büyük voltaj düşüşü, dokunun geri kalan kısmına kıyasla, çok daha yüksek elektriksel dirence sahip olması nedeniyle, hücre membranı boyunca meydana gelir. Hesaplamalar membrandaki elektrik alanın, dokudaki ortalama alan değerinden birkaç bin kat daha fazla olduğunu göstermektedir¹¹⁴. Böylece düşük frekanslarda, oldukça küçük ortalama E alanlarda bile, membran boyunca voltajda düşüşler olmaktadır. Fakat daha yüksek frekanslar için bu durum geçerli değildir. Membran bir kapasiteye sahiptir ve bu da AC akım için paralel iletim yolu sağlamaktadır. Düşük frekanslarda bu yolun iletkenliği çok düşük fakat frekansla lineer olarak artmaktadır. Düşük frekanslarda membran boyunca lineer olmayan etkiler meydana gelmektedir¹¹².

d. Termal Enerji Tarafından RF Radyasyon Maruziyet Etkilerinin Sınırlandırılması

Biyolojik sistemlerin bileşenleri sürekli olarak Brownian hareketi ya da termal gürültü olarak bilinen, yüklerin rastgele hareketine neden olan, dalgalı elektrik ve manyetik alana maruz kalırlar.

Termal enerjinin ortalama değeri (E) ; $E = k_B T$ ' dir.

k_B Boltzman sabitidir ve $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K 'dir.

T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır.

Dolayısı ile vücut sıcaklığında (T=37 °C) termal enerji 26 meV'dir.

$$E = 1,38x10^{-23} \cdot 310 = 4,278x10^{-21} \text{ Joule}$$

$$E = 4,728x10^{-21} \cdot 6,24150974 \times 10^{18} = 0,026eV = 26meV$$

Bu yaklaşım basitçe iyon ya da yüklü bileşenlerin RF alanda salınım hareketi yapmaları nedeni ile biyolojik etkilerin oluşabileceği temeline dayanmaktadır. Bu enerji 26 meV'lik termal enerjiden yaklaşık olarak 10^{15} kat daha küçüktür. Fakat ortalama enerjisinin,

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \mu E$$

$$E_k = \frac{1}{2}m\mu^2 E^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (6 \cdot 10^{-26}) \cdot (10^{-7})^2 \cdot (100)^2 = 3 \cdot 10^{-36} J$$

$$E_k = 3 \cdot 10^{-36} \cdot 6,24150974 \cdot 10^{18} = 1,87 \cdot 10^{-17} eV$$

m kütle, μ mobilite ve E rms elektrik alan olmak üzere $m \cdot \mu^2 \cdot E^2 / 2$ olduğuna ve yükün kütlesi ile orantılı olduğu, büyük boyutlu 10^{15} atom içeren yüklü hücrelerinde olabileceği dikkate alınması gerekir^{112,115}.

2.3.3. Elektrik Alan Etkileri

a. Protein Yapısındaki Değişim

Proteinin dolayısıyla enzimin etkinliği yapısına bağlıdır. Proteinler, peptid bağları ile birbirlerine bağlı amino asitlerden oluşan bir ana zincir ve buna bağlı yan zincirlerden oluşmaktadırlar. Yan zincirler genellikle polar özellik gösterirler. Yan zincirlerden kaynaklı yapı farkı nedeni ile farklı potansiyel enerji ve dipol momente sahip olan enzimler, yine bu yan zincirler aracılığı ile farklı yapıları çekmekte ya da itmektelerdir. RF radyasyonun protein yapısı içinde değişikliğe neden olabileceği ve bu nedenle biyolojik yapıları etkileyebileceği düşünülmektedir¹¹⁶⁻¹²⁰.

b. Liganda Bağlanmadaki Değişim

Chiabrera ve arkadaşları RF alanın hücre reseptörleri üzerinde etkili olabileceğini ifade etmişlerdir. Ca^{+2} gibi bir ligand reseptöre yani proteine bağlandığında proteinin yapısı ve reseptör fonksiyonlarının kontrolünü değiştirir. Ligand bağlanma olasılığındaki önemli değişiklikler, RF maruziyet standartlarında belirtilen değerlerin altındaki RF elektrik alan modülasyonu ile oluşturulabilmektedir. Buradaki şaşırtıcı sonuç RF elektrik alan etkilerinin büyük ölçüde metabolik enerji etkileri tarafından yükseltilmesidir. Sistemin avantajı hücrenin temel metabolizması tarafından sağlanan güç

kaynağının transistöre çok benzer bir şekilde kendi güç kaynağını küçük sinyalleri yükseltmek için kullanmasıdır¹²¹.

c. Biyolojik Yapıların Vibrasyonel Durumlarındaki Absorbsiyonlar

RF enerjinin rezonans absorpsiyonunda mikrotübüller gibi biyolojik yapıların titreşim durumlarının rol alabileceği düşünülmektedir. DNA molekülü için titreşim frekansının 10 GHz olduğu kabul edilmektedir. 100 W/m^2 'lik güce sahip olan MW'nin molekülün enerji durumunu $3 \cdot 10^{-9} k_B T$ arttırdığı tespit edilmiştir. Biyolojik dokularda önemli etkiler oluşturabilmek için bu değer çok küçük olduğu kanısına varılmıştır¹²².

d. Hücreler Arası Çekim Kuvvetinin Artışı

Bir sıvı içerisinde dielektrik parçacıkların toplanması genellikle Pearl-Chain etkisinden kaynaklanır. Bu etki RF elektrik alan tarafından da oluşturulabilir. Bu etkinin kolloidal parçacıklarda ve hücrelerde gözlenebilmesi için gereken eşik değer 100 MHz olarak ölçülmüştür. RF elektrik alan hücrelerdeki dipol momentlerin salınımına dolayısı ile çekici kuvvetin artmasına neden olur. Krasil'nikov RF elektrik alan ile hücre membranına bağlı iyon etkileşimini incelemiş ve membran yüzeyine bağlı hidrojen iyonlarının mobilitesinin, bağlı olmayan hidrojen iyonuna kıyasla 20 kat, sodyum iyonuna kıyasla ise 100-1000 kat yüksek olduğunu belirtmiştir^{112,123}.

e. Düşük Frekanslı Elektrik Alanlarının Bozunumu (Demodülasyonu)

Darbeli RF alanların mikrodalga işitsel etkiye neden olduğu bilinmektedir. Bu etkinin termal kaynaklı olduğu ve sadece mobil telefon sinyallerinden çok daha yüksek güç değerlerinde gerçekleştiğine inanılmaktadır. Mobil telefon sinyallerinin oldukça yavaş demodülasyonu halinde standartlarda belirtilen değerlerin üstünde düşük frekanslı bir elektrik alan elde etmek mümkün olacaktır. Bozunum, biyolojik yapının elektriksel iletkenliği ya da dielektrik sabiti, elektrik alan ile önemli oranda değiştiği takdirde gerçekleşecek ve böylece elektriksel cevaplar da lineer olmayacaktır¹¹².

2.3.4. Manyetik Alan Etkileri

Genel olarak manyetik alanın doku ile etkileşiminin iki farklı şekilde gerçekleştiği öne sürülmektedir:

a. Manyetit

İnsan beyin dokusu da dahil olmak üzere dokularda manyetit (Fe_3O_4) adı verilen 50 nm boyunda küçük ferromanyetik parçacıklar bulunmaktadır. Özellikle beynin en dış kısmında manyetit konsantrasyonu yüksektir¹¹².

Darbeleri manyetik alanın, manyetit parçacıklarında tork oluşturduğu ve hücre membranı ile mekanik etkileşimi sonucu iyon kanallarını aktive ettiği belirtilmiştir¹²⁴. Daha sonra manyetit içeren bakterilerle yapılan deneylerde maruziyet artışı ile hücre ölümünün orantılı olduğu tespit edilmiştir¹²⁵.

b. Radikal Çiftleri

Serbest radikaller çiftleşmemiş elektron bulunduran, yüksek reaktif yapılı ve kısa ömürlü moleküllerdir. Kansere de dahil olmak üzere birçok hastalıkta serbest radikallerin önemli rolü vardır. Düşük şiddetli RF alanında serbest radikal konsantrasyonunda artış gözlenmiştir¹²⁶. Sonuç olarak hastalıklar ve serbest radikal konsantrasyonu arasında açık bir ilişki vardır¹¹².

2.4. Dozimetri

Radyo frekans elektromanyetik radyasyon maruziyetinden kaynaklı etkiler çalışırken, deneylerin etik olarak insanlar üzerinde yürütülmesinin mümkün olmaması nedeni ile bu çalışmalar hayvanlar, doku preparatları ve hücre kültürlerinde yapılmaktadır. Ancak hayvanlardan ve in vitro deneylerden elde edilen sonuçlar her zaman doğrudan insanlara uygulanamaz. Sadece biyolojik farklılıkları değil, laboratuvar hayvanları ve hücre kültürlerinden elde edilen sonuçların insana ekstrapolasyonundaki çeşitli zorlukları da dikkate almak gerekir^{127,128}.

RF alan maruziyetinden kaynaklı biyolojik bir etkinin belirlenmesine yönelik deney tasarımında dozimetri önemli bir yer tutmaktadır. Dozimetriye öncelikle hayvanlarda biyolojik etkiye neden olan iç alanların belirlenmesinde ve insanlarda aynı biyolojik etkilerin görülmesine neden olabilecek iç alan değerlerinin tespitinde ihtiyaç duyulmaktadır¹²⁹.

Radyo frekans (RF, Radio frequency) dozimetri, RF alan maruziyetinde biyolojik dokuların absorbladığı elektromanyetik alanın büyüklüğünün ve dağılımının tespitidir.

RF enerjinin biyolojik materyaller ile etkileşimi fiziksel bakımdan komplekstir. Bu etkileşimde dış EM alanın homojenliğinden bağımsız olarak, nesne içerisinde yüksek düzensizliğe sahip elektromanyetik alan dağılımları oluşturabilir. Etkileşimle ilgili esas nicelikler, iç alanlar ile ilgili enerji, akım ve dokular içerisinde indüklenmiş elektrik ve manyetik alan şiddetleridir. Gelen dış elektrik ve manyetik alanlar ile ilişkili iç alan ve akımlar çok karışık biçimdedir.

Aynı dış elektromanyetik alan şiddetine sahip RF radyasyon, farklı seviyelerde enerji absorpsiyonlarına neden olabilmektedir. Çeşitli hayvan türleri ve doku kültürlerinde frekansa bağlı olarak, çok farklı biyolojik etkiler gözlenebilmektedir¹³⁰⁻¹³⁴. Bir biyolojik etkiyi açıklayabilmek için, deneklerde o etkinin görülmesine neden olan iç elektrik alan şiddeti ya da enerji dozunun belirlenmesi gerekmektedir¹²⁷.

2.4.1. Temel RF Parametreleri

Biyolojik nesnelere oluşan, dış RF alan maruziyeti kaynaklı SAR değerinin belirlenmesinde önemli olan birkaç temel parametre vardır¹²⁷.

Elektrik Alan şiddeti E , vektörel bir niceliktir ve birim elektrik yüküne, elektrik alan tarafından uygulanan kuvvet olarak tanımlanır. Birimi volt/metre'dir (V/m).

Manyetik alan şiddeti vektörel bir nicelik olup H ile gösterilir. Akım tarafından oluşturulan manyetik alanın ortamda hareketli ve elektriksel olarak yüklü parçacıklara etkilediği kuvvet olarak tanımlanır. Kuvvetin yönü, parçacığın hareket yönüne ve alan yönüne diktir. Manyetik alan şiddetinin birimi ise Amper/metre'dir (A/m)¹²⁷.

Elektromanyetik alan uzayda herhangi bir noktada zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların bir birleşimidir. Her zaman, zamanla değişen elektrik alana eşlik eden yine zamanla değişen bir manyetik alan vardır ve bunun terside doğrudur. Maruziyet, biyolojik nesnenin elektromanyetik alana maruz kalmasıdır. Maruziyetin büyüklüğü dış elektromanyetik alanın şiddetine, süresine ve biyolojik nesnenin elektrik özelliklerine bağlıdır. İç alanlar, dış alanlar tarafından biyolojik nesnenin dokularının içinde indüklenen elektromanyetik alandır¹²⁷.

Bütün vücut maruziyeti, gelen elektrik ve/veya manyetik alan şiddetinin nispeten biyolojik nesnenin tamamında aynı olduğu durumda,

biyolojik nesnenin kaldığı maruziyettir. Kısmi vücut maruziyeti ise gelen elektrik ve/veya manyetik alan şiddetinin biyolojik nesne üzerinde farklı dağılım gösterdiği maruziyet durumudur¹²⁷.

Frekans, sinüzoidal olarak değişen dalganın birim zamandaki periyot sayısıdır. Frekans birimi Hertz (Hz) 'dir. RF radyasyonda yaygın olarak megahertz (MHz) birimi kullanılmaktadır. Dalgaboyu (λ), RF dalganın yayılım gösterdiği ortamdaki elektrik ya da manyetik alanın tepe noktaları arasındaki mesafedir. Dalgaboyu ve frekans ilişkisi:

$$\lambda = v/f \quad (1)$$

şeklinde olup burada λ metre cinsinden dalga boyu, f hertz cinsinden frekans, v elektromanyetik dalganın ortamdaki hızıdır.

$$v = c/(\epsilon_r)^{1/2}, \quad (2)$$

İfadesinde c ışığın vakumdaki hızı (3.10^8 metre/saniye) ve ϵ_r ortamın bağlı dielektrik sabitidir¹²⁷.

2.4.2. SAR Tanımı

RF maruziyet konulu hayvan deneylerinin çoğunun en önemli amacı RF alan maruziyetinden kaynaklı sonuçları insanların risk değerlendirmelerine uygulayabilmektir. Bu nedenle deney hayvanlarında etkiler gözlemlendiği zaman bu etkilerin insana ekstrapolasyonu gereklidir¹²⁸. Biyolojik dokuların EM alan ile etkileşimini ölçmeden böyle bir ekstrapolasyonun yapılması ve insan için güvenli maruziyet seviyelerinin öngörülmesi mümkün değildir. Elektromanyetik alanın doku ile etkileşimi ve doku içerisindeki iletimi ise birçok değişkenden oluşan kompleks bir fonksiyondur. Dışardan gelen alanın şiddeti, güç yoğunluğu (mW/cm^2), dış elektrik alan şiddeti (V/m) ya da manyetik alan şiddeti (A/m) gibi farklı birimler ile tanımlanabilir. Bu büyüklüklerin hiçbiri, alanların biyolojik dokular ile ne kadar etkileştiği konusunda araştırmacıya yeterli bilgi sağlamaz¹²⁷.

Sonuç olarak elektromanyetik alanın biyolojik sistemler ile etkileşiminin belirlenmesinde en uygun parametrenin ne olduğu sorusu akla gelmektedir. Bu konu ile ilgili olarak Schwan tarafından 1971 de doku içindeki indüklenmiş akım yoğunluğunun kullanılması önerilmiştir. İç elektrik alan şiddetinin kullanılması da başka bir alternatiftir. Eskiden, absorblanmış güç yoğunluğunu (AGY) ;

$$AGY = \frac{\sigma |E|^2}{2} \quad (\text{W/m}^3) \quad (3)$$

kullanan birçok araştırmacı günümüzde SAR olarak bilinen, doz oranını kullanmaktadır¹³⁰. Formülde σ iletkenliği, E Elektrik alanı temsil etmektedir. Doz oranı, Ulusal Radyasyondan Korunma ve Ölçüm Konseyi (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP) tarafından resmi olarak SAR adıyla belirtilmiştir (NCRP, 1981). Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standards Institute, ANSI), temel dozimetri parametresi olarak RF maruziyet güvenlik standardı için SAR'ı benimseyen ilk kuruluştur (ANSI, 1982). Kütle yoğunluğu ρ , hacmi V olan bir ortam için SAR, küçük bir kütle elemanı (dm) tarafından soğrulan (kütle içinde harcanan) EM enerji elemanının (dW) zamana göre türevi olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül ile gösterilmektedir.

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (4)$$

SAR'ın birimi Watt/kilogram'dır. Hayvan türleri ve insan arasında anlamlı bir kıyaslama yapabilmek için SAR'ın değişik doku ve vücut bölgelerinde üç boyutlu analizinin yapılması ve uzaysal dağılımının tespiti gereklidir.

Tüm vücut ortalama SAR değeri, elektromanyetik alana maruz kalan biyolojik nesnenin tamamındaki, uzaysal ortalama SAR değerini temsil eden tek bir SAR değeri olarak tanımlanmaktadır.

Yerel SAR değeri ise, EM alana maruz kalan biyolojik objenin bir kısmındaki SAR değerinin büyüklüğüdür. Örneğin insanda mikrodalga-ilaç etkileşiminin davranışa etkilerinin tespiti ve yapılacak risk değerlendirmesinde bütün vücut SAR değeri yerine deney hayvanlarının beyin ve omurilikteki yerel SAR değerlendirmesinin daha uygun bir parametre olabileceği düşünölmektedir¹²⁷.

Elektromanyetik alan ile biyolojik sistem etkileşimini belirlemede indüklenmiş elektrik alan, indüklenmiş akım ya da SAR parametrelerinden herhangi birinin kullanımı arasında fark yoktur. Çünkü hepsi aşağıda ki denklemler ile iliřkilidir¹²⁷:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad (\text{W/kg}), \quad (5)$$

Bu eşitlikte E, doku içinde indüklenen rms elektrik alan (V/m), ρ kg/m³ cinsinden doku yoğunluğu, σ dokunun Siemens/metre cinsinden iletkenliğidir. Bu eşitlikten E alan;

$$E = \left(\frac{\rho}{\sigma} SAR \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

olarak elde edilir.

Akım yoğunluğu $J = \sigma E$ olmak üzere, $E = \frac{J}{\sigma}$ 'dur. Bu ifadede E alan için, 6 numaralı eşitlik kullanıldığında,

$$\frac{J}{\sigma} = \left(\frac{\rho}{\sigma} SAR \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\sigma^2 \rho}{\sigma} SAR \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$J = (\sigma \rho SAR)^{\frac{1}{2}} \quad (A/m^2), \quad (8)$$

Akım yoğunluğu SAR cinsinden bulunmuş olur.

Burada dikkat edilmesi gereken konu, eğer E alanın pik değeri kullanılıyorsa 5 numaralı SAR denkleminin sağ tarafındaki E^2 belirtilen kısım, kesinlikle $\frac{1}{2}$ faktörü ile çarpılmalıdır^{127,129}.

RF alana maruz kalan nesneye kısmi oranda enerji transfer edilerek sıcaklıkta bir artış oluşabilmektedir. Dolayısıyla dokuda ya da in vitro kültür ortamında SAR'ı belirlemede yaygın olarak kullanılan tekniklerden biri de bu sıcaklık değişiminin ölçümü olmuştur. SAR ile sıcaklık artışı arasındaki ilişki;

$$SAR = \frac{c_H \Delta T}{\Delta t} \text{ 'dır. } (W/kg) \quad (9)$$

Burada c_H , J/kg °C cinsinden dokunun özgül ısı kapasitesi; ΔT , °C cinsinden dokudaki sıcaklık artışı; Δt , saniye cinsinden maruziyet süresini belirtmektedir.

İlk olarak Mittleman ve ark. 1941 de sıcaklık ölçümünü kullanarak RF enerji absorpsiyonunu belirlemişlerdir¹³⁵. Başlangıçta birim olarak Watt/litre kullanılmıştır fakat daha sonra Cogan ve ark. (1958) bu birimi Watt/kg olarak değiştirmişlerdir¹³⁶. SAR'ın sıcaklık farkından yola çıkarak hesaplanması, gözlenen biyolojik etkinin termal orijinli bir mekanizmadan kaynaklandığını göstermez. Ayrıca dielektrik özellikler sıcaklık ile değiştiği için, biyolojik dokular ve modeller maruziyet deneyleri

sırasında mutlaka soğutulmalıdırlar. Bu nedenle RF alana maruz kalan in vivo ve in vitro nesnelere biyolojik etki çalışmalarından önce, çalışma esnasında ve çalışma sonrasında mutlak sıcaklık değerleri ve dağılımının, kaydedilmesi gerekmektedir. İn vitro çalışmalarda termal gradyan ve sıcaklık dağılımı özellikle kritiktir. Sıcaklık ancak sabit sıcaklıktaki banyolar yardımıyla kontrol edilebilir¹²⁷.

SAR ölçümü için genellikle 3 temel prensipten yararlanılır¹²⁹:

- İç E alan değerinin ölçümü, bu amaçla E alan probu ile iç alan değerleri ölçülür ve 5 numaralı SAR denkleminde yerine konularak SAR değeri elde edilir.
- Alan maruziyetinden kaynaklı sıcaklık değişiminin ölçümü, bu amaçla termal prob, kalorimetrik ve termografik yöntemler kullanılabilir.
- Diğer yöntem ise uygun bir ortamda gelen güç ile saçılan güç arasındaki farktan absorblanan gücün eldesine dayanır.

Temel dozimetri parametresi olarak hangi parametrelerin kullanıldığı önemli olmayıp asıl önemli olan maruziyetten kaynaklı dokudaki EM alanının belirlenmesidir. Bu parametreler arasında SAR, ölçüm birimi olarak EM alanların medikal uygulamaları ve biyolojik etkilerini çalışan araştırmacılar tarafından yaygın olarak kabul görmektedir. EM alana maruz kalmış bir nesnenin içerisindeki alanın veya enerjinin miktarı ölçülmeden çeşitli hayvan türlerinden ve farklı EM maruziyet parametrelerinden elde edilen araştırma sonuçlarının karşılaştırılması zordur. Ayrıca sadece dış alan değerlerini bilip, iç alan değeri bilinmeden RF maruziyet güvenlik standartlarını geliştirmek için biyolojik etki araştırma sonuçlarının insana ekstrapolasyonu da mümkün değildir¹²⁷.

2.4.3. Dokulardaki Enerji Absorpsiyonunu Belirleyen Faktörler

2.4.3.1. Dielektrik Özellikler

EM alanların biyolojik dokular içerisindeki uzaysal dağılımı ve büyüklüğü dokuların dielektrik özelliklerine bağlıdır. Dokuların dielektrik sabiti ve iletkenlik gibi dielektrik özellikleri baskın olarak su içeriği tarafından belirlenir. Yüksek su içeriği olan dokular göz, kas, deri, karaciğer, böbrek; orta miktarda su değeri içeren beyin, akciğer ve kemik iliği ve düşük su içeriği olanlar yağ ve kemik'tir. Dokuların dielektrik özellikleri, frekans ve sıcaklığa bağlı olarak da değişim göstermektedir. Frekans arttıkça, dielektrik sabiti ϵ düşerken, σ iletkenlik değeri yükselir^{127,129}.

2.4.3.2. Doku Geometrisi ve Boyutu

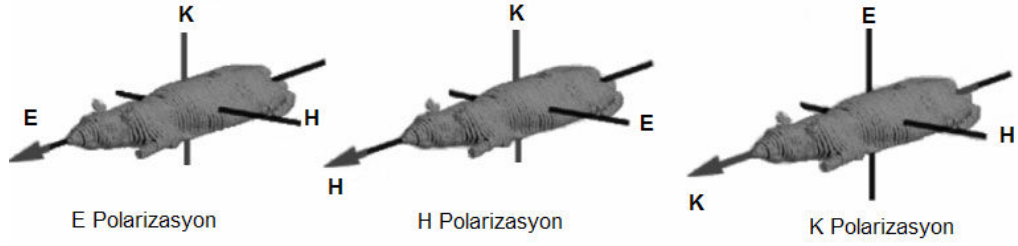
Dış elektromanyetik alana maruz kalan bir nesnede en yüksek yerel SAR değeri ya yüzeyde ya da yüzeye yakın bir bölgededir. Eğimli yüzeylerde ve çeşitli bölgelerde yüksek SAR değerleri (Hot Spot) gözlenebilir. İnsan vücudu gibi kompleks bir biyolojik sistem birçok doku katmanından oluşur. Her katmanın farklı dielektrik özellikleri vardır ve bu nedenle EM sınır oluştururlar. RF alana maruz kalındığı zaman, alan çok katmanlı nesnenin içinde yayılır. Enerjinin bir kısmı her sınırdaki yansıma uğrar, diğer kısmı ise sonraki doku içerisinde iletilir. Her sınırdaki iletilen ve yansıyan enerjinin miktarı dokuların dielektrik özelliklerinin farkına bağlıdır. Yağ dokusunun kalınlığı, dokunun eğim derecesi ve biyolojik sistemin boyutu, enerji dağılımını etkiler¹²⁷.

2.4.3.3. Doku Yönelimi ve Alan Polarizasyonu

Deneyel olarak Gandhi'nin 1977 de, teorik olarak ise Durney'in 1978 de gösterdiği üzere homojen dış E alana maruz kalan bir nesnede maksimum SAR değeri vücudun uzun eksenine paralel olduğu zaman elde edilebilmektedir. Örneğin elipsoidal bir rat fantomu 10 MHz E alana maruz bırakıldığında, E alanının rat modelinin uzun eksenine paralel olması ile rat modelinin uzun eksenine dik olması durumları arasında ortalama SAR değeri 20 katlık bir değişim göstermektedir. Bu örnek, bu frekans değeri için, serbest şekilde hareket edebilen bir sıçanın sabit güç yoğunluğundaki RF E alan maruziyetinde, alan ya da vücut yönelimine bağlı olarak, enerji etkileşiminin 20 kat değişebileceğini açıkça göstermektedir. Farklı frekanslar için oranlar farklıdır^{127, 129, 137}.

Meltz ve arkadaşları tarafından doku kültür flasklarındaki yönelimin SAR değerine etkisi incelenmiş ve antenin uzun eksenine bağlı olarak; flaskların maruziyet pozisyonunun, su banyosu içerisinde flaskların sabit ya da devamlı dönerek EM alana maruz kalmasının, flasktaki kültürün hacim ve derinliğinin SAR değerini etkilediği tespit edilmiştir¹³⁸.

Gelen EM alanın, maruz kalan nesneye göre yönelimi, nesnenin içindeki alan şiddetini kuvvetli şekilde etkilemektedir. Bu yönelim gelen alanın polarizasyonu olarak tanımlanır (Şekil 1). Gelen E alan vektörünün, H alan vektörünün ya da k dalga yayılım vektörünün vücudun uzun eksenine paralel olması durumuna göre sırasıyla E polarizasyonu, H polarizasyonu ve k polarizasyonu olarak adlandırılmaktadır¹²⁹.



Şekil 1: E, H ve K polarizasyonları (Gabriel; 2005).

Gelen E alan vücudun uzun eksenine paralel olduğunda dik durumdakine göre daha yüksek SAR değeri elde edilirken, H alan için maksimum SAR değeri vücudun uzun eksenine dik olduğu durumda elde edilmektedir. Dolayısı ile en yüksek SAR değeri E polarizasyon durumunda elde edilirken, sırası ile k ve H polarizasyonlarında giderek azalan SAR değerleri elde edilir¹²⁹.

2.4.3.4. Alan Frekansı

Frekans bağımlı dielektrik özelliklere ek olarak, iç alanların şiddeti ve uzaysal dağılımı da frekans ile değişim göstermektedir. Örneğin 100-10000 MHz aralığında sabit şiddetli maruziyette, küresel kafa modelindeki yerel SAR değerleri hesaplanmış ve maksimum yerel SAR değerlerinin frekansa bağlı olarak 100 kattan fazla değiştiği bulunmuştur¹³⁰. Küresel kafa modelleri için ortalama SAR'ın frekansla değişimi hesaplandığında, düşük frekanslarda ortalama SAR değerinin frekansın karesi ile, orta frekanslarda, frekansla doğru orantılı olarak değiştiği ve rezonans frekansında maksimuma ulaştığı tesbit edilmiştir¹³⁹. Diğer teorik çalışmalarda elipsoidal modellerin maruziyetinde, absorpsiyonun frekansın karesi ile orantılı arttığı hesaplanmıştır. Yerel SAR maksimum değerine, aynen tüm vücut rezonansında olduğu gibi, özel frekans değerlerinde ulaşmaktadır. Rezonans, RF dalgasının E alan bileşeni elipsoid şekilli vücudun uzun eksenine paralel yayıldığı ve vücudun boyu gelen dalganın dalga boyunun %40'ına eşit olduğunda maksimum soğurulmanın gerçekleştiği durumdur^{127,129}.

Biyolojik nesnelere boyut farklılıkları nedeni ile aynı frekanslı bir dış alana maruziyeti, her canlıda aynı iç EM alan değerlerini oluşturmamaktadır. Canlılar arasındaki iç alan değerleri, frekans ekstrapolasyonu denen yöntemle, gelen radyasyonun frekansının, canlıların boyutları ile ters orantılı olarak, iç alan değerleri eşitlenebilir. Örneğin f , EM alan frekansı, L ise canlının uzunluğu olmak üzere, 20 cm'lik bir farenin 2450 MHz deki maruz kaldığı iç alan değerini 175 cm'lik bir insan da edebilmek için;

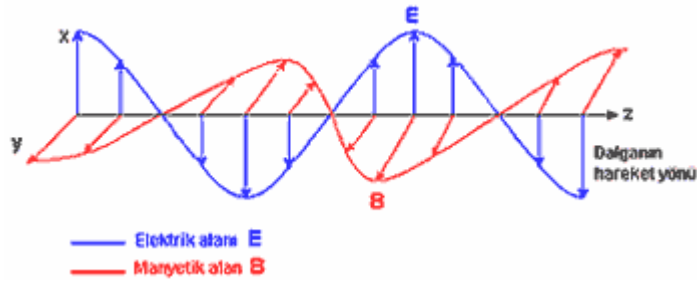
$$f_{insan} \cdot L_{insan} = f_{fare} \cdot L_{fare} \quad (10)$$

$$f_{insan} = f_{fare} \cdot \frac{L_{fare}}{L_{insan}} = 2450 \cdot \frac{20}{175} = 280 \text{ MHz}$$

yaklaşık olarak 280 MHz frekanslı alan uygulamak gerekmektedir. Fakat bunun bir yaklaşım olduğuna ve frekansla değişim gösteren dokuların dielektrik özelliklerinin dikkate alınmadığına dikkat etmek gerekir. Ayrıca iç alan değerleri aynı olsa bile radyasyon deseni farklılık gösterecektir¹²⁹.

2.4.3.5. Kaynak Konumu

Uzak alan, düzlem dalga maruziyet alanını açıklayan bir terimdir. Bir düzlem dalga, uzayda homojen ve birbirlerine dik olan elektrik ve manyetik alanlar ile tanımlanır.



Şekil 2: Düzlem Dalga

Uzak alan genellikle ışıma yapan kaynaktan $2D^2/\lambda$ uzaklıkta başlar. Burada D, ışıma yapan yapının en uzun boyutu, λ ise EM alanın havadaki dalga boyudur. Uzak alanda polarizasyon hariç SAR kaynağın konfigürasyonundan bağımsızdır. Fakat yakın alanda, $2D^2/\lambda$ daha yakın mesafede, enerji iletimi kaynağın şekline ve boyutuna bağlıdır¹⁴⁰. Cep telefonu gibi RF alan kaynağına maruz kalan homojen modeldeki SAR değeri birincil olarak RF manyetik alan tarafından indüklenmiş akım ile ilgilidir¹⁴¹.

2.4.3.6. Maruziyet Ortamı

RF alan içerisindeki vücutta absorblanan enerjinin miktarı vücudun boşlukta ya da topraklanmış yerde bulunmasına, yakınında metal yansıtıcıların ya da elektriksel iletkenliğe sahip yapıların olması gibi çeşitli çevresel faktörlere de bağlıdır¹⁴². Aynı kafes içinde birden fazla hayvan ya da farklı nesnelerin bulunması, saçılan enerji nedeni ile her hayvanın

aldığı SAR'ın değişmesine neden olabilir. Ağız ya da burun teması olan noktalar hayvanlar arasındaki yüksek indüklenmiş akım nedeni ile hot spot'lar oluşturabilir. Metal implantlar ise doku içerisindeki SAR'ın şiddetinin ve deseninin değişimine neden olabilir. Metal elektrottaki E alan şiddeti elektrotun uzunluğuna, çapına ve frekansa bağlı olarak değişim gösterir (NCRP, 1981). Örneğin nörolojik kayıtlar için kedinin beyni içine yerleştirilen ince metal elektrodun pik SAR değerini 50 kat arttırdığı tespit edilmiştir^{127,130}.

2.4.3.7. Zaman ve Şiddet Faktörleri

Dokuda toplam absorblanan enerjinin bulunmasında dış alan şiddeti ve maruziyet süresi önemli parametrelerdir. RF alan, genlik ya da darbe modülasyonlu olduğunda SAR da buna bağlı olarak zamanla değişim gösterir. Örneğin darbeli MW maruziyette duyulan ses algısı tek bir darbe (puls) ile bile gerçekleşebilmektedir^{143,144}. Bu nedenle maruziyeti tanımlamak için zamanda ortalaması alınmış SAR'ı kullanmak uygun değildir. Onun yerine her bir darbe için özgül soğurma'nın hesaplanması daha uygun bir ölçümdür.

Doz ya da özgül soğurma (Specific Absorbtion, SA) dış EM alanlara maruz kalmış biyolojik bir nesne içinde verilen bir kütle tarafından absorblanmış enerjinin toplam miktarı olup, birimi Joule/kg'dır. Herhangi bir etkinin gözlemlendiği SAR değeri ile ilişkili olarak, modülasyon karakteristiğinin de belirtilmesi gereklidir. Ayrıca SAR RF alan maruziyeti sırasındaki hayvanların hareketine bağlı olarak da zamanla değişim gösterir. SAR'ı sabit tutmak için deney hayvanı sabitlendiğinde ise stres nedeni ile biyolojik verilerde bozulma gözlenebilmektedir. Kafes içinde serbestçe hareket edebilen hayvanların maruziyeti ile¹⁴⁵ ya da dairesel polarizasyonlu dalga kılavuzlarının içinde, SAR seviyeleri bağlı olarak dar bir aralıkta kontrol edilebilmektedir^{146,147}.

Sonuç olarak dozimetri, RF alanların biyolojik sistemler ve türler üzerindeki etkisini değerlendirmeye yönelik bilimsel çalışmaların önemli bir parçasıdır. Dış alan maruziyet dataları yerine, değerlendirme esnasında, maruz kalan nesnedeki RF alan miktarını belirten SAR daha çok önem taşımaktadır. Tek bir frekans için bile SAR'ın doğru tespiti karmaşık bir iştir.

2.5. Dokuların Dielektrik Özellikleri

EM alan maruziyetinden kaynaklı biyolojik materyal içinde oluşan alan dağılımını belirleyebilmek için, bütün dokuların dielektrik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Materyallerin dielektrik özellikleri, kompleks bağıl dielektrik katsayıları ölçülerek elde edilir¹⁴⁸.

Biyolojik dokular kayıplı ve manyetik olmayan dielektrikler olarak tanımlanabilirler. Kayıplı materyaller uygulanan alandaki gücün önemli bir kısmını absorplayan materyallerdir. Manyetik materyaller ise uygulanan manyetik alan tarafından yönlendirilen manyetik dipollere sahiptirler. Manyetik dipollerin hareketi sonucunda bir akım üretilir bu da yeni E ve B alanların oluşmasına sebep olmaktadır. Manyetik geçirgenlik, μ , manyetik alana maruz kalan bir materyalde ne kadar manyetizasyonun meydana gelebileceğini gösteren bir göstergedir. Kompleks manyetik geçirgenlik:

$$\mu^* = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\mu' - j\mu'') \quad (11)$$

olmak üzere burada μ^* kompleks geçirgenliği, μ_0 boşluğun geçirgenliğini ve μ_r bağıl geçirgenliği belirtmektedir. Böylece bağıl manyetik geçirgenliği 1 olan biyolojik dokunun, kompleks bağıl dielektrik sabiti:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon' - j\varepsilon'') = \varepsilon_0 \left(\varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \quad (\text{F/m}) \quad (12)$$

en basit hali ile bu şekilde gösterilir. Burada ε' materyalin bağıl dielektrik sabiti, ε'' bağıl dielektrik sabitinin sanal kısmı olup dielektrik kayıp ya da kayıp faktörü olarak bilinir, σ iletkenlik, ε_0 boşluğun dielektrik sabiti, ω ise alanın açısal frekansıdır. SI birim sisteminde iletkenliğin birimi Siemens/metre, ε_0 birimi Farad/metre, ω ise radyan/saniyedir. Dielektrik sabiti ε , boşluğa kıyasla dokunun elektrik depolama kapasitesi ya da başka bir deyişle uygulanan E alan sonucunda ne kadar polarizasyon olacağını bir göstergesidir. İletkenlik (σ) ise basitçe, alan ile yüklerin taşınımının bir ölçüsüdür^{129,149}. Eşitlik 12'nin sanal kısmı (ε''), statik iletkenlik (σ) ve frekans ile değişen ω ile açıklanmaktadır. Frekansa bağımlı dielektrik sabitinin daha genel hali ise Debye denklemi ile verilir¹⁵⁰:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma_s}{\omega \varepsilon_0} \quad (13)$$

burada τ relaksasyon (durulma) zamanı, ε_s statik dielektrik sabiti ($\omega\tau \ll 1$ için dielektrik sabiti), ε_∞ yüksek frekanslardaki dielektrik sabitidir ($\omega\tau \gg 1$

için dielektrik sabiti), σ_s statik iyonik iletkenlik ve ϵ_0 ise boşluğun dielektrik sabitidir. Su ve alkol gibi polar sıvılarda relaksasyon olgusu, elektrik alan tarafından moleküller yeniden yönlendirilirken, elektriksel olarak polarize moleküllerin mekanik olarak durağanlığından ya da diğer bir deyişle moleküler polarizasyondaki gecikmeden kaynaklanmaktadır.

Dielektrik relaksasyon materyalin dielektrik sabitindeki anlık gecikmedir. Bu durum 13 numaralı relaksasyon denklemi ile tanımlanmıştır. Su içerisindeki organik maddelerin karışımı ve seyreltik süspansiyonu olarak tarif edebileceğimiz biyolojik dokular çoklu relaksasyon debye denklemi ile daha iyi tanımlanmaktadır¹⁵⁰:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty - j \frac{\sigma_s}{\omega \epsilon_0} + \sum_i \frac{\Delta \epsilon_i}{1 + j \omega \tau_i} \quad (14)$$

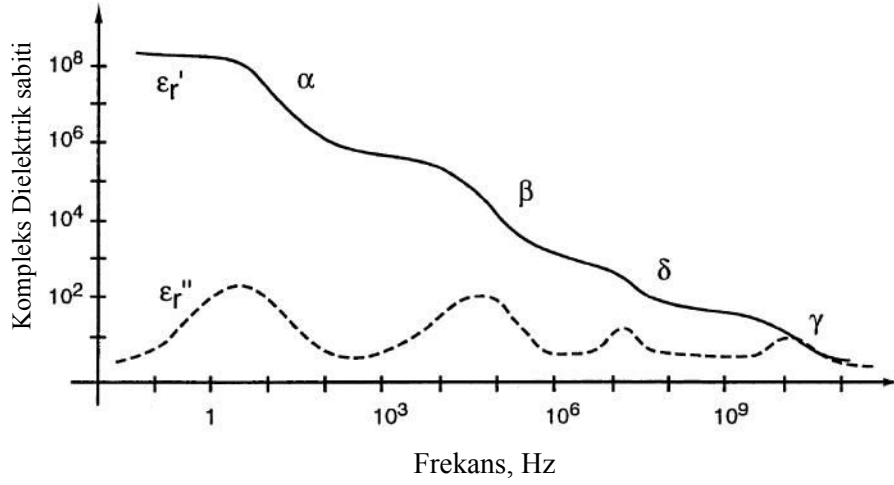
Debye dağılımının deneysel olarak düzeltilmiş hali Cole-Cole dispersiyonudur. Gözlenen dataları çoklu relaksasyon denklemindeki $j \omega \tau_i$ terimi ile daha uyumlu hale getirmek için, α_i küçük pozitif bir kesir olmak üzere, bu terimin $(1 - \alpha_i)$ üssü alınmış halidir¹⁵⁰:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty - j \frac{\sigma_s}{\omega \epsilon_0} + \sum_i \frac{\Delta \epsilon_i}{1 + (j \omega \tau_i)^{(1 - \alpha_i)}} \quad (15)$$

Biyolojik dokuların dielektrik özellikleri, hücresel ve moleküler seviyede EM radyasyon ile etkileşimi ile ilişkilidir ve elektriksel özellikleri frekansla birbirinden bağımsız 3 ayrı adımla değişim gösterir¹⁴⁸⁻¹⁵². Bunlar Alfa, Beta ve Gama olmak üzere sırasıyla frekansla artan 3 ayrı dağılım (dispersiyon) ile karakterize edilir^{150,153}. Polarizasyon yüksek frekansta E alanı takip edemez, bu nedenle dielektrik sabiti frekansa bağımlılık göstermektedir. Bu bağımlılık ise dielektrik dispersiyon olarak adlandırılır.

Tablo 1: Dispersiyonlar ve gözlenen frekans aralıkları

Dispersiyon	Frekans Aralığı (Hz)
α	$1 - 10^4$
β	$10^4 - 10^8$
δ	$10^8 - 10^9$
γ	$2 \cdot 10^{10}$



Şekil 3: Dokular için idealleştirilmiş dispersiyon bölgeleri.

2.5.1. Alfa Dispersiyonu

Alfa dispersiyonunun keşfi büyük sürpriz olmuştur. İlk olarak 1948 de kas dokusunda, birkaç yıl sonra ise koloidal süspansiyonlarda gösterilmiştir. Alfa dispersiyonuna çeşitli mekanizmalar katkı sağlamaktadır. En iyi bilinen üçü:

- Koloidal solüsyonlarla yapılan çalışmalarda, yüzey iletkenliklerinin ve kapasitanslarının frekans bağımlı oldukları ve büyük çoğunlukla yüklü hücre yüzeyi yakınındaki ters atmosferin varlığından kaynaklanmaktadır^{149,151}. Başka bir deyişle Alfa dispersiyonu hücre içerisindeki sarkotübülar sistem ile kombine hücre membranının polarizasyonlarının ters oluşundan kaynaklanır ve 1 kHz civarı ve altındaki frekanslarda meydana gelir¹⁵⁰.
- Kas dokusundaki sarkoplazmik retikulumun varlığı güçlü α dispersiyonlarının birincil sorumlusu olarak görülmektedir.
- Frekansla değişen iletkenliğe sahip protein kanalları içeren hücre membranlarının da sorumlu olduğu düşünülmektedir. Bu Hodgkin-Huxley denklemlerinden tahmin edilmektedir.

Alfa dispersiyonun çok iyi anlaşılmasının birkaç nedeni vardır¹⁵¹:

- Zıt atmosferler ile ilgili teoriler, dispersiyonun birçok hücresel sistemde gözlenenenden daha düşük frekanslarda meydana geleceğini öngörmektedir.

- b. Tübular sistemleri içermeyen yüksek su içerikli birçok doku benzer düşük frekans dispersiyonları göstermektedirler. Ayrıca E. Coli süspansiyonları çok yüksek düşük frekans dielektrik sabitleri göstermektedirler, bu dokular ile tamamen kıyaslanabilir. Böylece bu etki sadece kas dokusundaki tubular sistem gib sistemler ile açıklanamaz.
- c. Kanal kondüktans etkilerinin, alfa etkilerinin gözlemlendiği frekanslardan daha düşük olduğu saptanmıştır.
- d. E. Coli gibi diğer birçok hücrede önemli etkiler gözlenmesine rağmen, Eritrosit gibi bazı hücrelerde alfa etkisi gözlenmemiştir.

2.5.2. Beta Dispersiyonu

Bu dispersiyon genellikle 0,1-10 MHz aralığında gerçekleşir. Bu olayın mekanizması ilk olarak Fricke ve K.S. Cole tarafından analiz edilmiştir^{151,154}. Beta relaksasyonu hücre içi ve hücreler arası sıvıların arasının, yalıtkan hücre membranı ile ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Hücre membranı boyunca iletimin artması nedeni ile bu relaksasyonun sonucunda dielektrik sabitinde büyük bir azalma ve iletkenlikte artış gözlenir¹⁵⁰. Teorinin geliştirilmesi ve membran kapasitansı, hücre içi ve dışındaki sıvı direnci gibi hücresel parametrelerde, AC biyoimpedans ölçümleri ile büyük sayıdaki hücre süspansiyonlarına uygulanması Carstensen, Hanai ve Schwan tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu etki doku ve hücre süspansiyonlarının homojen olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Bu tarz etkiler Maxwell DC durumları ele aldığından ve Wagner'in bunu AC ye genişlettiğinden beri Maxwell-Wagner etkileri (arayüzey ya da yüzeyleyarası etkiler) olarak isimlendirilirler.

Beta dispersiyonunda üst üste binmeler, hücrelerden ve beta dispersiyonunun katkıda bulunan diğer etkilerden kaynaklanır.

- a. Protein ve amino asitlerden kaynaklanan relaksasyon etkilerinden
- b. Özellikle hücre çekirdeği ve mitokondri gibi hücre içi organellerden kaynaklı daha küçük Maxwell-Wagner katkılarından

2.5.3. Gama Dispersiyonu

Gama etkisine çeşitli doku ve protein solüsyonlarında 1 GHz üstünde rastlanmıştır¹⁵¹. Bu etki 20 GHz civarında yüksek su içeriği olan doku ve hücrelerde suyun relaksasyonundan kaynaklı beklenmedik bir etki değildir. Ayrıca yardımcı zayıf bir dispersiyon etkisi de (Delta dispersiyonu)

proteine bağılı sudan kaynaklanmaktadır. Bu su 100 MHz'den bazı GHz lere kadar dispersiyonun geniş bir spektrumunda gözlenmiştir. Muhtemelen amino asitlerden ve proteinlerin polar alt gruplarından kaynaklı küçük katkılar ile üst üste binmektedirler. Gama dispersiyonun niceliği (miktarı) iyi bilinmektedir. Normal suyun, proteinler yakınındaki küçük bir kısmı hariç doku suyu ile aynı olduğu, dielektrik datalardan açıktır^{149,151}. Delta ve gama relaksasyonları doku içerisindeki suyun sırasıyla 2 ve 20 GHz civarında dipolar relaksasyonundan kaynaklanır. Mobil iletişim frekansı olan 900 ve 1800 MHz de bütün dokular Gama/Delta dispersiyonu göstermektedirler¹⁵⁰.

Biyolojik dokuların dielektrik spektrumu şöyle özetlenebilir¹⁴⁸:

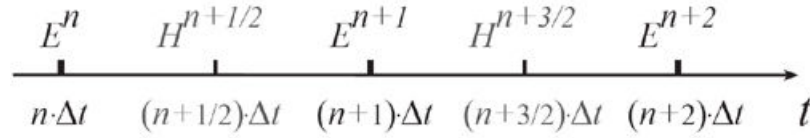
- Dokuların sahip oldukları sınırlı iyonik iletkenlikler ile doğaları, iyonik içerik ve mobiliteleri birbiri ile orantılıdır.
- Düşük frekanslardaki alfa dispersiyonu hücre membranındaki iyonik difüzyon süreci ile ilgilidir.
- Beta dispersiyonuna temel katkı 100 kHz ler civarında hücre membranının polarizasyonundan yani hücre içindeki ve dışındaki ortamlar arasında bir bariyer gibi davranarak iyon akışını engellemesinden gelir. Beta dispersiyonuna gelen diğer katkıları ise protein ve diğer organik makro moleküller sağlar.
- Dokunun dielektrik sabiti 100 Hz altında frekanslarda 10^6 ve 10^7 Farad/metre değerlerine ulaşmaktadır.
- Gama dispersiyonu su moleküllerinin polarizasyonundan kaynaklanır ve gigahertz bölgesindedir.

2.6. FDTD Yöntemi

Zaman Uzayında Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain, FDTD) metodu, Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman ve konum uzayında sayısallaştırılmasına dayanan bir yöntemdir. Bu metoda göre Amper ve Faraday yasalarının diferansiyel hali, merkezi fark eşitlikleri kullanılarak doğrudan zaman ve konum uzayında sayısallaştırılmaktadır¹⁵⁵. Kane S. Yee tarafından 1966 da önerilen bu metotta hesap uzayı, boyutları $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ olan, toplam $N_x \times N_y \times N_z$ tane FDTD hücresine ayrılmaktadır. İstenilen zaman süresince her hücrede, farklı yerlerde konumlandırılmış ve aralarında zaman farkı bulunan, üç E alan ve üç H alan bileşeni hesaplanmaktadır. Hesap süresi (T); n tamsayı zaman adımı ve Δt hesaplama zaman aralığı olmak üzere,

$$T = n \times \Delta t \quad (1)$$

ile bulunur. Hesaplama bitinceye kadar, her hücrede bütün bileşenler için hesaplar sırasıyla bir E alan bir H alan (Leapfrog manner) olmak üzere güncellenmektedir (Şekil 4)^{156,157}.



Şekil 4: FDTD Hesaplama sıralaması

Yee notasyonu ile hesap uzayındaki herhangi bir hücrenin uzay-zaman örgüsü üzerindeki gösterimi, u herhangi bir fonksiyon olmak üzere aşağıdaki gibidir¹⁵⁸:

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad i, j, k \text{ ve } n \text{ tamsayı} \quad (2)$$

u fonksiyonunun alt simgedeki i, j, k terimleri sırasıyla x, y, z konumlarındaki hücre numaralarını ve konumdaki değişimi belirtmektedir. u fonksiyonunun üst simgedeki n terimi ise zaman adımını, dolayısıyla zamanı belirtmektedir.

Yee hücresinde E hücre kenarlarında, H ise hücre yüzeyinde konumlandırılmıştır.

Maxwell denklemlerinden, zamana bağlı Amper ve Faraday yasaları, uzayın belirli bir noktasında ve anında elektrik ve manyetik alan değerlerini birbirine bağlar:

$$\text{Amper Yasası} \quad \frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \times H - J \quad (3)$$

$$\text{Faraday Yasası} \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E - M \quad (4)$$

Burada B manyetik akı yoğunluğunu, E elektrik alanı, D elektrik akı yoğunluğunu, H manyetik alanı, J elektrik akım yoğunluğunu, M eşdeğer manyetik akım yoğunluğunu temsil etmektedir.

Elektrik ve Manyetik akı yoğunlukları lineer, izotropik, dağıtıcı olmayan (nondispersive); yani alandan, yönden ve frekanstan bağımsız özellikte malzemeler için aşağıda verilmiştir:

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \quad (\text{Coulomb/m}^2) \quad (5)$$

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (\text{Weber/m}^2) \quad (6)$$

Elektrik akım yoğunluğu J'nin ve eşdeğer manyetik akım yoğunluğu M 'nin, E ve H alan enerjisinden bağımsız kaynak gibi davranabileceğine dikkat edilmelidir. İzotropik, ısı enerjisine dönüşüm nedeni ile zayıflayan E ve H'tan kaynaklı dağıtıcı olmayan elektrik ve manyetik materyaller için J ve M;

$$J = J_{kaynak} + \sigma E \quad (\text{A/m}^2) \quad (7)$$

$$M = M_{kaynak} + \sigma^* H \quad (\text{V/m}^2) \quad (8)$$

bu eşitlikler ile belirtilmektedir. Burada σ Simens/m cinsinden elektriksel iletkenliği, σ^* ise ohm/m cinsinden eşdeğer manyetik kaybı temsil etmektedir. Yee, zamana bağlı Maxwell eşitliklerini kayıpsız materyaller ($\sigma^* = 0$ ve $\sigma = 0$) için hesaplamıştır. Eşitlik 3 ve 4'te; 5, 6, 7 ve 8 numaralı eşitlikler yerine konulduğunda, aşağıdaki 9 ve 10 numaralı eşitlikler elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times H - \frac{1}{\varepsilon} (J_{kaynak} + \sigma E) \quad (9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E - \frac{1}{\mu} (M_{kaynak} + \sigma^* H) \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve 10'un, kartezyen koordinat sisteminde vektör bileşenleri yazıldığında ise aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (J_{kaynak_x} + \sigma E_x) \right] \quad (11a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - (J_{kaynak_y} + \sigma E_y) \right] \quad (11b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (J_{kaynak_z} + \sigma E_z) \right] \quad (11c)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - (M_{kaynak_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (12a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - (M_{kaynak_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (12b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - (M_{kaynak_z} + \sigma^* H_z) \right] \quad (12c)$$

Elde edilen bu 6 eşitlik EM dalganın cisimler ile üç boyutlu etkileşimini içeren FDTD algoritmasının temelini oluşturmaktadır. Bu eşitlikler, aşağıda belirtilen 2. dereceden doğruluğa sahip merkezi fark denklemleri kullanılarak konum ve zamanda ayrıklaştırılıp düzenlenerek istenilen iteratif eşitlikler elde edilebilmektedir¹⁵⁸⁻¹⁶⁰.

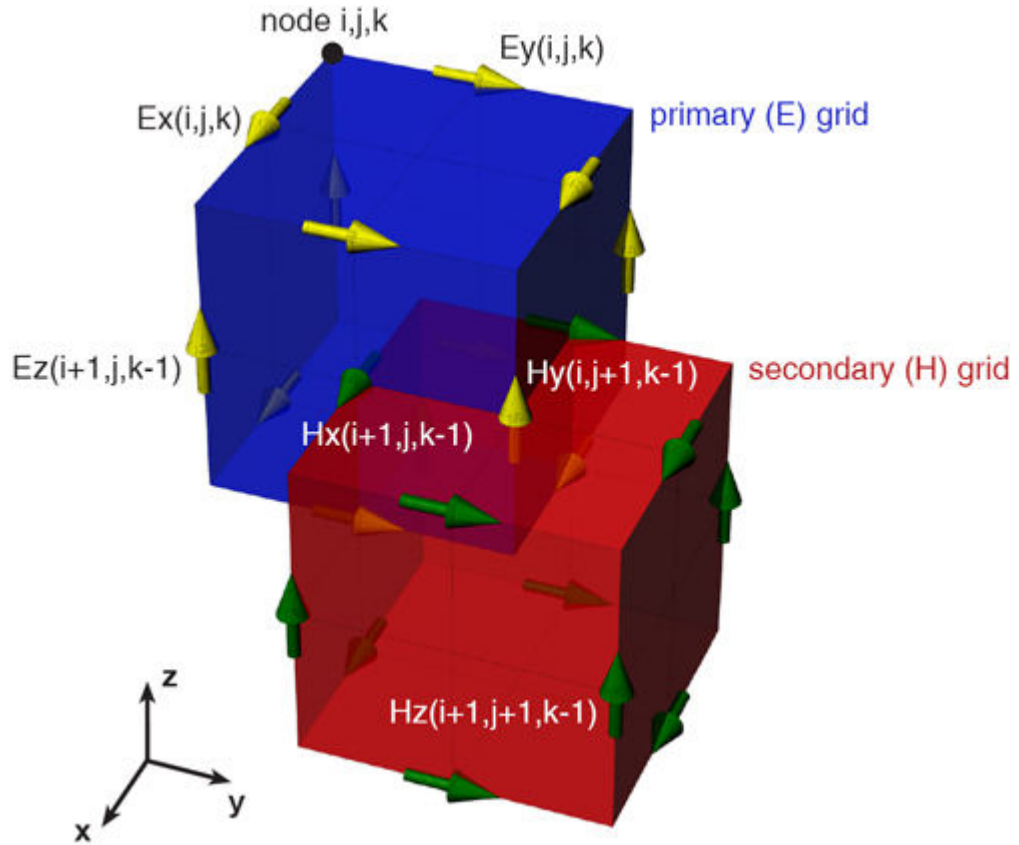
$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (13a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j+1/2,k}^n - u_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + O[(\Delta y)^2] \quad (13b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k+1/2}^n - u_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} + O[(\Delta z)^2] \quad (13c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k}^{n+1/2} - u_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (14)$$

Eşitlik 13 ve 14'deki, u fonksiyonu E ya da H alanı, $O[(\Delta...)^2]$ terimler ise hata terimlerini belirtmektedir. Burada u fonksiyonunun i alt simgesindeki $\pm 1/2$ değişim, x ekseninde $\pm \Delta x/2$ farka karşılık gelmektedir. Yee bu notasyonu, uzay örgüsünde E ve H bileşenlerini $\Delta x/2$ aralıkla kullanabilmek amacıyla seçmiştir. Böylece örneğin x ekseninde, uzay örgüsü üzerinde birbirine komşu iki H ya da iki E bileşeni arasında ki mesafe Δx kadar olurken, birbirine komşu E ve H bileşenleri arasındaki mesafe $\Delta x/2$ kadar olmaktadır.



Şekil 5: Birim FDTD (Yee) hücresi (Speag, 2007)

u fonksiyonunun n üst simgesindeki $\pm 1/2$ artırım, zaman ekseninde $\Delta t/2$ değişime karşılık gelmektedir. Yee zaman ile ilgili bu notasyonu zamanda $\Delta t/2$ aralıkları ile dönüşümlü olarak E ve H bileşenlerini hesaplamak için seçmiştir.

Eşitlik 11a'nın sol tarafına eşitlik 14'ü, sağ tarafına ise eşitlik 13'ü uyguladığımızda, aşağıda belirtilen eşitlik 15 elde edilecektir.

$$\frac{E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - J_{kaynak_x} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{i+1/2,j,k} E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (15)$$

Eşitlik 15 sağ tarafındaki değişkenlerde görüldüğü gibi, zaman adımı $n+1/2$ için değerlendirilmiştir ve materyal iletkenliği σ 'dan kaynaklı E_x bileşeni mevcuttur. Zaman adımı $n+1/2$ de E_x bileşenin değeri bilgisayar hafızasında tutulmadığından (sadece E_x bileşenin önceki değeri olan zaman adımı n hafızada bulunmaktadır) bu terim için bir yaklaşımda bulunulması gerekmektedir¹⁵⁸.

$$E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} = \frac{E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} + E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{2} \quad (16)$$

Eşitlik 16 basitçe E_x 'in zaman adımı $n+1/2$ deki değeri için, daha önce hesaplanmış ve hafızada mevcut olan E_x 'in zaman adımı n deki değeri ile yeni hesaplanmakta olan $n+1$ deki değeri arasında aritmetik ortalama alınmıştır. Burada, eşitlik 15'te yerine konulursa, eşitlik 17 elde edilir.

$$\frac{E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - E_x|_{i+1/2,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - J_{kaynak_x}|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \left(\frac{E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} + E_x|_{i+1/2,j,k}^n}{2} \right) \end{array} \right) \quad (17)$$

Eşitliğin her iki tarafında da $E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1}$ ve $E_x|_{i+1/2,j,k}^n$ terimleri mevcuttur. Aynı olan terimler sırasıyla eşitlik 18, 19, 20 deki adımlar uygulanarak bir araya getirilir ise eşitlik 21 elde edilir. Bu amaçla 18 numaralı eşitliğin sol tarafındaki paydada bulunan Δt terimi eşitliğin sağ tarafına geçirilir.

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - E_x|_{i+1/2,j,k}^n = \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - J_{kaynak_x}|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \left(\frac{E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} + E_x|_{i+1/2,j,k}^n}{2} \right) \end{array} \right) \quad (18)$$

Daha sonra 18 numaralı eşitliğin her iki tarafındaki aynı üst simgeli E alan değerlerini bir araya getirebilmek için ilk olarak 18 numaralı eşitliğin sağ tarafındaki E alan terimleri eşitliğin dışına çıkartılması ile eşitlik 19 elde edilir.

$$\begin{aligned}
E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n &= \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right. \\
&\quad \left. - \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right. \\
&\quad \left. - J_{kaynak_x} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \\
&\quad - \left(\frac{\Delta t \cdot \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} + \Delta t \cdot \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \right)
\end{aligned} \tag{19}$$

Eşitlik 19'un sağ tarafındaki üst simgeleri (zaman adımları) farklı olan E alan nicelikleri bir birinden bağımsız hale getirilerek eşitlik 20 elde edilir.

$$\begin{aligned}
E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n &= \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right. \\
&\quad \left. - \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right. \\
&\quad \left. - J_{kaynak_x} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \\
&\quad - \left(\frac{\Delta t \cdot \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1}}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \right) - \left(\frac{\Delta t \cdot \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \right)
\end{aligned} \tag{20}$$

Eşitlik 20'nin sağ ve sol tarafında bulunan aynı zaman adımı (üst simgeli) E alan terimleri bir araya getirilerek eşitlik 21 elde edilir.

$$\begin{aligned}
E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} + \frac{\Delta t \cdot \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1}}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} &= \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right. \\
&\quad \left. - \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right. \\
&\quad \left. - J_{kaynak_x} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \\
&\quad + \left(E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n - \frac{\Delta t \cdot \sigma_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \right)
\end{aligned} \tag{21}$$

Eşitlik 21'in sol taraftaki $E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1}$ terimi eşitlik 22 de ki işlem takip edilerek yalnız bırakılırsa, eşitlik 23 elde edilir.

$$\begin{aligned}
E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \right) &= \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \left(\frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right. \\
&\quad \left. - \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right. \\
&\quad \left. - J_{kaynak_x} \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \\
&\quad + E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}} \right)
\end{aligned} \tag{22}$$

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = E_x|_{i+1/2,j,k}^n \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}}} \right) + \left(\frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - J_{kaynak_x}|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (23)$$

Eşitlik 23 deki sabitler aşağıdaki gibi düzenlenir ise;

$$C_1 = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}}} \right) \quad \text{ve} \quad C_2 = \left(\frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i+1/2,j,k}}} \right) \quad (24)$$

Eşitlik 25 elde edilir.

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = (C_1 \cdot E_x|_{i+1/2,j,k}^n) + (C_2) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - J_{kaynak_x}|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (25)$$

Aynı işlemler E_y ve E_z için de yapıldığında eşitlik 26, 27, 28 ve 29 elde edilir.

$$E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1} = E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+1/2,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+1/2,k}}} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+1/2,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+1/2,k}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - \frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ - J_{kaynak_y} \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (26)$$

$$E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1} = \left(C_1 \cdot E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n \right) + \left(C_2 \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \\ - \frac{H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ - J_{kaynak_y} \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (27)$$

$$E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1} = E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k+1/2}}} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k+1/2}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ - \frac{H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - J_{kaynak_z} \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (28)$$

$$E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1} = \left(C_1 \cdot E_y \Big|_{i,j,k+1/2}^n \right) + (C_2) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ - \frac{H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ - J_{kaynak_z} \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \end{array} \right) \quad (29)$$

Yukarıda E eşitlikleri için yapılan işlemler, H eşitlikleri için de tekrarlanırsa, eşitlik 30, 31 ve 32 elde edilir.

$$H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} = H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i,j+1/2,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i,j+1/2,k+1/2}}} \right) + \left(\frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i,j+1/2,k+1/2}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{E_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \\ - \frac{E_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} \\ - M_{kaynak_x} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \end{array} \right) \quad (30)$$

$$H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} = H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n-1/2} \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i+1/2,j,k+1/2}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2,j,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k+1/2}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2,j,k+1/2}}} \right) + \left(\frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2,j,k+1/2}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2,j,k+1/2}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{E_z \Big|_{i+1,j,k+1/2}^n - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta x} \\ - \frac{E_x \Big|_{i+1/2,j,k+1}^n - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{\Delta z} \\ - M_{kaynak_y} \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^n \end{array} \right) \quad (31)$$

$$H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} = H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^{n-1/2} \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i+1/2, j+1/2, k}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2, j+1/2, k}}}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2, j+1/2, k}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2, j+1/2, k}}} \right) + \left(\frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2, j+1/2, k}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2, j+1/2, k}}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \frac{E_x \Big|_{i+1/2, j+1, k}^n - E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^n}{\Delta y} \\ \frac{E_y \Big|_{i+1, j+1/2, k}^n - E_z \Big|_{i, j+1/2, k}^n}{\Delta x} \\ -M_{kaynak_z} \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^n \end{pmatrix} \quad (32)$$

Elde edilen H eşitliklerinde de E eşitliklerindeki gibi sabitler düzenlenir ise,

$$D_1 = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i+1/2, j+1/2, k}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2, j+1/2, k}}}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2, j+1/2, k}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2, j+1/2, k}}} \right) \quad \text{ve} \quad D_2 = \left(\frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i+1/2, j+1/2, k}^* \cdot \Delta t}{2\mu_{i+1/2, j+1/2, k}}} \right) \quad (33)$$

Düzenlenen bu sabitler yerine konulduğunda aşağıdaki eşitlikler elde edilir. 24 ve 33 numaralı eşitliklerden de açıkça görüldüğü gibi, iteratif FDTD eşitliklerinde herhangi bir ortam, dielektrik sabiti ϵ , μ manyetik geçirgenlik ve σ ısı kayıpları temsil eden iletkenlik olmak üzere üç ortam parametresi ile temsil edilmektedir. Bunlardan ϵ ve σ , E bileşenlerinin hesaplandığı eşitliklerde, μ ise H bileşenlerinin hesaplandığı eşitliklerde kullanılmaktadır. Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan ϵ , σ ve μ 'nün alt simgeleri, farklı konumlardaki farklı materyal içeriklerine ait dielektrik değerlerin kullanımını amacı ile verilmektedir.

$$H_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} = \left(D_1 \cdot H_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^{n-1/2} \right) + D_2 \cdot \begin{pmatrix} \frac{E_y \Big|_{i, j+1/2, k+1}^n - E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^n}{\Delta z} \\ \frac{E_z \Big|_{i, j+1, k+1/2}^n - E_z \Big|_{i, j, k+1/2}^n}{\Delta y} \\ -M_{kaynak_x} \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^n \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} = \left(D_1 \cdot H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n-1/2} \right) + D_2 \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{E_z \Big|_{i+1,j,k+1/2}^n - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta x} \\ - \frac{E_x \Big|_{i+1/2,j,k+1}^n - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{\Delta z} \\ - M_{kaynak_y} \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^n \end{array} \right) \quad (35)$$

$$H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} = \left(D_1 \cdot H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n-1/2} \right) + D_2 \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{E_x \Big|_{i+1/2,j+1,k}^n - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n}{\Delta y} \\ - \frac{E_y \Big|_{i+1,j+1/2,k}^n - E_z \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta x} \\ - M_{kaynak_z} \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^n \end{array} \right) \quad (36)$$

Sonuç olarak uzayın herhangi bir noktasındaki E alan ve H alan bileşenlerini farklı zaman ve konumda hesaplamak mümkün olabilmektedir. Örneğin H bileşeni, aynı noktada bulunan bir önceki zamanda kendi değerine ve diğer eksenlerdeki komşu E bileşenlerinin değerlerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. E değeri de benzer şekilde, bir önceki kendi değeri ve komşu H bileşenler yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu durumda hiçbir alan bileşeni verildiği noktadaki, diğer alan bileşenlerine ihtiyaç duymamaktadır.

Bir hücrede belirli bir noktada E ve H değerlerini öğrenebilmek için konumda ve zamanda ortalama almak yeterlidir. Örneğin alan bileşenlerini hücre merkezine ötelemek için iki manyetik alan bileşeni

$$H_x^n|_{i+1/2,j,k} = \frac{(H_x^n|_{i,j,k} + H_x^n|_{i+1,j,k})}{2} \quad (37)$$

yeterlidir. Ancak elektrik alan bileşenlerini hücre merkezine ötelemek için eşitlik 38'de de görüldüğü üzere komşu dört bileşene gerek vardır.

$$E_z^n|_{i+1/2,j+1/2,k} = \frac{(E_z^n|_{i,j,k} + E_z^n|_{i+1,j,k} + E_z^n|_{i,j+1,k} + E_z^n|_{i+1,j+1,k})}{4} \quad (38)$$

FDTD hesap uzayı içerisinde Maxwell eşitlikleri kullanılarak yakın alanlar simüle edilmektedir. Elde edilen yakın alan dataları genellikle frekans ve zamanda Huygen's eşdeğerlik yasası uygulanarak uzak alan datalarına dönüştürülür. Bu yöntemle göre FDTD hesap uzayında cismi çevreleyen kapalı sanal bir yüzey üzerindeki her hücrenin belirtilen doğrultuda, uzak alana katkısı hesaplanır. Bu kapalı sanal yüzeye, yakın alan-uzak alan dönüşüm yüzeyi (Yakuz) denilmektedir¹⁵⁶.

2.6.1. Absorblayıcı Sınır Koşulları

Hiçbir bilgisayarın, sonsuz bir uzay için gerekli hesaplamayı ve veri depolamasını yapabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle FDTD'deki hesap uzayının da sınırlandırılması gereklidir. FDTD metodunun en büyük sorunlarından biri EM dalga etkileşim probleminin sınırlı olmayan bölgelerde etkin ve doğru çözümdür¹⁵⁸. Bir metodun serbest uzayı simüle edebilmesi için hesap uzayının sınırsız olduğunu da simüle edebilmesi gerekmektedir¹⁵⁹. Bu tip problemlerde sonsuza uzanan örgüyü simüle edebilmek için dış örgü sınırlarında Absorblayıcı Sınır Koşulları (Absorbing Boundary Condition, ABC) tanımlanmalıdır¹⁵⁸. Absorblayıcı ya da açık sınır koşulları mevcut olmadığında ızgaranın dış sınırındaki dalgalar hesap uzayının içine geri yansır¹⁶¹. Dolayısı ile absorblayıcı sınır koşulu FDTD hesaplamasının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir¹⁶⁰.

FDTD denklemleri incelendiğinde, ilk hücre için hesaplamada kullanılacak olan aynı noktadaki bir önceki alan değerini barındıran hücrenin mevcut olmadığı, son hücre için ise yine hesaplamada kullanılması gereken bir sonraki alan değerlerini içeren hücrenin de mevcut olmadığı görülecektir. Bu hücreler mevcut olmadığı için bu değerler sıfır gibi algılanacak ve tam yansıma söz konusu olacaktır. Dolayısı ile FDTD hesap uzayının sınır yüzeylerinde iteratif eşitlikleri hiçbir önlem almaksızın aynen uygulamak tam yansımalara neden olacaktır. Bu ise ele alınan yapının değişmesi demektir¹⁵⁶.

Bu yansıma sorununu engellemek amacı ile kullanılan absorblayıcı sınır koşulları arasında en verimli kullanılabileni Mükemmel Uyumlu Katmanlar (Perfectly Match Layer, PML) yöntemidir. Kendisinden önce kullanılan yöntemlere kıyasla büyüklük olarak yaklaşık 3-4 kat daha düşük hata vermektedir¹⁵⁹. Jean Pierre Berenger tarafından 1994'te önerilen PML yöntemi, gelen dalgaların hesap uzayının dış sınırına konumlandırılan metal plakalar tarafından yansıma olmaksızın tamamen absorblanması temeline dayanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken PML katmanının sadece teorik olarak mükemmel yansıtmasız olduğudur. Gerçek FDTD uygulamalarında PML materyalinin kalınlığına ve iletkenlik profiline bağlı olarak bu katmanlardan bazı yansımalar söz konusudur¹⁵⁹. Bu olayın fiziksel uygulama olarak bir benzeri yalıtılmış (anechoic) odaların duvarlarıdır¹⁵⁸. PML'de performansı geliştirmek amacı ile Tek Eksenli Mükemmel Uyumlu Katmanlar (Uniaxial Perfectly Match Layer, UPML)¹⁶² ve Kıvrımlı PML (Convolutional Perfectly Match Layer, CPML)¹⁶³ gibi farklı modifikasyonlar önerilmektedir.

2.6.2. Sayısal Kararlılık

FDTD de kararlı sonuçlar elde edebilmek için hesap uzayında kullanılacak zaman aralığı (Δt) Courant-Friedrich-Levy (CFL) kriterine uygun seçilmelidir. CFL kriteri,

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (1)$$

Δx , Δy ve Δz kartezyen koordinat sisteminde birim FDTD hücresinin boyutlarını, c ise hücre materyali içindeki ışığın hızını belirtmek üzere eşitlik 1'de verilmiştir¹⁶¹. CFL kriterini tek boyut için düşündüğümüzde,

$$c \cdot \Delta t \leq \Delta x \quad (2)$$

elde edilir. Bu bağıntının sol tarafı bize dalganın c ışık hızı nedeniyle maksimum alabileceği yolu vermektedir. Bağıntının sağ tarafı ise hücrenin boyutunu belirtmektedir.

CFL kriterinin fiziksel olarak anlamı, seçilen Δt zaman aralığında dalganın maksimum ilerlemesinin hücre boyutunu aşmaması gerektiğidir. Başka bir deyişle dalga en az bir Δt süresini hücre içerisinde geçirmelidir. Aksi takdirde dalgayı zaman ve konumda simüle etmek ve dalga iletimini izlemek mümkün değildir¹⁵⁶.

CFL kriterinden de açıkça görülebileceği gibi, Δt zaman aralığı hücre boyutu ile doğrudan ilişkilidir. Hücre boyutu bu nedenle simülasyon hesabında önemli bir etkiye sahiptir. Eşit aralıklı bir örgüye sahip hesap uzayı için ızgara aralıklarını yarı yarıya indirmek, depolanacak veri kapasitesini 8 kat, hesaplama için gereken zamanı ise 16 kat arttıracaktır. Farklı boyutta ızgara aralıklarına sahip bir hesap uzayı örgüsünde ise Δt zaman aralığı örgüdeki en küçük hücreye göre seçilecek ve tüm simülasyon zamanını etkileyecektir¹⁶¹.

Ayrıca dalganın bozunumundan kaynaklı sayısal dispersiyon hatalarına neden olmayacak konum örnekleme yapabilmek için, ızgaradaki maksimum adım aralığının en az $\lambda/10$ olması tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada maksimum adım aralığı $\lambda/14$ olarak seçilmiştir.

2.7. Ulusal ve Uluslararası Standartlar

Ulusal ve uluslararası alanda EM alan maruziyeti, olası sağlık etkilerini önlemek amacı ile belirli kuruluşlar tarafından sınırlandırılmaktadır. Avrupa ve Türkiye'deki EM alan limitleri Avrupa Elektroteknik Standartlar Komitesi (European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC) tarafından düzenlenen EN 50360 standardı ile belirlenmekte iken, Amerika'da, Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standard Institute, ANSI) ve Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) tarafından düzenlenen C95.1 standardı ile referans alınmaktadır. Uluslararası İyonlaştırılmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) ise bu konuda uluslararası standartları belirleyen önemli bir kuruluştur.

Bu çalışmada cep telefonu maruziyeti kaynaklı SAR değerinin tespiti amaçlanmış ve FDTD yöntemini kullanan SEMCAD X programı ile çeşitli değişkenlerin SAR'a etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Cep telefonu maruziyeti ile ilgili kullanılan standartlar ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Ulusal ve uluslararası kurumlar tarafından tespit edilen kafa bölgesindeki SAR limitleri

Doku	IEEE C95.1-2005		ICNIRP		CENELEC / TÜRKİYE	
	Ortalama Hacim (gr)	SAR limiti W/kg	Ortalama Hacim (gr)	SAR limiti W/kg	Ortalama Hacim (gr)	SAR limiti W/kg
Kafa + Kulak	-	-	10	2	10	2
Kafa	10	2	-	-	-	-
Kulak	10	4	-	-	-	-

Günümüzde RF maruziyet için hem Amerika hem de Avrupa'da uygulanan uluslararası standartlarda 10 gr dokudaki uzaysal tepe SAR değeri kabul görmektedir. Bu nedenle simülasyon çalışmalarından elde edilen bulgular değerlendirilirken 10 gr uzaysal tepe SAR değeri referans alınmıştır.

3. GEREÇ VE YÖNTEMLER

Mobil telefon maruziyetinden kaynaklı, kafada oluşan EM alan dozunu tespit etmek amacı ile yapılan bu sayısal dozimetri çalışmasında, kafa boyutunun, kafanın dielektrik özelliklerinin, günlük hayatta yaygın olarak kullanılan aksesuarların, farklı frekans ve telefon modellerinin etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

3.1. Gereçler

Farklı koşullar altında kafa modellerindeki SAR değerlerini tespit edebilmek amacı ile çeşitli yazılımlar ve bu yazılımları çalıştıracak donanım bileşenleri kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sırasında kullanılan yazılım ve donanım bileşenleri:

- a. Donanım Bileşenleri
 - Simülasyon Bilgisayarı
 - Kesintisiz Güç Kaynağı (Inform, Guard 1000 AP)
 - Donanım Tabanlı Simülasyon Hızlandırıcı Kart (aXware V1.5)
- b. Yazılım Bileşenleri
 - SEMCAD X Simülasyon Yazılımı (Jungfrau V12.2, 2007)
 - Fantom

3.1.1. Donanım

Yüksek işlem gücüne ve bellek kapasitesine ihtiyaç duyan FDTD metodu, Yee tarafından 1966 da önerilmesine rağmen 1980'lerin başına kadar yaygın bir kullanıma erişememiştir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte FDTD de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır ve günümüzde kendi alanında en yaygın kullanıma sahip olan simülasyon metodudur.

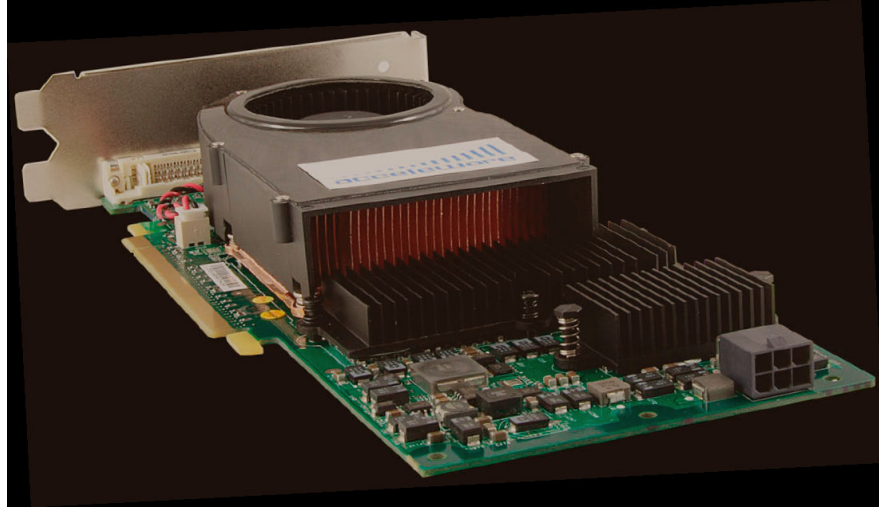
3.1.1.1. Simülasyon Bilgisayarı

Kullanılan metodun yüksek işlem gücü ve bellek kapasitesine ihtiyaç duyması nedeni ile, simülasyon bilgisayarı olarak yüksek performanslı bir bilgisayar sistemi oluşturulmuştur. Bu amaçla kullanılan bilgisayar sistemi, çift çekirdekli AMD Athlon 64 X2 4200+ işlemcili, 2 GB DDR-400 ram'lı ve 512 Mb'lık PCI-Express x16 ekran kartına sahiptir. Karmaşık geometrileri detaylı şekilde inceleyebilmek ve daha iyi konumlandırma yapabilmek amacı ile 19" monitör kullanılmıştır. Uzun süreli simülasyonlar sırasında elektrik kesintilerinden kaynaklı veri ve

zaman kaybını engellemek amacı ile bilgisayar kesintisiz güç kaynağına bağlanmıştır.

3.1.1.2. Donanım Tabanlı Simülasyon Hızlandırıcı Kart

Yüksek işlem gücüne ve bellek miktarına ihtiyaç duyan bir metotta, yüksek çözünürlüklü hassas simülasyonlar yapılabilmesi için çok uzun simülasyon süreleri gerekmektedir. Örneğin eşit aralıklı bir örgüye sahip hesap uzayı için ızgara aralıklarını yarı yarıya indirmek, depolanacak veri kapasitesini 8 kat, hesaplama için gereken zamanı ise 16 kat arttırmaktadır. Axware Donanım Tabanlı Simülasyon Hızlandırıcı Kart, Acceleware firması tarafından 512 Mb'lık PCI-Express x16 nVidia tabanlı ekran kartının özellikle FDTD ve yüksek bant genişliğine sahip hafıza hızlandırması için optimize edilmiş halidir. Şekil 6'da görülen aXware V1.5 simülasyon hızlandırıcı kart, boyutu 14 milyon voksele kadar olan simülasyonları donanımsal olarak hızlandırabilmektedir. Belirtilen donanımın performansı saniyede 90-190 milyon vokseli işleyebilecek kapasitede olup, hızlandırıcı donanımın bulunmadığı aynı sistem özelliklerini içeren bilgisayarlara göre 5 kata kadar daha hızlı işlem yapabilmektedir.



Şekil 6: Donanım Tabanlı Simülasyon Hızlandırıcı Kart
(Axware V1.5, Speag)

3.1.2. Yazılım

RF EM alan simülasyonlarında en yaygın kullanıma sahip olan metot FDTD'dir. FDTD metodunu biyolojik dokulardaki sayısal dozimetri çalışmalarında yaygın olarak kullanan iki farklı yazılım

mevcuttur. Bunlar Amerikan menşeli Remcom firması tarafından üretilen XFDTD ve İsviçre meşeli Speag firması tarafından üretilen SEMCAD X'tir. Ayrıca Sonlu İntegral Yöntemi'ni (Finite Integral Tehnique, FIT) kullanan Alman meşeli CST firmasının CST Studio Suite yazılımı mevcuttur.

Bu yazılımlar arasından, Speag firması tarafından üretilen SEMCAD X programı;

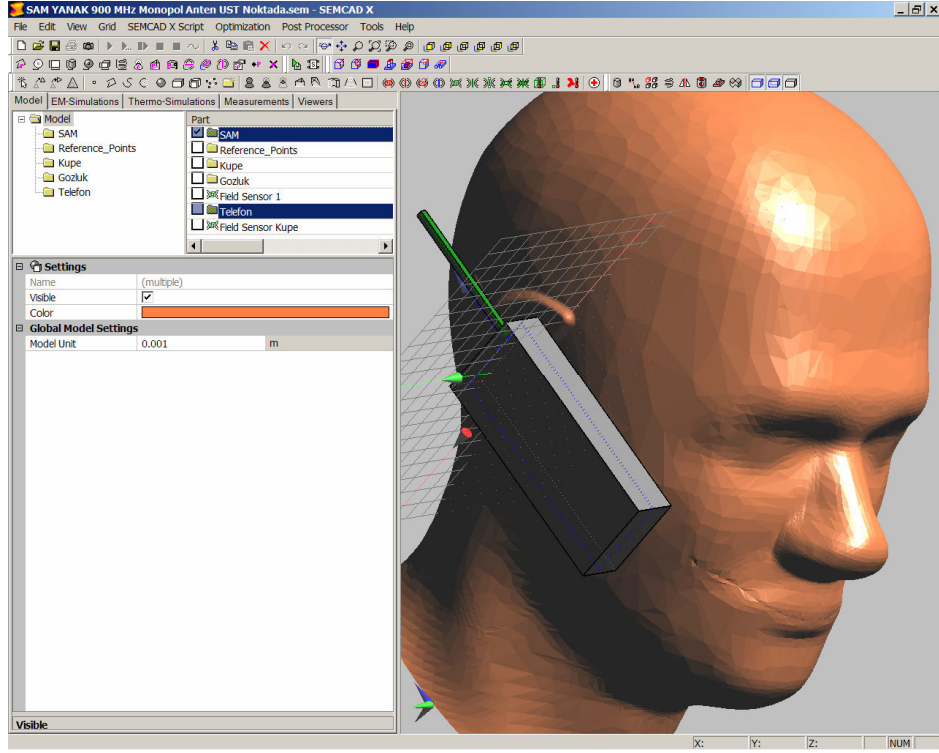
- Biyolojik dokulardaki sayısal dozimetri çalışmalarına daha çok yönelmesi
- Bu konuda uzmanlaşmış ve geliştirilmiş olması
- Hızlandırıcı donanım desteğinin bulunması
- Canlılara ait bilgisayar ortamında kullanabilecek MRI tabanlı fantomların mevcut olması
- Daha görsel bir arayüze sahip olması
- Fiyat avantajı nedeni ile tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, sayısal dozimetri çalışmalarında en yaygın kullanıma sahip olan SAM Fantom kullanılmıştır.

3.1.2.1. Simülasyon Yazılımı

SEMCAD X programı Speag firması tarafından geliştirilen FDTD tabanlı üç boyutlu tam dalga simülasyon yazılımıdır. Yazılım anten tasarımı, elektromanyetik uyumluluk ve dozimetri konularında uzmanlaşmıştır.

Acis (Spatial Technologies Firması tarafından üretilen ve CAD yazılımlarında kullanılan özel bir format) tabanlı üç boyutlu modelleme araçları ve Open GL grafik arayüzlü hızlı görüntüle motoru ile çeşitli üç boyutlu CAD formatlarının kullanımı ve hızlı şekilde işlenmesi mümkündür. İnteraktif otomatik örgü oluşturma sistemi sayesinde karmaşık geometrili yapılarda, etkileşimli olarak hızlı şekilde homojen ya da homojen olmayan örgüler oluşturulması mümkündür.



Şekil 7: Simülasyonlarda kullanılan SEMCAD X programının grafik arayüzü

Sonuçlar grafik arayüz sayesinde üç boyutlu olarak görüntülenebilmektedir (Şekil 7). Absorblayıcı sınır koşulları arasında en etkin kullanıma sahip olan PML yöntemini desteklemektedir. Bu çalışmada simülasyon yazılımı olarak SEMCAD X programının 12.2 sürümü kullanılmıştır.

3.1.2.2. Fantom

Simülasyonlarda, SAM Fantom kullanılmıştır. Fantom modelin fiziksel karakteristikleri bir mobil telefon kullanıcının başını ve boynunu andırmaktadır. Fantom, baştaki dokulara benzer dielektrik özelliklere sahip malzemeden yapılmıştır. Fantomun içinde SAR ölçümü gerçekleştirebilmek için, baş ve boyun biçimindeki kabuk malzeme içine sıvı doldurulmuştur. Kabuk model, biçimlendirilmiş bir kap gibi işlev görmektedir, mümkün olduğunca basit ve sade tasarlanmıştır^{164,165}.

Fantomun boyutları ve şekli Gordon ve arkadaşları tarafından 1989'da Amerikan ordusu üzerinde yapılan antropomorfik çalışmada rapor edilen yetişkin erkeğin 90. yüzdelik dilimine karşılık gelen biçim ve ölçüleri esas alınarak oluşturulmuştur ve telefon kullanıcısının düzleştirilmiş kulağını temsil etmek amacıyla uyarlama yapılmıştır^{164,165}.

Fantom kabuğu, enerji kaybı az ve dielektrik geçirgenliği düşük $\epsilon \leq 5$ olan malzemeden yapılmıştır. **Bu çalışmada kabuk iletkenliği literatüre uygun olarak sıfır alınmıştır.** Kabuk kalınlığı 2 mm olup kulak civarında 6 mm'ye çıkmaktadır. Kulak şekli elektromanyetik uyumluluk testlerinde telefonun doğru ve tekrarlanabilir konumlandırılmasına izin verecek şekilde seçilmiştir¹⁶⁶. Fantom kabuğuna doldurulması gereken sıvı malzemenin özellikleri ise frekansa bağımlı olarak aşağıda Tablo 3'de verilmiştir^{164,165,167}.

Tablo 3: SAM Fantom Sıvısının IEEE 1528 ve IEC 62209-1 Standartlarında belirtilen dielektrik özellikleri

Frekans (MHz)	ϵ_r	σ (S/m)
300	45,3	0,87
450	43,5	0,87
835	41,5	0.90
900	41,5	0.97
1 450	40,5	1.20
1 800	40,0	1,40
1 900	40,0	1,40
1 950	40,0	1,40
2 000	40,0	1,40
2 450	39,2	1.80
3 000	38,5	2.40

*Bu çalışmada, 835 MHz ve 900 MHz'de SAM fantom sıvısı için tablodaki ϵ_r ve σ değerleri kullanılmıştır.

3.2. Simülasyon Uygulamaları

Yaptığımız simülasyon çalışmalarında **835 MHz ve 900 MHz** frekanslarda çalışılmıştır. 835 MHz, IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 tarafından yapılan uluslararası çalışma ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla seçilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan diğer frekans Türkiye'deki üç GSM operatöründen ikisi tarafından kullanılan, dolayısı ile halkın büyük bir çoğunluğunun maruziyetinin söz konusu olduğu 900 MHz'tir.

Mobil telefonun **sağ elde kullanımına bağlı olarak** iki standart pozisyon değerlendirilmiştir: Kullanılan fantomlarda, standartlarda belirtilen ve insanlar tarafından yaygın olarak kullanılan **yanak ve eğik pozisyonları** IEC 62209 ve IEEE 1528 standartlarına uygun olarak konumlandırılmıştır.

Mobil telefon kullanımı çocuklar arasında gün geçtikçe daha da çok yaygınlaşmaktadır. Gelişim sürecinin devam ettiği çocukluk evresinde hem anatomik hem de dielektrik özellikleri nedeni ile cep telefonu maruziyetinden kaynaklanan SAR'ın daha yüksek olması ve olası

etkilere karşı daha hassas olmaları nedeni ile **çocuklar** da bu araştırma kapsamında incelenmiştir.

Bu araştırma kapsamında SAM fantomda yetişkin ve çocuk dielektrik özellikleri göz önüne alınarak SAR değerleri hesaplanmıştır. Simülasyonlar modellerin **aksesuarsız, küpeli ve gözlüklü** oldukları üç farklı koşul için gerçekleştirilmiştir.

Tüm durumlarda merdiven etkisini (staircase effect) önlemek amacı ile telefon sabit tutulup onun yerine kafa modeli döndürülmüştür.

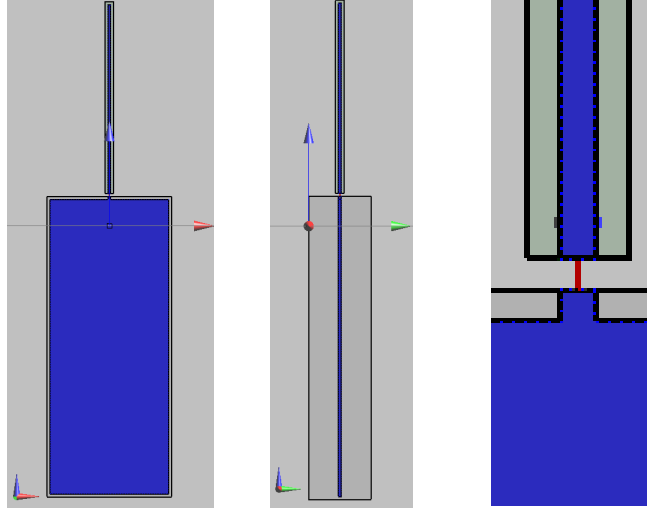
3.2.1. Genel Mobil Telefon Modeli

Metal kutulu telefon modelleri daha önceki birçok çalışmada kullanılmış olmasına rağmen, akım dağılımları dolayısı ile de RF maruziyet koşulları gerçek telefon modellerinden farklıdır ve modern telefon modellerini doğru olarak temsil edememektedir. Bunun için günümüzdeki telefonlarla uyumlu modeller kullanılması gerekmektedir. Gerçek mobil telefonlarda RF akım dağılımı ile ilgili birçok bileşen olmasına karşın akım dağılımını dolayısı ile de SAR'ı etkileyen temel olarak iki metalik bileşen vardır. Bunlar baskılı devre kartı ve antendir¹⁶⁷.

Bu çalışmada, monopol antenli plastik bir kasa ve bu kasanın içinde baskılı devre kartını temsil eden düz metalik bir tabakadan oluşan genel mobil telefon modeli kullanılmıştır. Modelin özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Mobil Telefon Üreticileri Forumu (Mobile Manufacturers Forum, MMF) tarafından kabul görmüş bir modeldir.
- Genel telefon modelinin boyutları 102 mm yükseklik, 42 mm en ve 21 mm kalınlık seçilmiş ve sert plastik bir kasadan oluştuğu varsayılmıştır.
- Baskılı devre kartı mükemmel iletkenliğe sahip bir materyalden yapılmış 1 mm kalınlıklı düz bir tabaka olarak modellenmiş ve telefon gövdesinin içerisine gövde kenarları ile arasında 1'er mm boşluk kalacak şekilde yerleştirilmiştir.
- Model telefon kasesinin dielektrik özellikleri; $\epsilon_r = 4.0$, $\sigma = 0.04$ S/m olarak kabul edilmiştir.
- Her telefonda farklı olması nedeni ile LCD, batarya gibi diğer yapısal bileşenler telefon modeline dahil edilmemiştir.

- Kulak referans noktası, telefon kasanının üst yüzeyinden 10 mm aşağısında kasanın orta noktasına konumlandırılmıştır. Bu nokta tasarımda orijin noktası olarak seçilmiştir.



Şekil 8: Genel mobil telefon modelinin a) önden görünüşü b) yandan görünüşü c) anten besleme noktasının büyütülmüş görünüşü

Telefon kasa ile anten arasında 1 mm'lik bir boşluk bulunmaktadır. Kaynak bu boşluğa yerleştirilmiştir ve bu kısım antenin bir parçası olarak kabul görmektedir (Şekil 8c).

Kaynak 50 Ω iç dirence sahip bir voltaj kaynağı olarak modellenmiştir.

Telefon kasa içerisine baskılı devre kartı ile kaynak arasındaki bağlantıyı sağlamak amacı ile 1 mm³'lük mükemmel elektriksel iletken bir metal kısım yerleştirilmiştir (Şekil 8c).

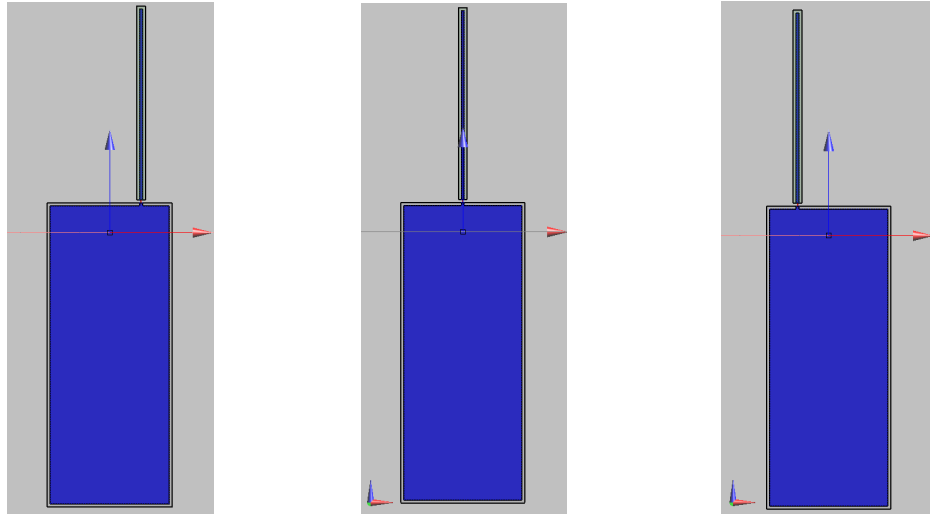
Antenin metal kısmı 1 mm kesitli bir dikdörtgen prizması olarak modellenmiş ve dielektrik özellikleri $\epsilon_r = 2.5$, $\sigma = 0.005$ S/m olan kauçuk ile tamamen kaplanmıştır. Kauçuk kaplamanın uzunluğu antenin metal kısmının uzunluğundan 1 mm daha uzundur. Antenin toplam uzunluğu: metal kısmın uzunluğu, 1 mm kaynak boşluğunun uzunluğu ve metal kısmın üzerindeki 1 mm kauçuk kısmın uzunluğunun toplamını içermektedir.

Bu çalışmada anteni telefon kasa'nın üst kısmında merkeze, sağ ve sol tarafı yakınına konumlandırılan üç farklı telefon modeli oluşturulmuştur:

- Anteni kasa'nın sağ tarafı yakınında konumlandırılan, Model A

- Anteni kasanın merkezinde konumlandırılan, Model B
- Anteni kasanın sol tarafı yakınında konumlandırılan, Model C

Antenin kasanın sağ ve sol tarafları yakınında konumlandırıldığı modellerde anten, kendisine en yakın uç kenara 10.5 mm uzaklıktadır. Simülasyon çalışmalarında kullanılan telefon modelleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Simülasyonlarda kullanılan Genel Telefon Modelleri, a) Model A, b) Model B ve c) Model C görülmektedir.

Farklı kafa modelleri yakınında makul giriş empedansına ulaşabilmek amacıyla anten uzunluğu çeyrek dalga ($\lambda/4$) boyundan %20 daha kısa olarak modellenmiştir. Anten uzunlukları 835 MHz için 71 mm, 900 MHz için 66 mm'dir. Telefon modelinin akustik çıkışı, genişliği 1 mm ve telefonun tepe noktasından 10 mm aşağıda seçilmiştir¹⁶⁷.

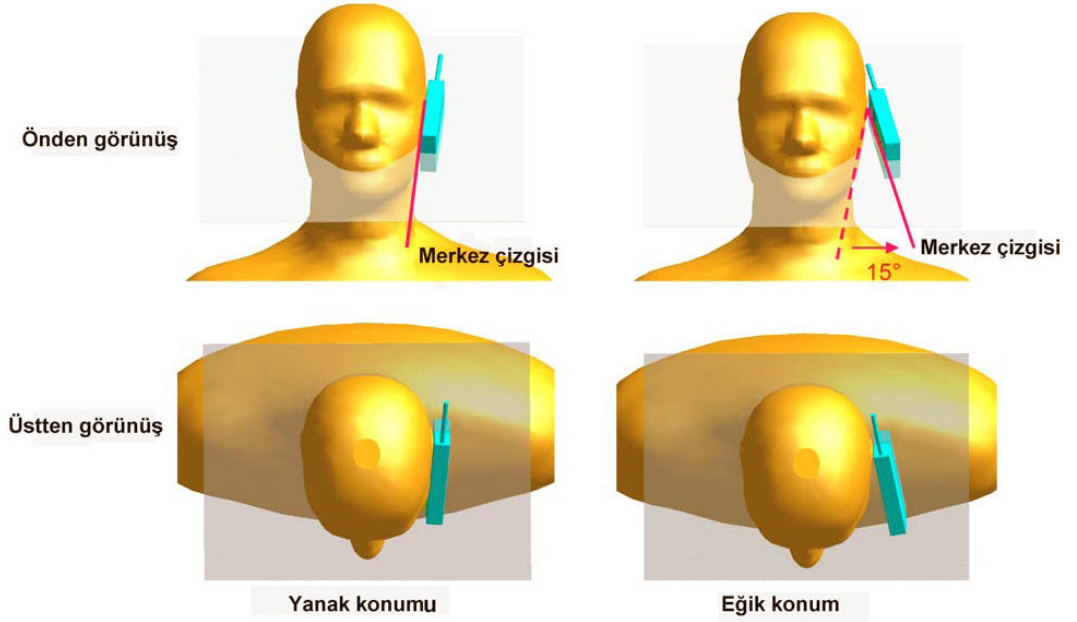
Simülasyonların sağ el kullanımına yönelik yapılmasına rağmen, antenin köşelerde bulunduğu iki telefon modelinin (Model A ve Model C) rotasyonel olarak simetrik olması nedeni ile sol el kullanımına bağlı SAR verileri de sonuçlar arasındadır.

3.2.2. Cep Telefonlarının Konumlandırılması

Mobil telefonlar için, IEC 62209-1, IEEE 1528 gibi uluslararası ve TS EN 50361 gibi ulusal standartlarda belirtilen ve halk tarafından yaygın olarak tercih edilen iki kullanım pozisyonu mevcuttur. Bunlar yanak ve eğik pozisyonları olarak isimlendirilmiştir (Şekil 10).

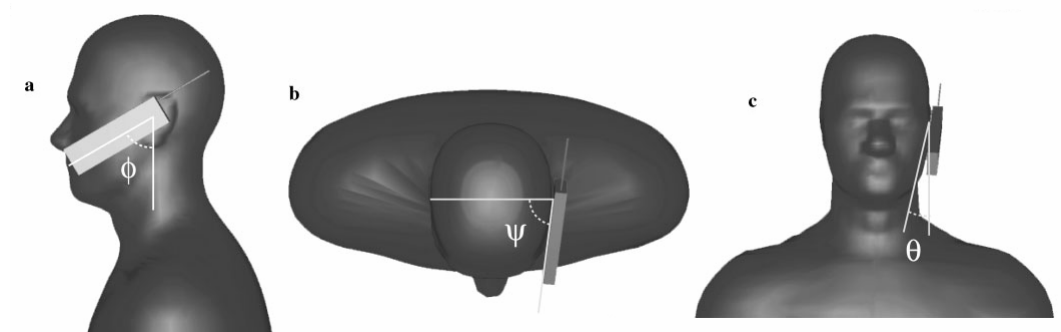
Yanak konumu, telefonun hem kulağa hem de yanağa değdiği pozisyonudur. Telefon modeli, SAM fantomun ağız ve kulak bölgesinde bulunan referans noktalar yardımıyla konumlandırılmaktadır.

Eğik konumu ise, yanak konumu elde edildikten sonra, telefon modeline 15° açı yaptırılarak yanakla temasının kesildiği konumdur. Yanak ve eğik konumlarına ait görüntüler Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: Cep telefonunun SAM fantomda Yanak ve Eğik konumlarındaki görünüşleri (TS EN 50361)

Yanak ve eğik konumlarında kullanılan açıların SAM Fantom üzerindeki görünüşleri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: SAM fantomdaki eğik konumu için mobil telefon açıları: a) yandan görünüş, b) üstten görünüş, c) önden görünüş (Christ, 2005).

Şekil 11’de görülen mobil telefon kullanım pozisyonları ile ilgili açılar ise Tablo 4’te verilmektedir.

Tablo 4: Fantomlarda Yanak ve Eğik konumlarında kullanılan açı ve uzaklıklar (Christ, 2005)

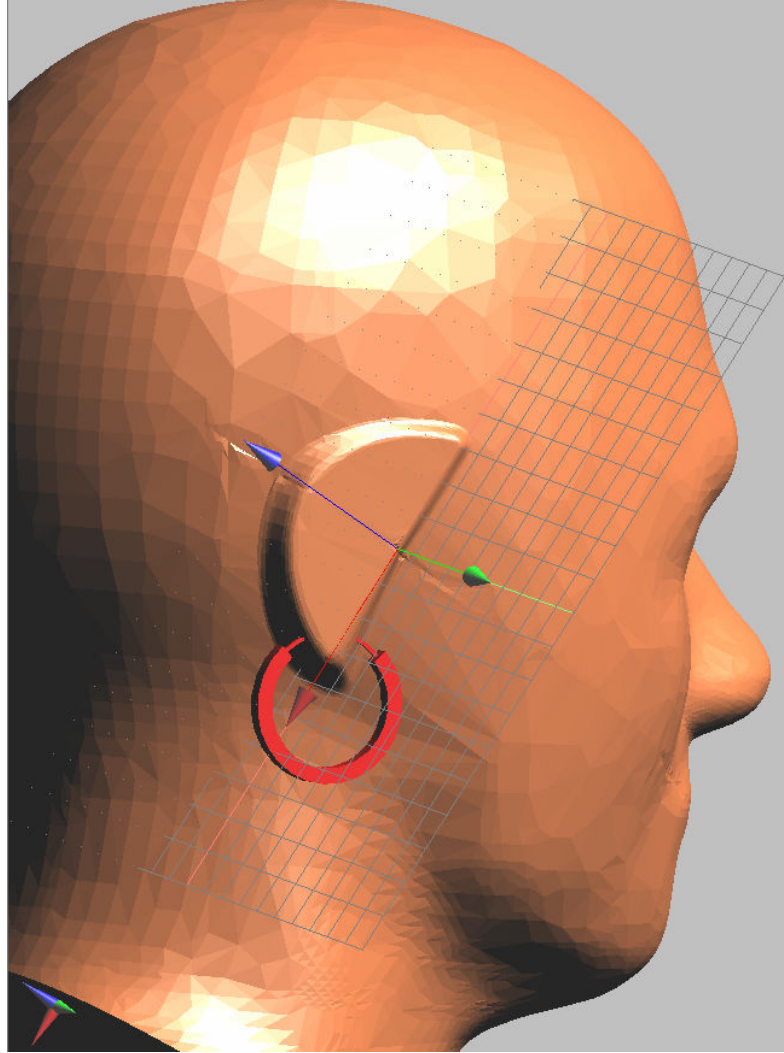
	SAM	VHP Kafa Fantomu	Avrupalı Kadın Kafa Fantomu
ϕ	61°	64,5°	67°
θ	3,9°	-2,8°	10°
ψ_{Yanak}	86°	87,4°	73°
$\psi_{\text{Eğik}}$	101°	102,4°	98°
$D_{\text{Sıvı-Kaynak}}$ (Yanak)	15,5 mm	16 mm	20,5 mm
$D_{\text{Sıvı-Kaynak}}$ (Eğik)	14,5 mm	16,2 mm	13 mm

3.2.3. Simülasyonda Kullanılan Aksesuarlar

Literatürde, EM alanların kalp pili gibi aktif implantlar ile etkileşimi geniş ölçüde incelenmesine karşın¹⁶⁸⁻¹⁷⁰, pasif metalik implantlar ile ilgili sadece birkaç çalışma mevcuttur^{171,172}. Günlük hayatta sınırlı sayıda kullanıma sahip çeşitli özel implantlar yerine çok yaygın kullanılan küpe¹⁷² ve gözlük¹⁷³⁻¹⁷⁵ gibi metalik aksesuarların SAR’a etkisi incelenmiştir.

3.2.3.1. Küpe

Küpeler özellikle bayanlar tarafından çok yaygın şekilde kullanılan aksesuarlardır. Çok farklı boyut ve şekillerde küpeler mevcuttur ancak bu araştırmada, kalınlığı 4 mm ve dış çapı 40 mm olan halka şeklindeki geleneksel küpe simülasyonu yapılmıştır (Şekil 12). Küpenin kulağa takılan kısmı ise diğer kısımlara göre daha ince olup 1 mm kalınlığa sahiptir. Mükemmel elektriksel iletken malzeme olarak modellenen küpe, kulağın alt kısmına konumlandırılmıştır.



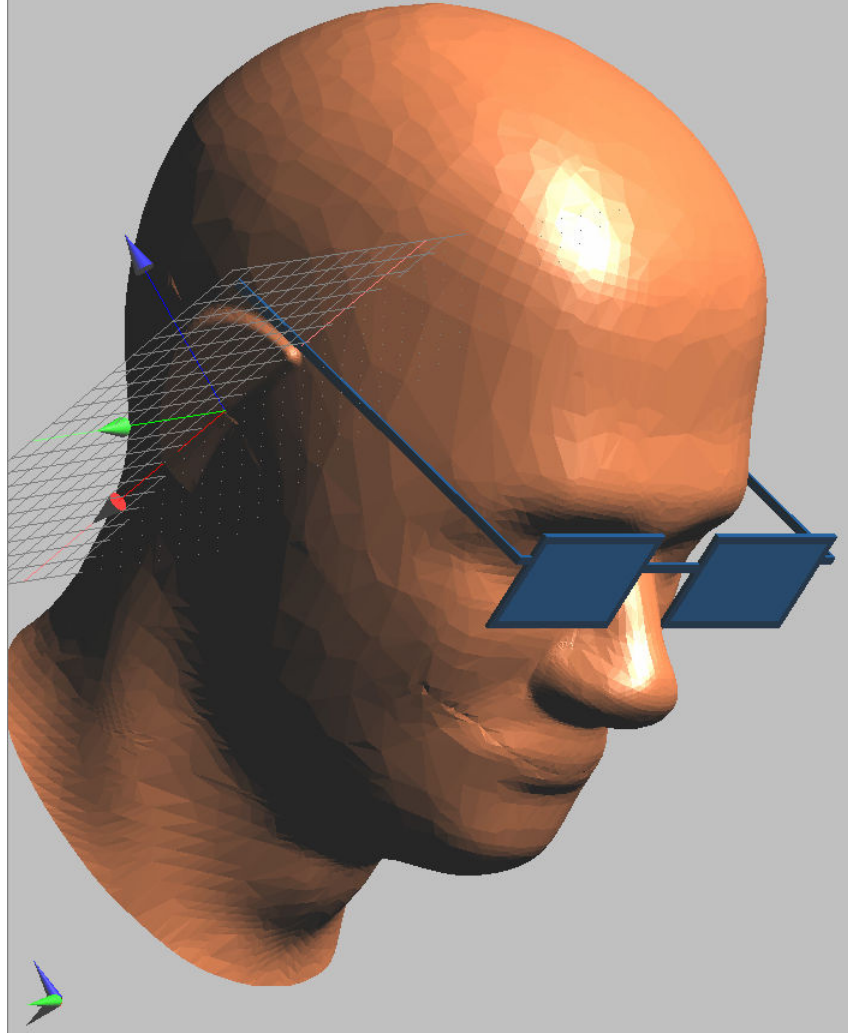
Şekil 12: Simülasyonda Kullanılan küpe modeli

3.2.3.2. Gözlük

Günlük hayatta yaygın olarak kullanılan bir diğer aksesuar da gözlüktür. Bu çalışmada eni 37 mm boyu ise 63 mm olan gözlük çerçevesi, 3 mm enli, 2 mm kalınlıklı mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip metal malzemeden oluşturulmuştur. Gözlük sapının uzunluğu ise 140 mm'dir (Şekil 13).

Gözlük camı olarak $\epsilon_r = 2.56$ değerlikli perspeks lens modellenmiştir¹⁷³. Perspeks (akrilik cam) lenslerin eni 31 mm boyu ise 57

mm'dir. Burun bölgesinde gözlüğün doku içerisine girmemesine ve temas etmemesine özen gösterilmiştir.



Şekil 13: Simülasyonda kullanılan gözlük modeli

3.2.4. Çocuk Kafa Modeli

Mobil telefonlardan kaynaklanan EM alan maruziyeti yetişkinlere kıyasla çocuklar için daha büyük risk oluşturmaktadır. Son zamanlarda çocukların aldığı doz, sayısal dozimetri ile ilgili olarak literatürde en çok tartışılan konuların başında gelmektedir.

Genel olarak çocuk kafası, yetişkin kafasının basitçe ölçeklenmiş hali değildir. Çünkü çeşitli organ ve dokuların, hem anatomik olarak gelişimsel değişimleri hem de bu süreçte dielektrik özellikleri farklılıklar göstermektedir. Örneğin beynin gelişimi hayatın erken

dönemlerinde şekillenirken, kafatası kemiğinin gelişimi hayatın ilk 6 senesi boyunca lineer bir değişim göstermektedir¹⁷⁶.

Bu çalışmada yetişkin bireye kıyasla çocuk kafa modelindeki, boyut farkı ve dielektrik özellikler gibi önemli iki temel unsurun, SAR'a etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla SAM fantom, 7 yaşındaki çocuğun kafa çevresinin, yetişkin bireyin kafa çevresine oranı olan 0,9 faktörü ile ölçeklenmiştir¹⁷⁶.

Etkisi incelenmek istenen diğer bir değişken ise çocukların dielektrik özellikleridir. Çocuklar yetişkinlere kıyasla daha yüksek dielektrik özelliklere sahiptir, bu nedenle maruz kaldıkları risk tespit edilmeye çalışılmıştır. Dokuların dielektrik özelliklerinin yaşa bağlı değişimleri deney hayvanları üzerinde Peyman (2001) ve Gabriel (2005) tarafından araştırılmıştır^{177,178}. Bu simülasyon çalışmasında, çocuk dielektrik özelliklerindeki değişim oranı için, birbiri ile iyi uyum gösteren Peyman (2001) ve Gabriel (2005)'in araştırmalarındaki değişim oranlarının ortalaması kullanılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5: Yetişkin kıyasla çocuk beyin dokusunun dielektrik özelliklerindeki artış oranı

	Dielektrik Sabitindeki Değişim	İletkenlikteki Değişim
Peyman çalışması (Peyman, 2001)*	9.9%	16.3%
Gabriel çalışması (Gabriel, 2005)*	9.8%	15.7%
Bu çalışmada çocuk simülasyonunda kullanılan	9.85%	16%

*) 30 günlük yavru sıçanların, 70 günlük yetişkin sıçanlara kıyasla dielektrik özelliklerindeki değişim oranları seçilmiştir.

3.2.5. Dielektrik Özellikler

Bu çalışmada, yetişkin SAM fantom için IEEE 1528 ve IEC 62209–1 standartlarında belirtilen datalar kullanılmıştır.

Çocuk fantomu SAM fantomun 0,9 ölçeği ile çarpılarak elde edilmiştir. Çocuk fantomundaki sıvının dielektrik özellikleri, SAM fantom için kullanılan IEEE 1528 ve IEC 62209–1 dataları ile Peyman¹⁷⁷ ve Gabriel'in¹⁷⁸ ölçüm çalışmalarındaki verilerin ortalaması alınarak belirlenen değişim oranı ile hesaplanmıştır.

SAM fantomla yapılan yetişkin ve çocuk simülasyonlarında kullanılan doku iletkenlik (σ) ve dielektrik sabitine (ϵ_r) ilişkin değerler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Çalışmada kullanılan SAM Fantom sıvısına ait dielektrik değerler

Frekans	Yetişkin*		Çocuk**	
	ϵ_r	σ (S/m)	ϵ_r 109,85 %	σ (S/m) 116 %
835 MHz	41,5	0,90	45,59	1,0440
900 MHz	41,5	0,97	45,59	1,1252

*) IEEE 1528 ve IEC 62209–1 datalarından alınmıştır.

**) IEEE 1528 ve IEC 62209–1 dataları ile çocuk dielektrik özellikler değişim oranı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.6. Maruziyet Koşulları

Mobil telefon kaynaklı SAR'ın belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada seçilen genel maruziyet koşulları aşağıda verilmiştir.

- 835 MHz ve 900 MHz olmak üzere iki farklı frekans çalışılmıştır.
- Antenin kasa üstünde sağ kenarda, sol kenarda ve ortada olmak üzere konumlandırıldığı üç farklı telefon modeli kullanılmıştır.
- Mobil telefonun yanak ve eğik olmak üzere iki farklı pozisyonda kullanımı incelenmiştir.
- Yetişkin ve çocuk SAR değerlerinin tesbitinde SAM Fantom kullanılmıştır.
- Çocuk modellemesi çalışmaları SAM fantom ile yetişkin ve çocuk doku dielektrik değerleri kullanılarak ayrı ayrı yürütülmüştür.
- Yetişkin ve çocuk modellerinin her ikisi için de çalışmalar aksesuarsız, küpeli ve gözlüklü olmak üzere üç farklı koşulda tekrarlanmıştır.

IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 tarafından yürütülen çalışmadaki 835 MHz de SAM fantomda yanak ve eğik pozisyonlarındaki maruziyet durumları özel olarak standardizasyon amaçlı çalışılmış ve tüm araştırmanın IEEE tarafından yapılan çalışma ile kıyaslanması bu yolla sağlanmıştır.

Çalışmanın genel maruziyet koşulları Tablo 7'de verilmektedir. Tablo 7'yi takiben çalışmada uygulanan 78 farklı durum için maruziyet koşulları tablolar halinde ayrı ayrı verilmektedir.

Tablo 7: İncelenen genel maruziyet koşullarında gerçekleştirilen simülasyonlar

	IEEE 835 MHz			835 MHz						900 MHz						
	Yanak		Eğik	Yanak			Eğik			Yanak			Eğik			
	Anten Ortada	Anten Ortada	Anten Ortada	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	
Yetişkin SAM Fantom	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Aksesuarsız		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Küveli				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gözlüklü				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Çocuk SAM Fantom (Yetişkin dielektrik özellikleri)																
Aksesuarsız				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Küveli				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gözlüklü				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Çocuk SAM Fantom (Çocuk dielektrik özellikleri)																
Aksesuarsız				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Küveli				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gözlüklü				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

3.2.6.1. SAM Fantom IEEE Simülasyonları için Gerçekleştirilen Maruziyet Koşulları

1) SAM Fantom 835 MHz Yanak Pozisyonu IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 Koşulları

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM	SAM
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	0.0016 S/m
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	5
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,84 M

2) SAM Fantom 835 MHz Eğik Pozisyonu IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 Koşulları

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM	SAM
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	0.0016 S/m
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	5
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,84 M

3.2.6.2. SAM Fantom Simülasyonları için Maruziyet Koşulları

1) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,57 M

2) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,63 M

3) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,57 M

4) Kúpeli SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVİSİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVİSİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,41 M

5) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVİSİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVİSİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,48 M

6) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVİSİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVİSİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,41 M

7) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	11,15 M

8) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,64 M

9) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	11,20 M

10) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,75 M

11) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,81 M

12) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,75 M

13) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,81 M

14) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,89 M

15) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,81 M

16) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,7 M

17) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,82 M

18) SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,7 M

19) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,57 M

20) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,64 M

21) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,57 M

22) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	9,44 M

23) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	9,53 M

24) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	9,44 M

25) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,18 M

26) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,24 M

27) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,18 M

28) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,52 M

29) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,59 M

30) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,52 M

31) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	9,60 M

32) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	9,69 M

33) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	9,60 M

34) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,97 M

35) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	13,04 M

36) SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	13,04 M

3.2.6.3. Yetişkin Dielektrik Özellikli Çocuk SAM Fantom Simülasyonları için Maruziyet Koşulları

1) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,07 M

2) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,14 M

3) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,07 M

4) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISİNİN DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	Kúpe
VOKSEL SAYISI	8,08 M

5) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISİNİN DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	Gözlüklü
VOKSEL SAYISI	10,67 M

6) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISİNİN DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,20 M

7) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,26 M

8) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,20 M

9) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	8,43 M

10) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.9 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	12,02 M

11) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,89 M

12) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,96 M

13) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,89 M

14) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,68 M

15) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	11,3 M

16) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,71 M

17) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,96 M

18) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,89 M

19) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	Kúpe
VOKSEL SAYISI	8,94 M

20) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Yetişkin Dielektrik Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	0.97 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	41.5 (Yetişkin)
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,28 M

3.2.6.4. Çocuk Dielektrik Özellikli Çocuk SAM Fantom Simülasyonları için Maruziyet Koşulları

1) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,19 M

2) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,25 M

3) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,19 M

4) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVİSİNİN İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVİSİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	Kúpe
VOKSEL SAYISI	8,13 M

5) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVİSİNİN İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVİSİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	10,77 M

6) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model A Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVİSİNİN İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVİSİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,32 M

7) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,38 M

8) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model C Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,32 M

9) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,48 M

10) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	835 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	71 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.044 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,13 M

11) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,01 M

12) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,08 M

13) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,01 M

14) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	Küpe
VOKSEL SAYISI	8,78 M

15) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Yanak Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DİELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	11,35 M

16) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model A Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Sağında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	6,86 M

17) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	45.59
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,15 M

18) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model C Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu

FREKANS	900 MHz
ANTEN TİPİ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Solunda
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DIELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISININ İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISININ DIELEKTRİK SABİTİ	45.59 (Çocuk)
AKSESUAR	-
VOKSEL SAYISI	7,08 M

19) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu Kúpeli

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	45.59
AKSESUAR	Kúpe
VOKSEL SAYISI	9,13 M

20) Çocuk SAM Fantom 900 MHz Monopol Model B Çocuk Dielektrik Eğik Pozisyonu Gözlüklü

FREKANS	900 MHz
ANTEN TÍPÍ	Monopol Anten
TELEFONUN KONUMU	Eğik Pozisyonu
ANTEN KONUMU	Kasanın Ortasında
ANTEN UZUNLUĞU	66 mm
FANTOM KABUĞUNUN İLETKENLİĞİ	-
FANTOMUN KABUĞUNUN DİELEKTRİK SABİTİ	3.7
FANTOM SIVISİNİN İLETKENLİĞİ	1.1252 S/m
FANTOM SIVISİNİN DİELEKTRİK SABİTİ	45.59
AKSESUAR	Gözlük
VOKSEL SAYISI	12,34 M

4. BULGULAR

835 MHz ve 900 MHz frekanslı cep telefonu maruziyetinden kaynaklı SAR değerine küpe, gözlük gibi metalik aksesuarlar ile cep telefonu kullanım pozisyonu, cep telefonundaki anten konumu, kafa boyutu ve kafanın dielektrik özelliklerinin etkisini tespit edebilmek amacı ile 1 gr ve 10 gr dokudaki uzaysal tepe SAR değerleri ile maksimum SAR değerleri hesaplandı.

SAM fantom ve SAMCAD-X yazılımı ile gerçekleştirilen bu simülasyon çalışmasında elde edilen sonuçların geçerliliği, uluslararası alanda kabul gören ve geniş kapsamlı çalışmalardan biri olan IEEE' nin 34 numaralı standart koordinasyon komitesinin, 2 numaralı alt komitesine bağlı, 2 numaralı çalışma grubu (SCC-34/SC-2/WG-2) tarafından yürütülen çalışma ile karşılaştırılmak suretiyle kontrol edildi ve sonuçların uyum içinde olduğu saptandı.

Simülasyonlar sonucunda elde edilen bulgular; IEEE çalışması ve SAM fantom çalışmaları olarak iki bölümde sunuldu.

SAR değerleri anten giriş gücünün 1 W'a normalize edilmesiyle elde edildi. Simülasyon çalışmalarına ait tüm resimler, 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı için verilmiş olup, bu çalışmada gözlenen en yüksek 10 gr uzaysal tepe SAR değeri olan 6,921 W/kg'a normalize edildi.

Bulguların sunulduğu tablolarda, 1 gr ve 10 gr uzaysal tepe SAR değerleri ile maksimum SAR değeri sonuçları ve SAR değerine etkili olan niceliklerden anten besleme noktası empedansı yer almaktadır. Resimlerde görülmekte olan kırmızı renkli kareler 10 gr doku için hesaplanan uzaysal tepe SAR değerinin konumunu göstermektedir.

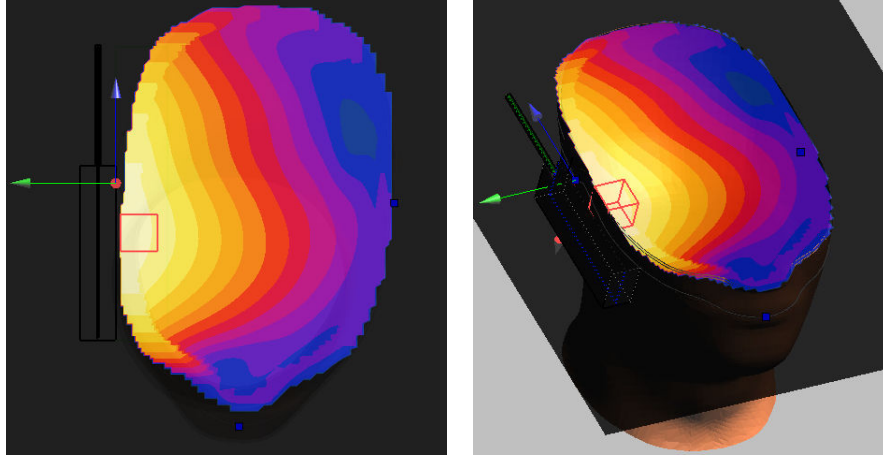
4.1. SAM Fantom IEEE Simülasyonları için Bulgular

Bu bölümde yapılan simülasyon çalışmaları IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 grubunun yaptığı çalışma ile karşılaştırma amaçlı olup 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri,

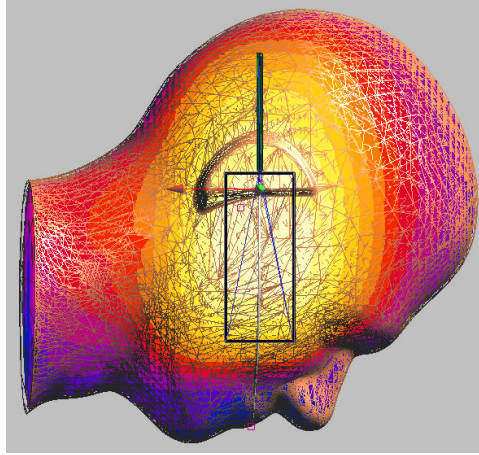
- ✓ SAM fantom 835 MHz yanak pozisyonunda 5,46 W/kg
- ✓ SAM fantom 835 MHz eğik pozisyonunda 3,25 W/kg olarak saptanmıştır.

1) SAM Fantom 835 MHz Yanak Pozisyonu IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 Koşulları

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	7,73 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	5,46 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	11,76 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	90.6 - J*30.8 Ohm



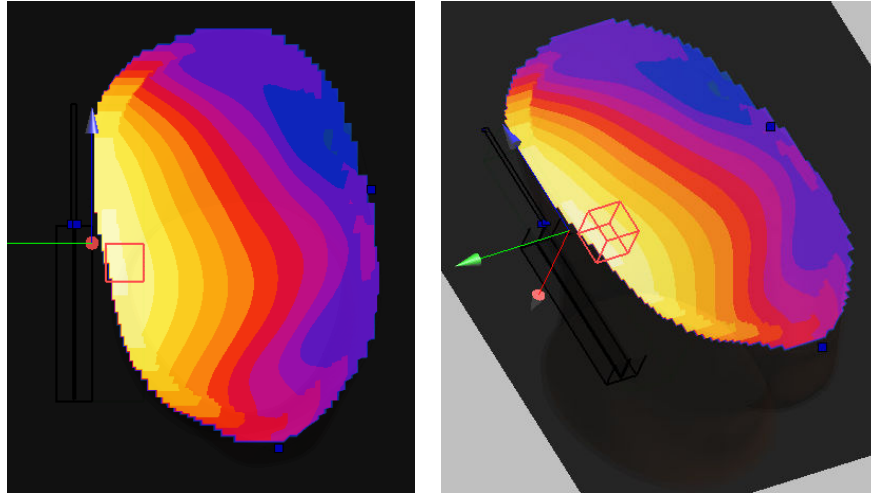
Şekil 14: SAM fantomda 835 MHz'de yanak pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı



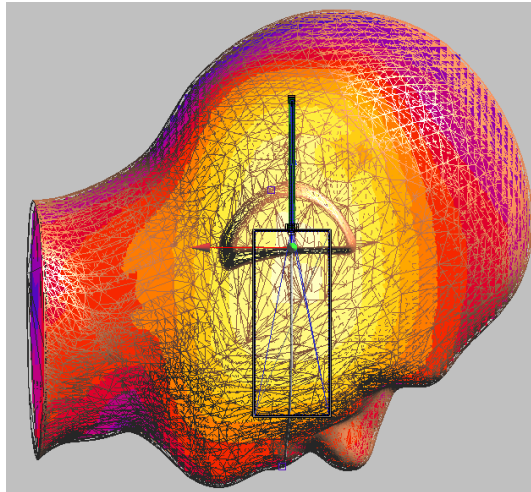
Şekil 15: SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de yanak pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı

2) SAM Fantom 835 MHz Eğik Pozisyonu IEEE SCC-34/SC-2/WG-2 Koşulları

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	4,79 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	3,25 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	9,41 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	99.1 - J*13.7 Ohm



Şekil 16: SAM fantomda 835 MHz'de eğik pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı



Şekil 17: SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de eğik pozisyonunda 10 gr uzaysal tepe SAR dağılımı

4.2. SAM Fantom Simülasyonları için Bulgular

Aksesuarsız, küpeli ve gözlüklü SAM fantom ve 0,9 ölçekli Çocuk SAM fantomda 835 MHz ve 900 MHz frekanslı mobil telefon maruziyetinden kaynaklı SAR değeri tespit edildi. Telefon anteninin sağda, ortada ve solda olduğu üç farklı anten konumunda ve yanak ve eğik olmak üzere iki farklı konuşma pozisyonunda çalışıldı.

Takip eden sayfalarda bilgisayar simülasyonlarına ilişkin birkaç örnek aşağıdaki sıra ile sunuldu:

- 1) SAM Fantom 900 MHz Monopol Anten Sağda Yanak Pozisyonu
- 2) SAM Fantom 900 MHz Monopol Anten Solda Yanak Pozisyonu
- 3) SAM Fantom 835 MHz Monopol Anten Ortada Yanak Pozisyonu
Küpeli
- 4) SAM Fantom 835 MHz Monopol Anten Ortada Yanak Pozisyonu
Gözlüklü
- 5) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Anten Ortada Çocuk
Dielektrik Yanak Pozisyonu

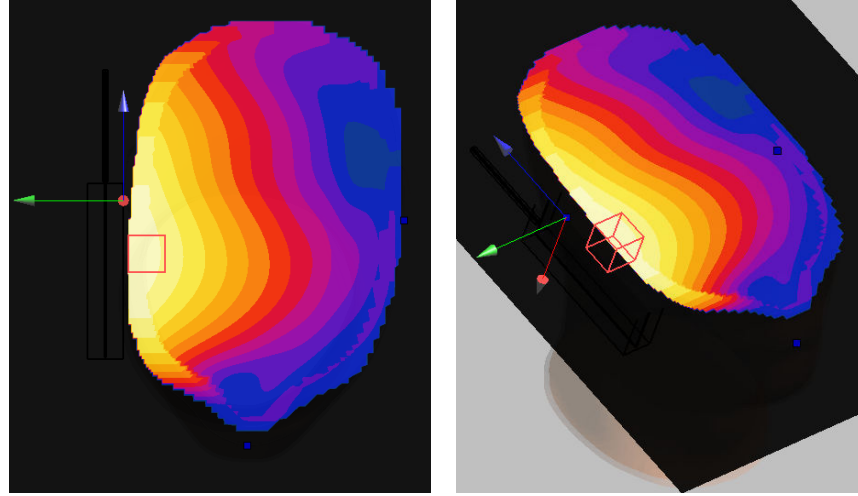
Çalışılan tüm simülasyon koşulları için 1 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri Tablo 8'de, 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri Tablo 9'da ve maksimum SAR değerleri Tablo 10'da verilmektedir.

SAR değerlerine etkisi araştırılan parametrelerin 10 gr doku için SAR değerleri karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmalarda aynı anten konumlarına göre; SAM fantom ile çocuk iletkenliğine sahip SAM çocuk ve yetişkin dielektrik özelliğine sahip SAM çocuk modelleri 835 MHz ve 900 MHz için ayrı ayrı karşılaştırılarak SAR değişim oranları hesaplandı. Böylece yanak referans alınarak eğik konumların, aksesuarsız durum referans alınarak gözlük ve küpenin, SAM fantom ile çocuk fantomların karşılaştırılması mümkün oldu. Bu karşılaştırmalara ait bulgular 10 gr doku SAR değerleri için Tablo 11 ve Tablo 12'de verildi.

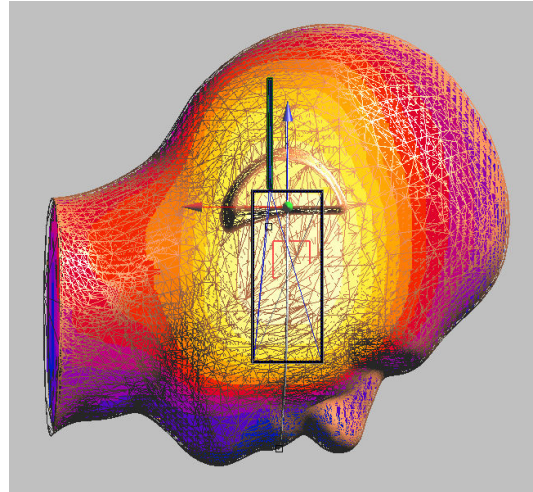
Antenin orta konumu referans alınarak sağ ve sol konumları, çocuk yetişkin dielektrik referans alınarak çocuk çocuk dielektrik özellikleri, 835 MHz referans alınarak 900 MHz uygulamalarının SAR değerinde oluşan değişim oranına etkisi SAM fantom için Tablo 13 - Tablo 17'de verildi.

1) SAM Fantom 900 MHz Monopol Anten Sağda Yanak Pozisyonu

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	8,41 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	5,84 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	12,74 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	90.9 - J*.38.5 Ohm



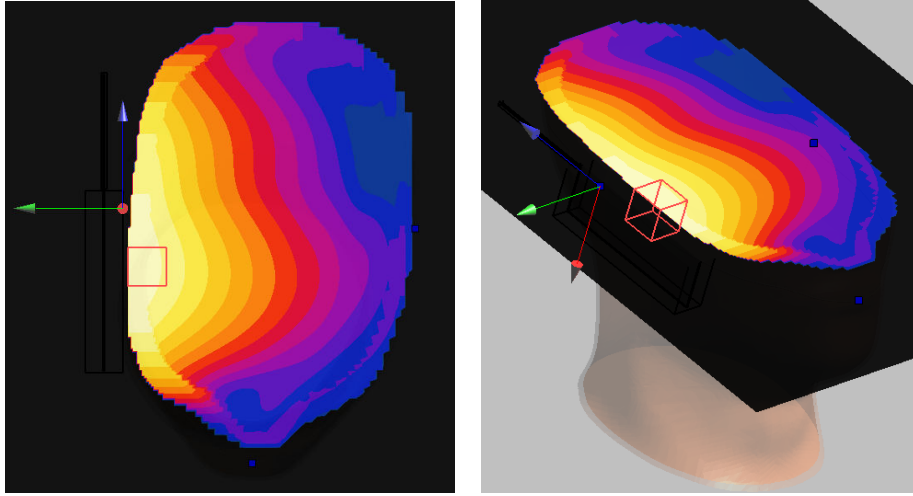
Şekil 18: Yetişkin SAM fantomda 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı



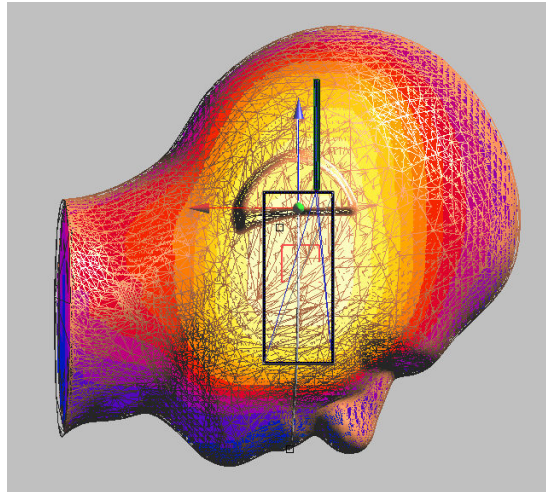
Şekil 19: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı

2) SAM Fantom 900 MHz Monopol Anten Solda Yanak Pozisyonu

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	8,55 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	5,94 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	13,05 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	89 - J*42 Ohm



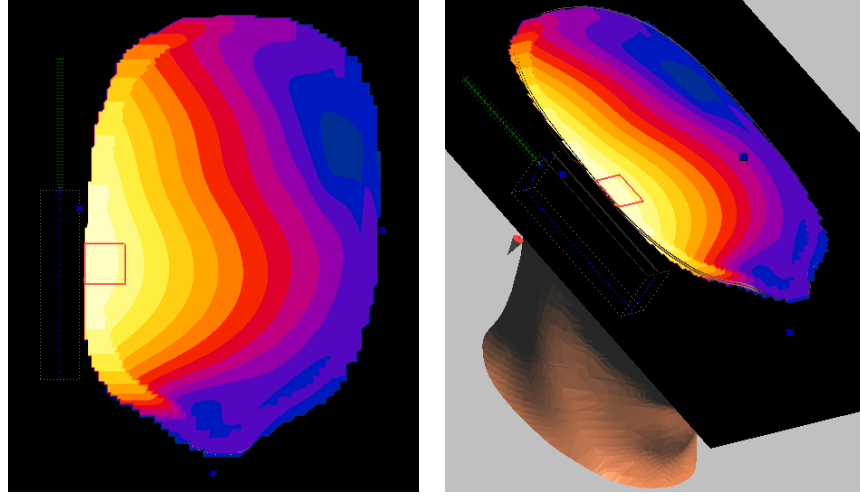
Şekil 20: Yetişkin SAM fantomda 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı



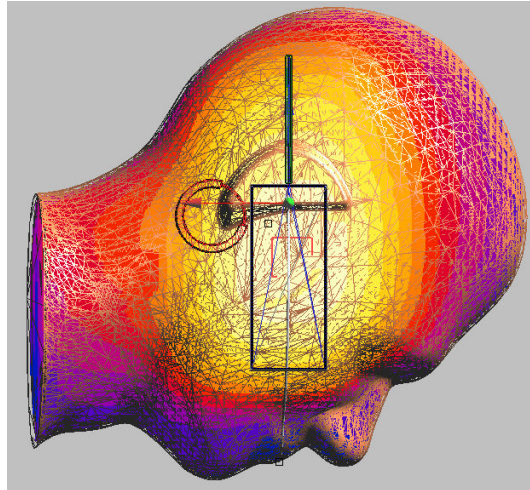
Şekil 21: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 900 MHz'de yanak pozisyonunda SAR dağılımı

3) SAM Fantom 835 MHz Monopol Anten Ortada Yanak Pozisyonu Kúpeli

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	7,82 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	5,46 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	11,27 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	92.6- J*26.5 Ohm



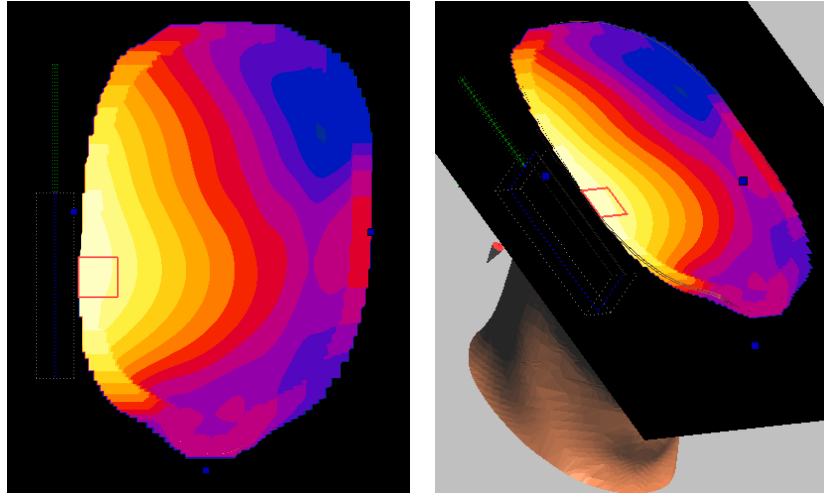
Şekil 22: Yetişkin SAM fantomda 835 MHz'de yanak pozisyonunda kúpeli durum için SAR dağılımı



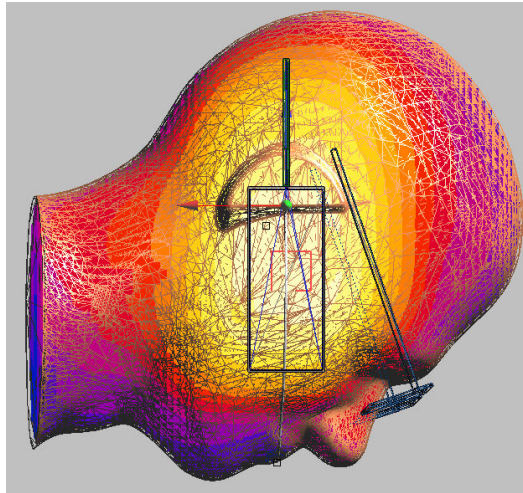
Şekil 23: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de yanak pozisyonunda kúpeli durum için SAR dağılımı

4) SAM Fantom 835 MHz Monopol Anten Ortada Yanak Pozisyonu Gözlüklü

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	8,19 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	5,68 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	12,47 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	94.4 - J*28.5 Ohm



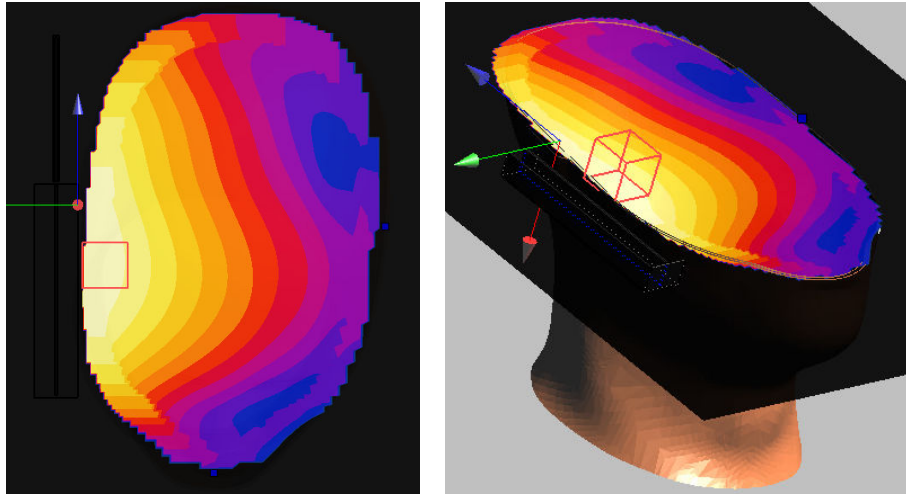
Şekil 24: Yetişkin SAM fantomda 835 MHz'de yanak pozisyonunda gözlüklü durum için SAR dağılımı



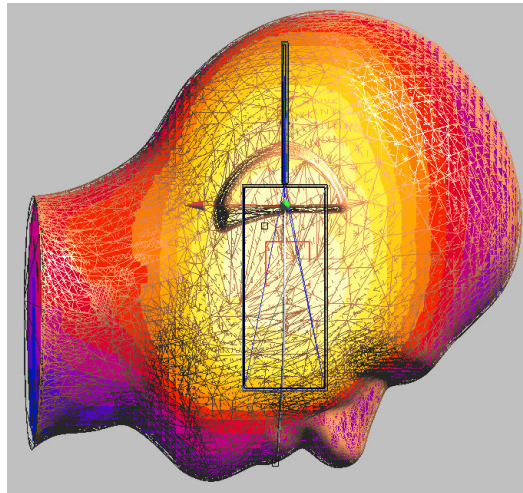
Şekil 25: Yetişkin SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de yanak pozisyonunda gözlüklü durum için SAR dağılımı

5) Çocuk SAM Fantom 835 MHz Monopol Anten Ortada Çocuk Dielektrik Yanak Pozisyonu

NİCELİK	DEĞER
1 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	8,79 W/kg
10 gr UZAYSAL TEPE SAR DEĞERİ	6,11 W/kg
MAKSİMUM SAR DEĞERİ	13,68 W/kg
BESLEME NOKTASI EMPEDANSI	93.10 - J*27.80 Ohm



Şekil 26: Çocuk SAM fantomda 835 MHz'de çocuk dielektrik özelliklerin kullanıldığı yanak pozisyonunda SAR dağılımı



Şekil 27: Çocuk SAM fantom yüzeyinde 835 MHz'de çocuk dielektrik özelliklerin kullanıldığı yanak pozisyonunda SAR dağılımı

Tablo 8: 1 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri (W/kg)

	Yetişkin SAM						Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)						Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)							
	Anten Sağda		Anten Ortada		Anten Solda		Anten Sağda		Anten Ortada		Anten Solda		Anten Sağda		Anten Ortada		Anten Solda			
835 MHz	Yanak	Aksesuarsız	7,70	7,85	7,81	7,81	7,98	7,96	8,60	8,79	8,77									
		Metal Kúpeli	7,63	7,82	7,80	7,80	7,92													
		Metal Gözlüklü	8,00	8,19	8,19	8,19	8,60													
	Eğik	Aksesuarsız	4,60	4,69	4,84	4,90	4,93	5,19	5,14	5,18	5,47									
		Metal Kúpeli	4,64	4,77	4,95	4,95	5,02													
		Metal Gözlüklü	4,93	4,98	4,99	4,99	5,34													
900 MHz	Yanak	Aksesuarsız	8,41	8,59	8,55	8,58	8,76	8,74	9,41	9,61	9,59									
		Metal Kúpeli	8,36	8,59	8,56	8,56	8,68													
		Metal Gözlüklü	8,66	8,87	8,79	8,79	9,34													
	Eğik	Aksesuarsız	4,46	4,44	4,58	4,61	4,61	4,90	4,78	4,80	5,11									
		Metal Kúpeli	4,44	4,46	4,60	4,63	4,63													
		Metal Gözlüklü	4,76	4,79	4,76	4,76	5,19													

- Simülasyon çalışmalarından elde edilen 1 gr doku için en yüksek uzaysal tepe SAR değeri, 900 MHz frekansta yanak konumunda gözlüklü durum için, çocuk dielektrik özelliklerine sahip çocuk modelinde 10,22 W/kg olarak tespit edilmiştir.

Tablo 9: 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri (W/kg)

		Yetişkin SAM				Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)				Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)			
		Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda
835 MHz	Aksesuarsız	5,45	5,54	5,53	5,51	5,66	5,65	5,95	6,11	6,11			
	Yanak	5,35	5,46	5,46	5,53	5,53			5,98				
	Metal Gözlüklü	5,48	5,68	5,66	5,96	5,96			6,45				
	Eğik	3,32	3,28	3,28	3,41	3,40	3,41	3,59	3,59	3,57			
	Metal Küpeli	3,27	3,27	3,27	3,34	3,34			3,54				
	Metal Gözlüklü	3,64	3,66	3,67	3,86	3,86			4,10				
900 MHz	Aksesuarsız	5,84	5,97	5,94	5,94	6,09	6,06	6,39	6,55	6,53			
	Yanak	5,76	5,91	5,90	6,01	6,01			6,47				
	Metal Gözlüklü	6,02	6,15	6,13	6,45	6,45			6,92				
	Eğik	3,28	3,26	3,25	3,31	3,31	3,30	3,46	3,46	3,46			
	Metal Küpeli	3,22	3,22	3,21	3,27	3,27			3,42				
	Metal Gözlüklü	3,48	3,49	3,48	3,75	3,75			3,91				

- Simülasyon çalışmalarından elde edilen 10 gr doku için en yüksek uzaysal tepe SAR değeri, 900 MHz frekansta yanak konumunda gözlüklü durum için, çocuk dielektrik özelliklerine sahip çocuk modelinde 6,92 W/kg olarak tespit edilmiştir.

Tablo 10: Maksimum SAR değerleri (W/kg)

	Yetişkin SAM			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)			Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)			
	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	
835 MHz	Aksesuarsız	11,54	12,05	11,87	11,68	12,22	12,06	13,09	13,68	13,51
	Metal Kúpeli	10,61	11,27	11,17		11,35			12,79	
	Metal Gözlüklü	11,82	12,47	12,33		12,68			14,25	
Eğik	Aksesuarsız	9,24	9,33	10,07	9,90	10,78	10,59	10,46	11,16	11,07
	Metal Kúpeli	8,71	9,76	9,97		10,28			10,71	
	Metal Gözlüklü	9,11	10,30	10,99		11,56			12,12	
900 MHz	Aksesuarsız	12,74	13,39	13,05	12,89	13,43	13,27	14,42	15,06	14,81
	Metal Kúpeli	12,06	12,72	12,43		12,84			14,42	
	Metal Gözlüklü	12,91	13,54	13,24		14,08			15,76	
Eğik	Aksesuarsız	9,89	10,22	11,08	10,28	12,06	11,94	10,55	12,42	12,30
	Metal Kúpeli	9,42	11,01	10,78		11,33			11,71	
	Metal Gözlüklü	10,26	11,10	11,84		12,56			12,92	

- Simülasyon çalışmalarından elde edilen en yüksek maksimum SAR değeri, 900 MHz frekansta yanak konumunda gözlüklü durum için, çocuk dielektrik özelliklerine sahip çocuk modelinde 15,76 W/kg olarak tespit edilmiştir.

Tablo 11: 835 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Fantomlardaki SAR Değişim Oranları

835 MHz	Yanak	Yetişkin SAM						Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özelliği)						Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özelliği)					
		Anten Sağda		Anten Ortada		Anten Solda		Anten Sağda		Anten Ortada		Anten Solda		Anten Sağda		Anten Ortada		Anten Solda	
	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	101,27	102,01	102,10	102,10	109,30	110,16	110,34						
	Metal Kúpeli	98,33	98,52	98,66	98,66	98,66		99,73				107,85							
	Metal Gözlüklü	100,60	102,41	102,20	102,20	102,20		107,55				116,31							
	Aksesuarsız	61,05	59,20	59,35	59,35	59,35	62,61	61,32	61,67	65,97	64,71	64,49							
	Metal Kúpeli	60,01	58,90	59,06	59,06	59,06		60,32			63,77								
	Metal Gözlüklü	66,88	66,03	66,34	66,34	66,34		69,70			73,91								

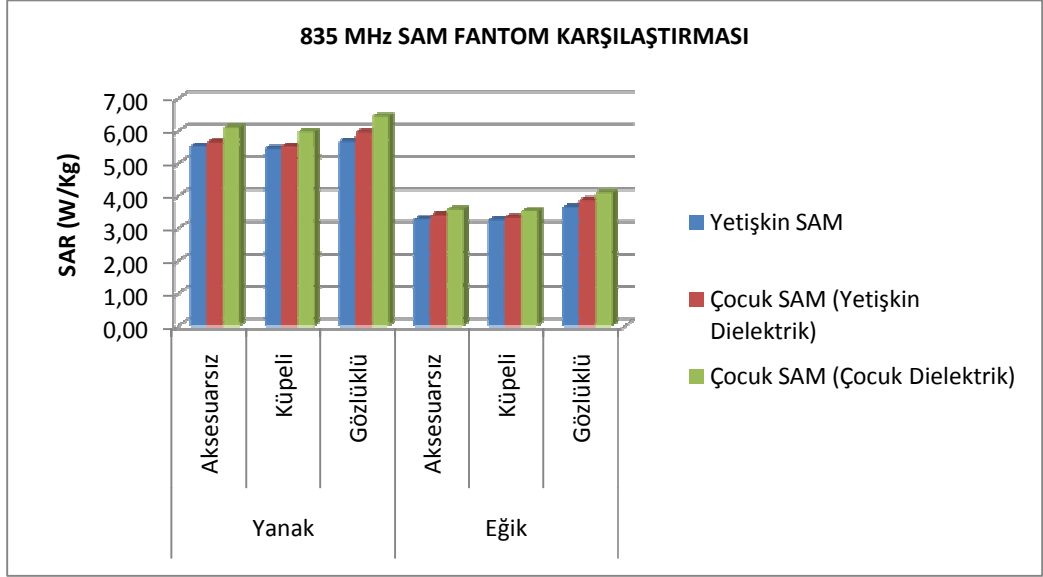
- 835 MHz'de SAM fantom referans alınarak çocuk ve yetişkin dielektrik özelliğine sahip çocuk modellerinde SAR değişim oranları incelendiğinde; SAM ve Çocuk kafa modelleri SAR değerleri arasında en yüksek artış %116,31 değer ile çocuk dielektrik özelliği Çocuk modelinin yanak konumunda gözlüklü durum için oluştuğu tespit edilmiştir.

Tablo 12: 900 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Fantomlardaki SAR Değişim Oranları

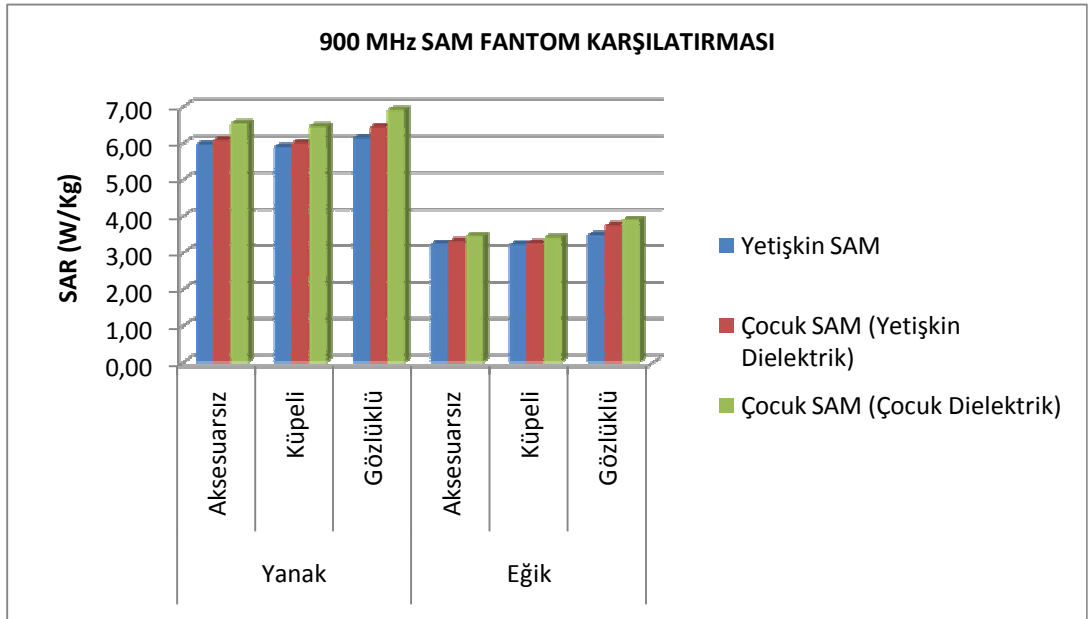
	Yetişkin SAM			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)			Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)					
	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda			
900 MHz	Aksesuarsız			100,00	100,00	100,00	101,76	101,97	101,96	109,52	109,78	109,87
	Metal Kúpeli			98,71	98,98	99,26		100,65			108,30	
	Metal Gözlüklü			103,08	102,98	103,09		108,06			115,93	
	Aksesuarsız			56,18	54,62	54,63	56,74	55,43	55,60	59,32	58,00	58,18
	Metal Kúpeli			55,17	54,00	53,96		54,73			57,35	
	Metal Gözlüklü			59,62	58,51	58,60		62,78				65,52
Yanak												
Eğik												

- 900 MHz'de SAM fantom referans alınarak çocuk ve yetişkin dielektrik özelliğine sahip çocuk modellerinde SAR değişim oranları incelendiğinde; SAM ve Çocuk kafa modelleri SAR değerleri arasında en yüksek artış %115,93 değer ile çocuk dielektrik özellikli Çocuk modelinin yanak konumunda gözlüklü durum için oluştuğu tespit edilmiştir.

Şekil 28: 835 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Kafa Fantomlarının SAR Değerlerinin Karşılaştırması



Şekil 29: 900 MHz için Yetişkin SAM Fantom ile Çocuk SAM Kafa Fantomlarının SAR Değerlerinin Karşılaştırması



Tablo 13: Yetişkin SAM Fantomda 835 MHz Frekans için Anten Konumlarından kaynaklı SAR Değişim Oranları

Yetişkin SAM FANTOM		Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda
835 MHz	Yanak	Aksesuarsız	100,00	99,82
		Metal Kúpeli	100,00	99,95
		Metal Gözlüklü	100,00	99,61
	Eğik	Aksesuarsız	101,29	100,08
		Metal Kúpeli	100,07	100,08
		Metal Gözlüklü	99,49	100,29

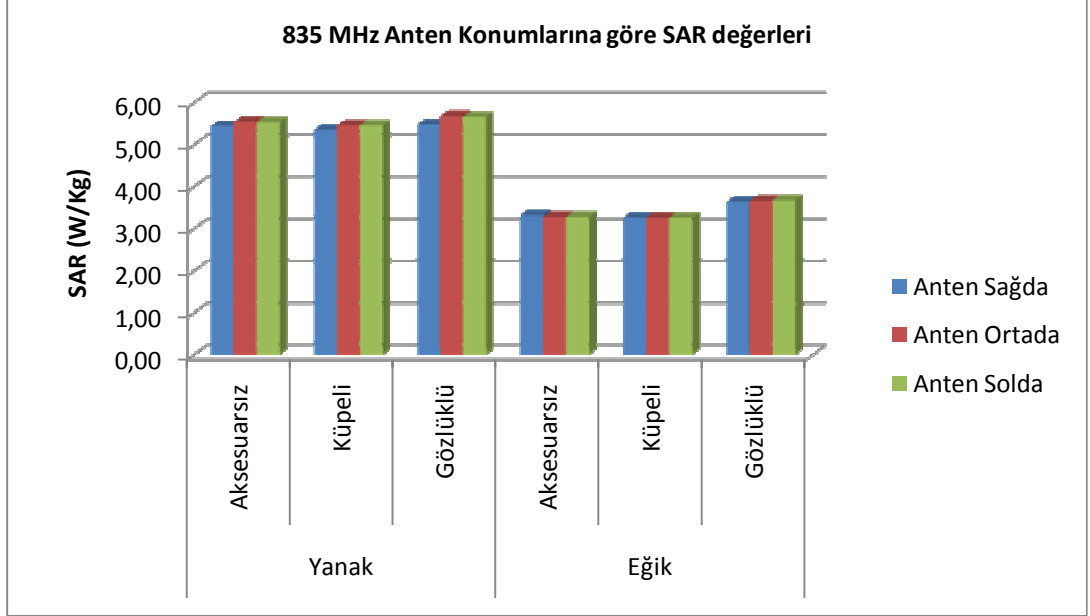
- Antenin ortada olduğu konum referans alınarak, SAM fantomda 835 MHz frekansta 10 gr doku için en yüksek SAR değeri, eğik konumda aksesuarsız durum için % 101,29 ile antenin telefonun sağında bulunduğu konumda tespit edilmiştir.

Tablo 14: SAM Fantomda 900 MHz Frekans için Anten Konumlarından kaynaklı SAR Değişim Oranları

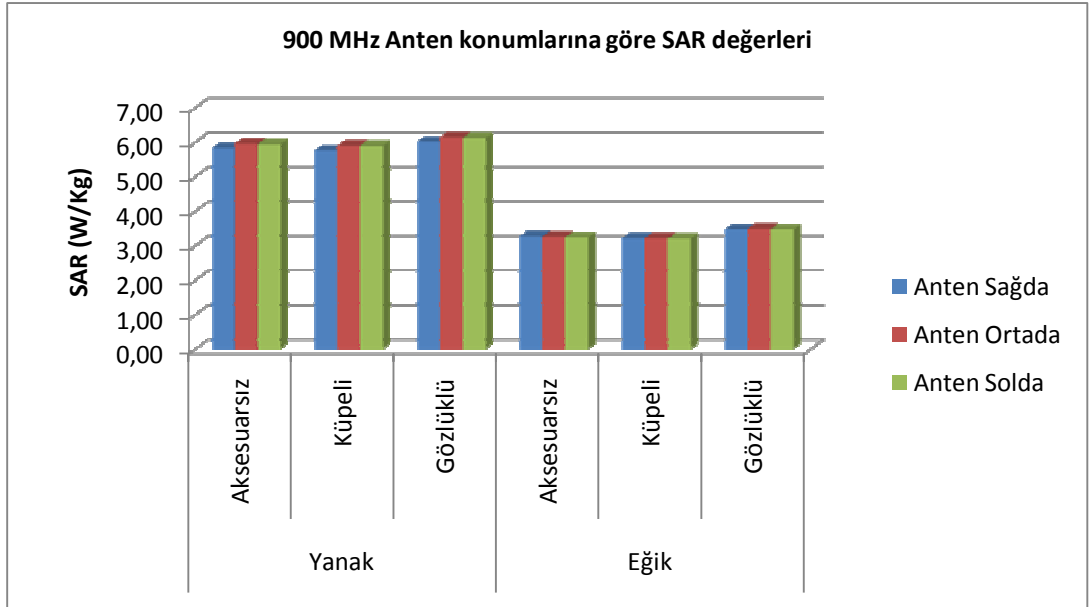
Yetişkin SAM FANTOM		Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda
900 MHz	Yanak	Aksesuarsız	100,00	99,56
		Metal Kúpeli	100,00	99,85
		Metal Gözlüklü	100,00	99,66
	Eğik	Aksesuarsız	100,61	99,59
		Metal Kúpeli	99,94	99,50
		Metal Gözlüklü	99,66	99,72

- Antenin ortada olduğu konum referans alınarak, SAM fantomda 900 MHz frekansta 10 gr doku için en yüksek SAR değeri, eğik konumda aksesuarsız durum için % 100,61 ile antenin telefonun sağında bulunduğu konumda tespit edilmiştir.

Şekil 30: 835 MHz için Yetişkin SAM Fantomda Anten Konumlarına göre SAR Değerlerinin Karşılaştırması



Şekil 31: 900 MHz için Yetişkin SAM Fantomda Anten Konumlarına göre SAR Değerlerinin Karşılaştırması



Tablo 15: 835 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR değişim oranına etkisi

			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)			Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)		
			Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda
835 MHz	Yanak	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	107,93	107,99	108,06
		Metal Kúpeli		100,00			108,15	
		Metal Gözlüklü		100,00			108,14	
	Eğik	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	105,36	105,54	104,58
		Metal Kúpeli		100,00			105,72	
		Metal Gözlüklü		100,00			106,05	

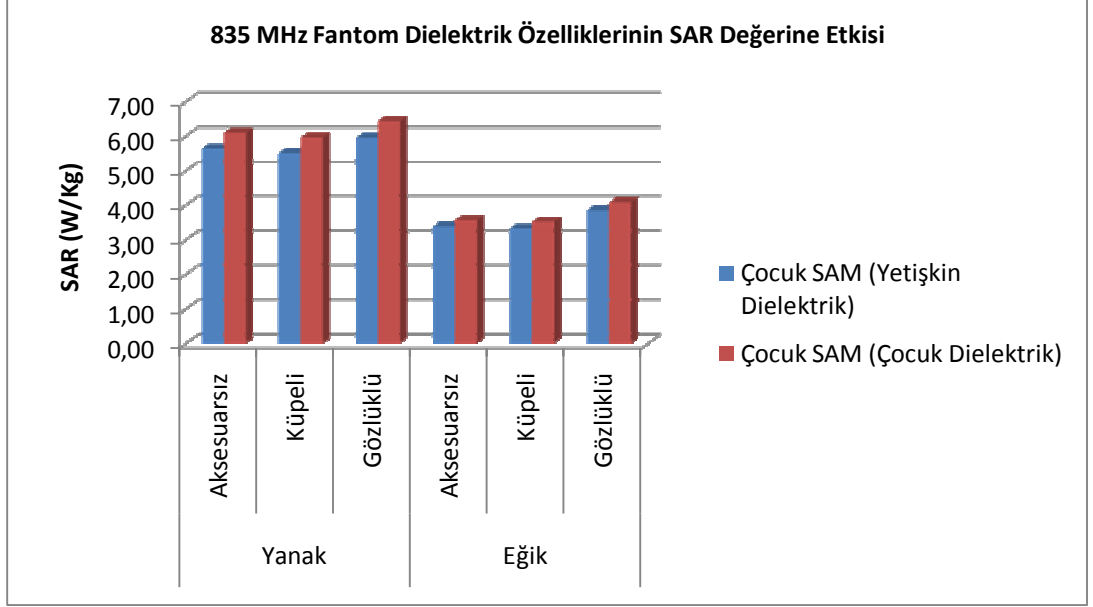
- Çocuk Kafa Modellerinde 835 MHz frekans için yetişkin dielektrik özellikli model referans alındığında 10 gr doku için SAR değerinde en yüksek artışlar çocuk dielektrik özellikli yanak konumunda tespit edilmiştir.

Tablo 16: 900 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR değişim oranına etkisi

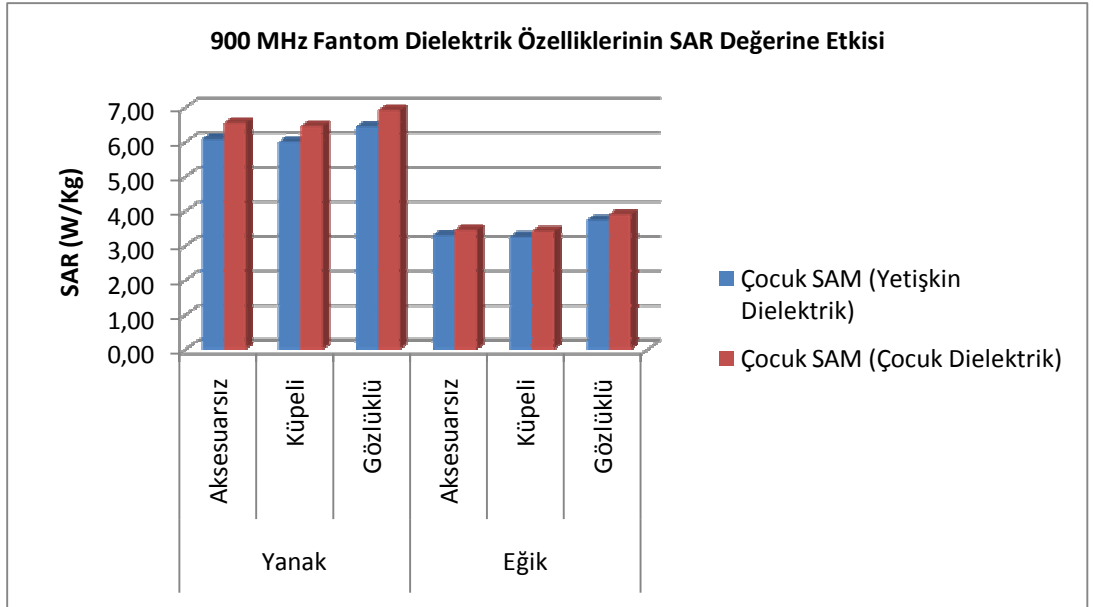
			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)			Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)		
			Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda
900 MHz	Yanak	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	107,63	107,66	107,76
		Metal Kúpeli		100,00			107,60	
		Metal Gözlüklü		100,00			107,28	
	Eğik	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	104,55	104,63	104,65
		Metal Kúpeli		100,00			104,78	
		Metal Gözlüklü		100,00			104,36	

- Çocuk Kafa Modellerinde 900 MHz frekans için yetişkin dielektrik özellikli model referans alındığında 10 gr doku için SAR değerinde en yüksek artışlar çocuk dielektrik özellikli yanak konumunda tespit edilmiştir.

Şekil 32: 835 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR Değerlerine Etkisi



Şekil 33: 900 MHz'te Dielektrik Özelliklerin SAR Değerlerine Etkisi



Tablo 17: 835 MHz’te Fantom Boyutunun SAR değişim oranına etkisi

			Yetişkin SAM			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)		
			Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Sağda	Anten Ortada
835 MHz	Yanak	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	101,27	102,01	102,10
		Küpeli	100,00	100,00	100,00		101,23	
		Gözlüklü	100,00	100,00	100,00		105,02	
	Eğik	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	102,56	103,58	103,90
		Küpeli	100,00	100,00	100,00		102,40	
		Gözlüklü	100,00	100,00	100,00		105,55	

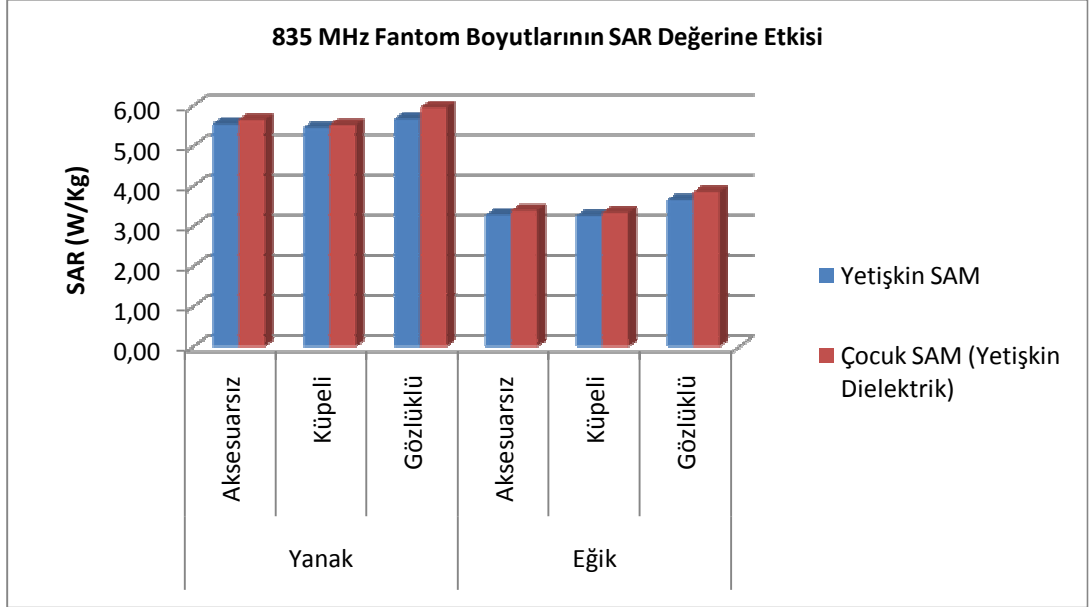
- 835 MHz’de Yetişkin SAM fantom referans alınarak, yetişkin dielektrik özellikli Çocuk SAM Fantomda, fantom boyutundan kaynaklı SAR değişim oranları incelendiğinde; SAR değerleri arasında en yüksek artış %105,55 değer ile yetişkin dielektrik özellikli Çocuk SAM Fantomda eğik konumda gözlüklü durum için oluştugu tespit edilmiştir.

Tablo 18: 900 MHz’te Fantom Boyutunun SAR değişim oranına etkisi

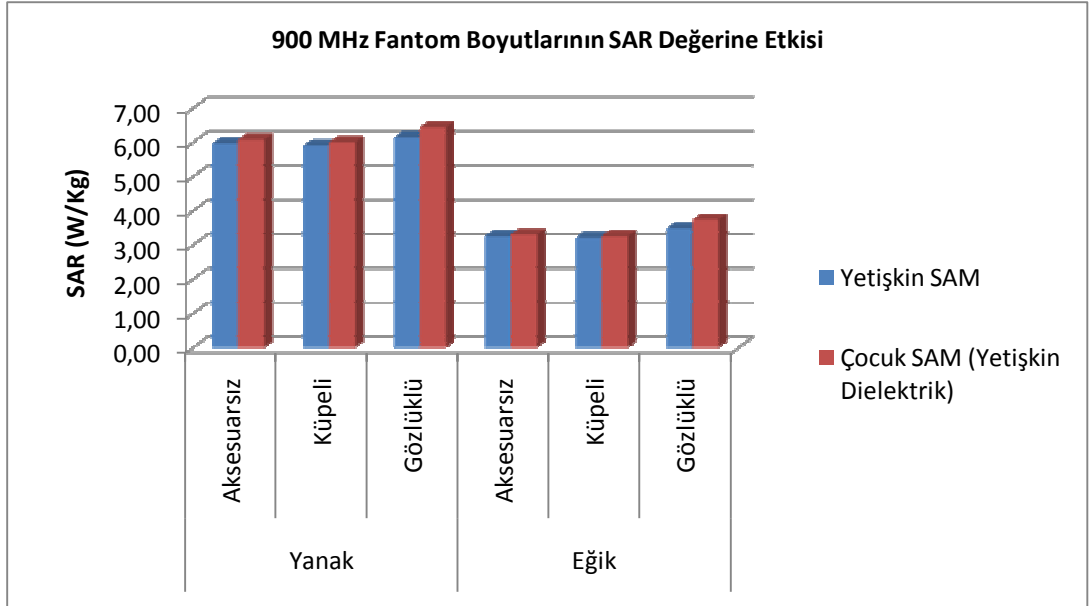
			Yetişkin SAM			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)		
			Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Sağda	Anten Ortada
900 MHz	Yanak	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	101,76	101,97	101,96
		Küpeli	100,00	100,00	100,00		101,69	
		Gözlüklü	100,00	100,00	100,00		104,93	
	Eğik	Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	100,99	101,49	101,78
		Küpeli	100,00	100,00	100,00		101,36	
		Gözlüklü	100,00	100,00	100,00		107,30	

- 900 MHz’de Yetişkin SAM fantom referans alınarak, yetişkin dielektrik özellikli Çocuk SAM Fantomda, fantom boyutundan kaynaklı SAR değişim oranları incelendiğinde; SAR değerleri arasında en yüksek artış %107,3 değer ile yetişkin dielektrik özellikli Çocuk SAM Fantomda eğik konumda gözlüklü durum için oluştugu tespit edilmiştir.

Şekil 34: 835 MHz'te Fantom Boyutlarının SAR Değerine Etkisi



Şekil 35: 900 MHz'te Fantom Boyutlarının SAR Değerine Etkisi

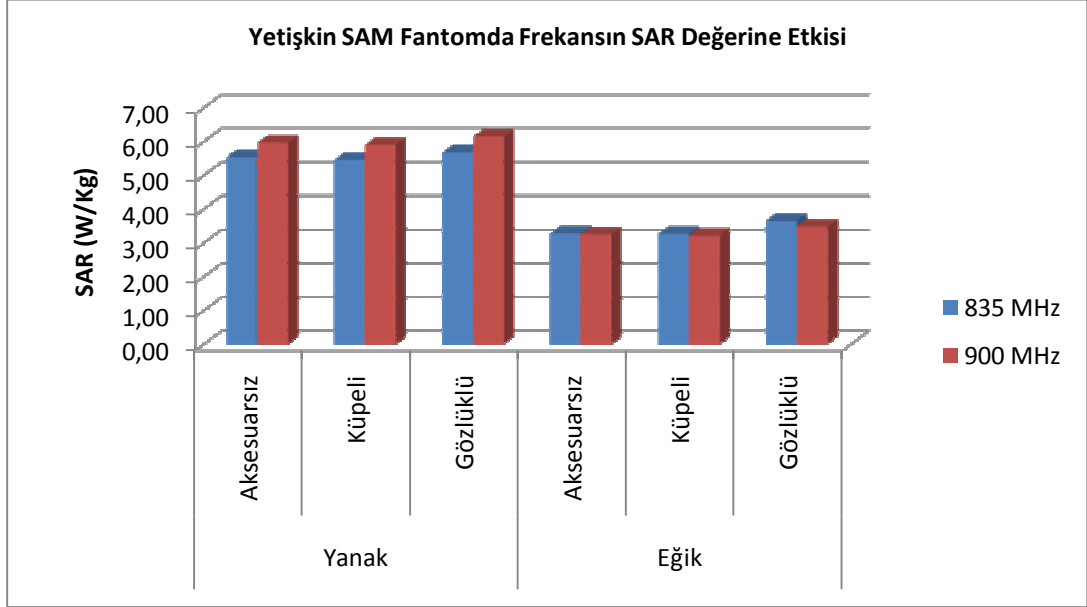


Tablo 19: Frekansın SAR değerinde oluşan değişim oranına etkisi

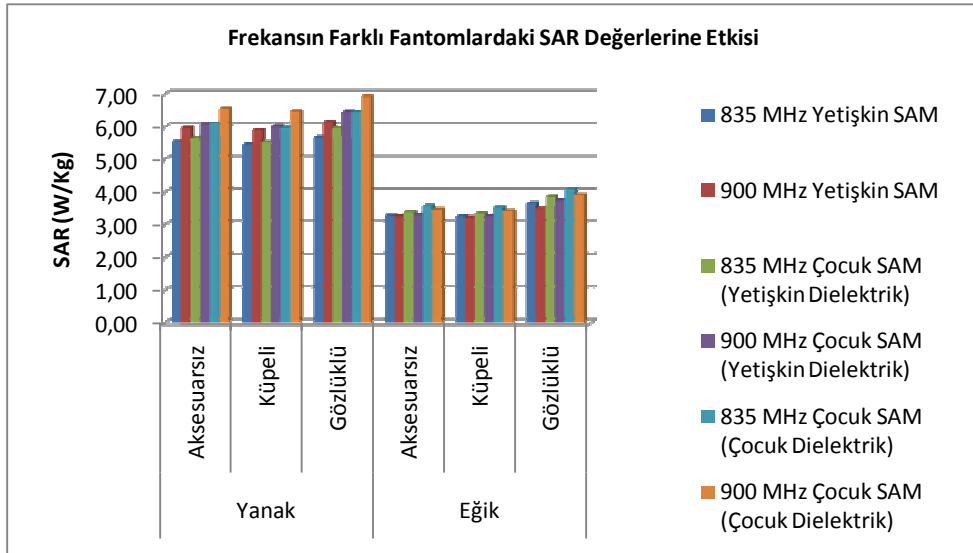
		Yetişkin SAM			Çocuk SAM (Yetişkin Dielektrik Özellikli)			Çocuk SAM (Çocuk Dielektrik Özellikli)		
		Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda	Anten Sağda	Anten Ortada	Anten Solda
835 MHz	Yanak	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		Metal Kúpeli	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
835 MHz	Eğik	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		Metal Gözlüklü	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		Aksesuarsız	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
900 MHz	Yanak	107,23	107,69	107,41	107,76	107,64	107,26	107,45	107,32	106,95
		Aksesuarsız	107,23	107,69	107,41	107,76	107,64	107,26	107,45	107,32
		Metal Kúpeli	107,65	108,18	108,08	108,68	108,68	108,13	108,13	108,13
900 MHz	Eğik	109,88	108,29	108,34	97,18	97,35	96,84	96,43	96,51	96,92
		Metal Gözlüklü	109,88	108,29	108,34	97,18	97,35	96,84	96,43	96,51
		Aksesuarsız	98,69	99,35	98,87	97,18	97,35	96,84	96,43	96,51
	Metal Kúpeli	98,59	98,71	98,14	97,71	97,71	97,71	96,85	96,85	96,85
	Metal Gözlüklü	95,59	95,42	94,88	97,00	97,00	97,00	95,46	95,46	95,46

- 835 MHz frekans referans alınarak 900 MHz'deki değerler kıyaslandığında en yüksek 10 gr SAR değeri artışı gözlüklü SAM fantomda %109,88 ile yanak konumunda tespit edilmiştir.

Şekil 36: Yetişkin SAM Fantomda Frekansın SAR Değerine Etkisi



Şekil 37: Farklı Fantomlarda Frekansın SAR Değerlerine Etkisi



5. TARTIŞMA

Hızla gelişen teknoloji ile birlikte insanların RF alan kaynaklarına maruziyeti de büyük bir artış göstermiştir. Radyo frekans alan kaynakları arasında cep telefonu hem beyin gibi hassas bir organa yakın konumlandırılması hem de yaygın kullanımı nedeni ile bilimsel çevrelerde ilgi konusu olmuştur.

Bu modelleme çalışmasında cep telefonu kullanımı sırasında aşağıda verilen birbirinden bağımsız altı parametrenin kafada oluşan SAR değerine etkileri incelendi. Bu parametreler:

- Cep telefonunun başa göre pozisyonu (yanak ve eğik konumları)
- Cep telefonu frekansı (835 MHz ve 900 MHz)
- Kafanın boyutu (yetişkin ve çocuk boyutları)
- Kafanın dielektrik özellikleri (yetişkin ve çocuk dielektrik özellikleri)
- Anten konumu (kasanın sağında, solunda ve ortada olduğu konumlar)
- Kullanılan metalik aksesuarlar (gözlük ve küpe)

Bu parametrelerin değişik durumları için oluşturulan maruziyet koşullarında maksimum SAR değeri ile 1 gr ve 10 gr dokudaki uzaysal tepe SAR değerleri hesaplandı. Tüm çalışmada elde edilen SAR değerleri "Bulgular" bölümünde 1 gr ve 10 gr doku için ayrı ayrı verildi. Literatürde SAR değerinin değişim oranı %10'dan büyük olduğunda farkın önemli olduğu kabul edilmektedir^{178,179}. Bu nedenle; modelleme çalışmaları sonunda hesaplanan SAR değerlerinde ilgilenilen parametrelere göre tespit edilen önemli değişiklikler aşağıda özetlenmiştir:

- SAR değerini en fazla etkileyen parametrenin cep telefonunun başa göre konumu olduğu ve yanak pozisyonunda elde edilen SAR değerlerinin eğik pozisyondan yüksek olduğu tespit edildi. 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri eğik konumda 835 MHz ve 900 MHz için sırası ile yanak konumuna kıyasla %40 ve %45 civarında azalmış bulundu. Diğer bir deyişle 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri yanak konumda 835 MHz ve 900 MHz için sırası ile eğik konumuna kıyasla %66 ve %81 civarında arttığı saptanmıştır.
- Frekansa bağlı olarak SAR değerleri incelendiğinde, yanak konumunda 900 MHz frekansta tespit edilen 10 gr doku uzaysal tepe SAR değerlerinin 835 MHz frekansta tespit edilen SAR değerlerine kıyasla %7'den fazla artış gösterdiği tesbit edildi. Eğik konumda ise 835 MHz frekanstaki SAR değerleri daha yüksek bulundu.

- Yetişkinlere göre sadece kafa boyutu göz önüne alındığında dahi çocukların yetişkinlere oranla daha fazla SAR'a maruz kaldıkları tespit edildi. Kafa boyutlarının küçülmesi ile 835 MHz ve 900 MHz frekans değerleri için hem yanak konumunda hem de eğik konumda kafada 10 gr doku için hesaplanan uzaysal tepe SAR değerlerinin %2 civarında daha yüksek olduğu gözlemlendi.
- SAM fantom çocuk dielektrik özellikleri ile modellendiğinde SAR değerlerinde yetişkin dielektrik özelliklerine kıyasla önemli ölçüde artış tespit edildi. Yanak konumunda 835 MHz ve 900 MHz'de 10 gr dokudaki uzaysal tepe SAR değerindeki artış %10 civarında bulundu. Çocuk SAR değerindeki bu artışın oluşmasında, kafa boyutunun küçülmesinin yanısıra dielektrik özelliklerdeki artışın büyük katkısı olduğu düşünüldü.
- Anten konumunun SAR değeri üzerindeki etkisinin tespit edilebilmesi amacıyla farklı anten konumlarına sahip telefon modelleri çalışıldı. Aksesuarsız durumda hem yanak konumunda hem de eğik konumda 835 MHz ve 900 MHz frekanslarda, telefon modellerinin oluşturduğu SAR değerleri arasında önemli bir fark tespit edilemedi.
- Mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip metalik küpe ve gözlüğün kullanıldığı durumlar için elde edilen sonuçlar incelendiğinde küpeli durumun aksesuarsız duruma göre SAR değerinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği gözlemlendi. Metalik dikdörtgen çerçeveli gözlüğün kullanıldığı durumda, uzaysal tepe SAR değeri gözlüksüz duruma kıyasla hem yanak hem de eğik konumda, 835 MHz de ve 900 MHz de yüksek bulundu. 835 MHz ve 900 MHz frekanslarında yanak konumunda 10 gr dokudaki uzaysal tepe SAR değeri için %3 civarında artış gözlemlendi. Eğik konumda 835 MHz'de bu oran %12'ye yaklaşırken, 900 MHz'de %7 civarında olduğu hesaplandı. Ayrıca kafa modelinde gözlüğün bulunduğu konum yakınında lokal SAR değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlendi. Bu durumun gözlüğün metal çerçevesinde indüklenen akımdan kaynaklandığı düşünüldü.

Literatürde cep telefonu maruziyetinden kaynaklı kafa SAR değerini incelemek üzere yapılmış çok sayıda çalışma mevcut olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar her zaman tutarlı olmamaktadır. Literatürdeki farklı sonuçların potansiyel nedenleri arasında çeşitli sebepler öne sürülmektedir^{180,181}:

1. Anatomik tabanlı modellerde kulak kepçesi ICNIRP 98 ile IEEE C95.1–1999 standartlarına göre kafanın bir parçası olarak kabul edilmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından kafa ile aynı maruziyet limitleri kullanılırken, diğer araştırmacılar tarafından IEEE C95.1b–2004 standardını referans alarak kulak kepçesini ekstremiteler olarak kabul edilmektedir. Böylece kulak kepçesinin kafanın ortalama SAR

değeri hesabına dahil edilmemesi ve genellikle de bunun yayınlarda belirtilmemesi söz konusu olmaktadır. Bu modelleme çalışmasında SAM fantom kullanılmış olup standartlar doğrultusunda SAM fantomdaki doku eşdeğeri sıvıda SAR değeri hesaplanmıştır dolayısıyla kulak kepçesi hesaplamaya dahil edilmemiştir.

2. Literatürde yaygın olarak kullanılan anatomik modelleri içeren bir fantom veritabanı mevcut değildir. Cep telefonu maruziyetinden kaynaklı SAR tespiti için çeşitli modeller kullanılmaktadır. Bu modeller arasında sadece SAM ve VHP datasına dayalı yetişkin erkek fantomu literatürde yaygın olarak kullanılmakta ve sonuçlar birbiri ile kıyaslanabilmektedir. Bu çalışmada da literatürde ve EM uyumluluk testlerinde yaygın olarak kullanılan SAM fantom kullanılmıştır.
3. Cep telefon modelinin standart olarak kafaya göre iki farklı pozisyonda konumlandırıldığı bilinmektedir (IEEE 1528). Yakın alanda hesaplanan SAR, esas olarak kaynak geometrisine, kaynak model üzerindeki RF akım yoğunluğu dağılımına ve kaynağın kayıplı kafa dokusuna göre konumlandırılmasına bağlıdır. Kafa ile telefon modeli arasındaki mesafedeki 1 mm'lik küçük bir değişim bile gözlenen SAR'ı önemli derecede değiştirebilmektedir. Sonuçlar arasındaki kıyaslamaların sağlıklı yapılabilmesi için bu konuya özen gösterilmiştir.
4. FDTD yazılımlarında, modellerin rotasyonundan sonra FDTD ızgaralarına göre voksellere ayrılırken merdiven etkisi oluşmaktadır. Bu etkiden kaçınmak amacı ile telefon modeli yerine kafa modeli uygun pozisyona gelinceye kadar çevrilmiştir.
5. Araştırmacılar verilerini normalize ederken, net giriş gücü ya da besleme noktası akımı olmak üzere iki farklı parametre kullanmaktadırlar. Mobil telefon modeli, SAM ya da herhangi bir anatomik modelin yanına konumlandırıldığında kafa modeline bağlı olarak cep telefonunun anten besleme noktası empedansı değişmektedir. Anten besleme noktası empedansı (Z), besleme noktası akımı (I) ve net giriş gücü (P_{net}),

$$P_{net} = \frac{1}{2} |I|^2 \operatorname{Re}(Z) \quad (1)$$

formülü ile ilişkilidir. Yapılan çalışmalar anten besleme noktası empedansının, kafa modeline, telefonun pozisyonuna ve cep telefonunun kendisine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Değişik kafa modelleri ve maruziyet koşulları farklı besleme noktası gerilimlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Böylece SAR'ın net

giriş gücüne ya da besleme noktası akımına göre normalize edilmesi halinde SAR değişimlerinin bu durumdan önemli ölçüde etkilendiği gözlenebilmektedir. Bu çalışmada SAR değeri anten giriş gücüne göre normalize edilmiştir ve elde edilen empedans değerleri tüm koşullar için belirtilmiştir.

6. SAR ortalaması almak için farklı algoritmalar kullanılmaktadır ve bunun belirtilmemesi literatürde sonuçların farklılığına neden olmaktadır. Bu modelleme çalışmasında kullanılan SEMCAD X yazılımında 12 alan bileşen yöntemi uygulanmaktadır.

Gazi Tıp Biyofizik Anabilim Dalı'nda ilk kez bilgisayar yazılımı (SEMCAD X) kullanılarak gerçekleştirilen bu simülasyon çalışmalarına başlarken literatürde belirtilen bu farklılıkları en aza indirebilmek amacıyla uluslararası alanda kabul gören ve geniş kapsamlı çalışmalardan biri olan IEEE'nin çalışması referans alınmıştır:

SAM ve anatomik kafa modellerinde mobil telefon maruziyetinden kaynaklı SAR tespitine yönelik yapılan çalışmayı IEEE'nin 34 numaralı standart koordinasyon komitesinin, 2. alt komitesine bağlı, 2 nolu çalışma grubu (SCC-34/SC-2/WG-2) yürütmüştür. SAM fantom, VHP kafa fantomu ve 7 yaşındaki Japon çocuk kafası modellerinin kullanıldığı bu çalışmada 835 MHz ve 1900 MHz'de, yanak ve eğik pozisyonlarında yetişkin ve çocuk fantomları için 1 gr ve 10 gr doku için uzaysal tepe SAR değerleri ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Bu çalışmaya akademik, devlete bağlı ve endüstriyel toplam 14 araştırma grubu katılmıştır. Araştırmacıların aynı modeller ile aynı maruziyet koşullarında belirledikleri SAR değerleri arasındaki değişimin tespit edilmesi amaçlanmıştır^{180,181} ve 835 MHz ile 1900 MHz frekanslı cep telefonları için 14 farklı ekip tarafından gerçekleştirilen SAR ölçüm ve hesaplama değerleri saptanmıştır.

SAM fantom ile SEMCAD-X yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen bu modelleme çalışmasında 835 MHz frekanslı maruziyet koşulları sonuçların IEEE çalışması ile karşılaştırılabilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar IEEE tarafından hesaplanan ve ölçülen değerler ile karşılaştırıldığında (Tablo 18) sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 20: IEEE SCC-34/SC2/WG2 çalışması ile Gazi Biyofizik çalışmasının SAR (W/kg) Değerleri karşılaştırması

Frekans – Konum	IEEE SCC-34/SC2/WG2 Tarafından Hesaplanan		IEEE SCC-34/SC2/WG2 Tarafından Ölçülen		Gazi Tıp Biyofizik Abd. Tarafından Hesaplanan	
	1-gram SAR ± SS	10-gram SAR ± SS	1-gram SAR	10-gram SAR	1-gram SAR	10-gram SAR
835 MHz Yanak	7.5 ± 0.4	5.3 ± 0.3	8.8	6.1	7.7	5.5
835 MHz Eğik	4.9 ± 0.6	3.4 ± 0.3	4.8	3.2	4.8	3.3

Ayrıca bu çalışmada Amerika'da kullanılan 835 MHz'lik frekans ile Avrupa'da kullanılan 900 MHz'lik frekans arasında karşılaştırma yapmak, dolayısıyla literatürde birlikte pek çalışılmayan bu frekanslar arasında SAR değerlerindeki değişim oranının tespit etmek mümkün olmuştur.

MRI tabanlı fantomlar yerine SAM fantomun seçilmesindeki temel amaç, bireylerin kişiye özgü anatomik yapısından bağımsız olarak değişkenlerin etkisinin, kontrollü deneyler ile saptanmasıdır.

Anatomik kafa modellerinde kulak kepçesinin kalınlığı anten besleme noktası ile kafa dokusu arasındaki mesafeyi belirlemesi nedeni ile absorpsiyon mekanizmasının temel parametrelerinden biridir. Doğumdan 15 yaşına kadar kulak kepçesinin eni ve yüksekliği hızla artmaktadır. Yetişkinlerde yavaş da olsa büyüme devam etmektedir. Kulaktaki büyüme ile birlikte kulak kepçesindeki kıkırdak yapının elastikiyetini kaybettiği rapor edilmiştir^{182,183}. Bu durumun su içeriğinin azalmasından kaynaklandığı dolayısıyla iletkenliğinde buna bağlı olarak azaldığı tahmin edilmektedir^{182,183}. Yüksek elastikiyet nedeni ile çocuk yaşlarda telefon ile kafa arasındaki mesafenin daha az olması muhtemeldir. Yetişkin 52 birey üzerinde yapılan ölçümlerde sıkıştırılmış kulak kepçesinin minimum kalınlığı 3 mm, ortalama kalınlığı ise 5 mm olduğu saptanmıştır^{183,184}. Anatomik tabanlı modellerdeki sayısal dozimetri çalışmaları arasındaki sonuçlara dair farkların diğer bir nedeni ise kulak kepçesinin konumlandırılmasındaki bireysel tercihlerden kaynaklanmaktadır.

MRI tabanlı fantomlarda çocuk ölçeklemesi karmaşık olduğundan çocuk boyutunda modelleme için de SAM fantom tercih edilmiştir. Yetişkin kafası homojen olarak 0.85 ile ölçeklendirildiğinde dış boyutları çocuk boyutunda fakat beyin hacmi yeni doğan çocuğa denk gelmektedir¹⁸⁵ ve bu nedenle çocuk kafasını küçültülmüş yetişkin kafası olarak düşünmek uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmemektedir.

Ancak SAM fantomda çocuk kafa modelini elde etmek için SAM fantomun çok yüzlü (polyhedron) yapısının farklı eksenlerde farklı ölçeklendirmeye izin vermemesi nedeniyle bu çalışmada yetişkin kafa çevresi ile çocuk kafa çevresi oranı olan 0,9 değeri genel ölçek olarak alındı.

Bu modelleme çalışmasında cep telefonu kafa modelinin yanına, IEEE, IEC, CENELEC ve TSE standartlarında yanak ve eğik konum olarak belirtilen iki farklı pozisyonda yerleştirildi ve eğik konumda yanak konumuna kıyasla daha düşük SAR değerleri elde edildi. Bu sonuç literatürdeki çalışmalarla uyumlu bulundu¹⁸¹. Eğik konumda SAR değerlerinin yanak konumuna göre 835 MHz de 1 gr ve 10 gr için yaklaşık %40 azaldığı, 900 MHz de bu azalma oranının %52 ile %55 seviyelerine ulaştığı tespit edildi. Bu durumun telefon kasasındaki akım yoğunluğunun yanak konumunda kafa fantomuna daha yakın mesafede bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Farklı anten konumlarının; 835 MHz ve 900 MHz frekanslı yanak ve eğik pozisyonda modellenen cep telefonlarının aksesuarsız SAM fantomda oluşturduğu SAR değerleri üzerinde önemli bir fark oluşturmadığı gözlemlendi.

Frekansa bağlı olarak SAR değerleri incelendiğinde, yanak konumunda 900 MHz frekansında tespit edilen SAR değerlerinin 835 MHz frekansta tespit edilen SAR değerlerine kıyasla önemli ölçüde yüksek olduğu görüldü. Eğik konumda ise 835 MHz frekanstaki SAR değerleri daha yüksek bulundu. 835 MHz frekanstaki SAR değerlerinin daha yüksek bulunmasının, bu frekanstaki anten boyunun daha uzun olması nedeniyle eğik konumda antenin kafaya daha fazla yaklaştığından kaynaklandığı düşünüldü.

Kafada kullanılan metalik implantların ve aksesuarların SAR'a etkisi bilimsel alanda merak konusudur. Bu aksesuarlardan biri olan gözlükle ilgili literatürdeki mevcut çalışmalardan bazıları şunlardır:

- Whittow ve Edwards tarafından 1,5–3 GHz aralığında düzlem dalga ve dipol kaynakların kullanıldığı çalışmada gözlüğün SAR değerine etkisi tespit edilmiştir. Kaynak kafa önüne konumlandırılmıştır. Frekansa ve gözlüğün özelliklerine bağlı olmak koşulu ile gözdeki uzaysal tepe SAR'ı %160'a kadar arttırabileceği ya da %80'e kadar düşürebileceği saptanmıştır. Tüm kafada ise %10 artışa neden olduğu belirtilmiştir. Gözlüğün boyut ve şeklinin önemli olduğu, lenslerin ve gözlük sapının ise daha az önemli olduğu belirtilmektedir^{173,174}.
- Joo ve arkadaşları yetişkin ve ölçeklenmiş çocuk kafa modellerinde, yatay ve dikey olarak konumlandırılmış cep telefonu maruziyeti kaynaklı SAR'a gözlük ve metalik implantların etkisini incelenmiştir.

Çocuk fantomunda absorblanan RF enerjinin yetişkinlerden daha fazla olduğu saptanmıştır. Gözlüğün SAR'a etkisinin önemli olmadığı, bazı telefon pozisyonlarında gözlüğün metalik çerçevesinden kaynaklı saçılmalar nedeni ile SAR'ın azaldığı belirtilmektedir¹⁷⁵.

- Wang ve ark., 1,5 GHz frekansında cep telefonundan kaynaklı SAR değerine metal çerçeveli gözlüğün etkisini incelemişlerdir. Kafada 10 gr SAR için maksimum 1,2 kat, gözde ise 1 gr SAR için 2,75 kat arttırdığı belirtilmiştir. Cep telefonu kaynaklı yüksek SAR dağılımını gözlüğün metal çerçevesinden indüklenen akımdan kaynaklandığı saptanmıştır¹⁸⁶.

Bu modelleme çalışmasında mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip metalik dikdörtgen çerçeveler ve Whittow ve arkadaşlarının da kullandığı akrilik camdan oluşan lensler kullanıldı. Yapılan simülasyon sonucunda gözlüğün, gözlüksüz duruma kıyasla 835 MHz de ve 900 MHz de uzaysal tepe SAR değerini yanak konumunda %2-%3 civarında ve eğik konumda ise %7-%11,5 arasında artırdığı tespit edildi. Ayrıca kafa modelinde gözlüğün bulunduğu konum yakınında lokal SAR değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlendi. Bu durumun Wang ve arkadaşlarının da belirttiği gibi gözlüğün metal çerçevesinde indüklenen akımdan kaynaklandığı düşünüldü.

Bir diğer aksesuar olan küpe ile ilgili çalışmada, Virtanen ve arkadaşları yarım dalga dipol anten kullanarak 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz pasif metalik implantların ve küpenin SAR dağılımına etkisini incelemişlerdir. Dipol antenin besleme noktası en kötü durum senaryosu dikkate alınarak küpe modelinin üst kısmını ortalamak kaydıyla küpeden 9 mm uzağa yerleştirilmiş ve 900 MHz için SAR değerinde önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir¹⁷².

Bu çalışmada kullanılan küpe modeli yaklaşık olarak Virtanen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki küpe ile aynı özellikte seçildi. RF alan kaynağı olarak daha güncel bir telefon modeli olan, %20 küçültülmüş $\lambda/4$ monopol antenli telefon modeli kullanıldı. En kötü durum senaryosu yerine, günlük hayatta karşılaşılabilecek çok daha muhtemel olan IEEE, IEC, CENELEC VE TSE standartlarında da belirtilen yanak ve eğik konumları tercih edildi. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde küpeli durumun aksesuarsız duruma göre SAR değerinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği gözlemlendi.

Yetişkinlere kıyasla çocukların RF alan maruziyetinden daha fazla etkilenmesi nedeniyle ölçeklenmiş yetişkin kafa modelleri kullanılarak yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Gandhi ve ark., 1996 yılında 835 MHz ve 1900 MHz de $\lambda/4$ monopol antenli telefon modeli kullanarak 5 ve 10 yaş için ölçeklenmiş anatomik çocuk modelleri ile çalışmışlar, 835 MHz'de 5

yaş için ölçeklenmiş çocuk modelinde 1 gr uzaysal tepe SAR değerinde %50 gibi önemli bir artış olduğunu rapor etmişlerdir¹⁸⁷.

Salles ve arkadaşlarının 850 MHz ve 1850 MHz de $\lambda/4$ monopol ve mikroşerit antenli telefon modelleri kullanarak 10 yaşındaki çocuk için ölçeklenmiş kafa fantomunda 1 gr uzaysal tepe SAR değerinde %60'ın üzerindeki oranlarda artış saptanmıştır¹⁸⁸.

Kuster ve arkadaşlarının, geliştirdikleri iki MRI tabanlı çocuk kafa modelinde 900 MHz 0.45λ dipol anten kullanılarak Gandhi ve arkadaşlarının yaptığı benzer hesaplama yapılmış, çocuk ve yetişkin uzaysal tepe SAR değerlerinde önemli bir fark gözlenmediği belirtilmiştir¹⁸⁹.

Gandhi ve arkadaşlarının 2002'de iki farklı MRI tabanlı yetişkin fantomu ve farklı ölçek faktörleri kullanarak 835 MHz ve 1900 MHz için yaptıkları çalışmada, ölçeklenmiş çocuk modelinde 835 MHz frekansta 1gr uzaysal tepe SAR değerinde %20 artış gözlenmiştir. Gandhi tarafından, Kuster ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada güncel telefon modeli yerine dipol anten kullanıldığına dikkat çekilmiştir¹⁹⁰.

Kuster ve arkadaşları ise Gandhi 1996 çalışmasına ilişkin değerlendirmede¹⁸³:

- Çocuk kafa modelini elde etmek için kullanılan ölçek faktörünün ortalama vücut yüksekliği olduğu,
- Çocuk kafa boyutunun bu nedenle çocuktan çok yeni doğana yakın olduğunu,
- Elde edilen yüksek SAR değerinin ölçekleme nedeni ile incelenmiş olan kafatası, kulak kepçesi ve yakınlaşan telefon mesafesinden kaynaklandığına dikkat çekilmektedir.

Wang ve arkadaşları MRI tabanlı yetişkin Japon erkek kafa fantomunu, Japon istatistiksel dataları dikkate alınarak 3 ve 7 yaşında iki farklı çocuk kafa modeline ölçeklemiştir. Gandhi ve Kuster gruplarının yaptığı çalışmalar ile benzer koşullar dikkate alınarak 900 MHz'de elde edilen MRI tabanlı yetişkin ve çocuk kafa fantomlarında SAR değerleri hesaplanmıştır. Yetişkin kafa modeli ile çocuk kafa modelleri karşılaştırıldığında, çocuk kafa modelinde yetişkine kıyasla monopol antenin çıkış gücü sabitlendiği durumlar için uzaysal tepe SAR değerinde dikkate değer bir artış gözlenirken, dipol antenin etkin akım değerinin sabitlendiği durum için uzaysal tepe SAR değerinde önemli bir fark gözlenmemiştir¹⁷⁶.

Lee ve ark., diğer araştırmacılardan farklı olarak anatomik tabanlı fantomlar yerine SAM fantomu ölçekleyerek çocuk kafa modelini elde etmişlerdir. Kullandıkları 1, 0,95, 0,9, 0,85 ve 0,8'lik ölçek faktörü için

yetişkin ve çocuk kafa modelleri arasındaki farkın %3'den daha az olduğunu ifade etmişlerdir¹⁹¹. Bu çalışmada bulunan %2'lik değişim Lee çalışması ile uyumlu bulundu.

Gerçek mobil telefon dünyasında, anten giriş empedansının başka bir deyişle anten çıkış gücünün nasıl değiştiğine dair kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Bu hem sistem tasarımından hem de güç yükseltici devrelerden kaynaklanmaktadır. Eğer güç yükseltici düşük çıkış empedansına sahip ise anten giriş empedansının direnç gösteren bileşenlerindeki azalış/artış, çıkış gücünü dolayısıyla da uzaysal tepe SAR artıracak/azaltacaktır. Mobil telefonun sabit çıkış gücüne sahip olması durumunda ise anten giriş empedansının direnç gösteren bileşenlerindeki azalış/artış da uzaysal tepe SAR'ı artırır/azaltır. Bu durum GSM sistemi kullanan çoğu telefon modelleri için geçerlidir. Fakat CDMA sisteminde, baz istasyonuna ulaşan gücü sabit tutmak için güç kontrol devresi mevcuttur. Bu durumda anten giriş empedansının değişimi, anten çıkış gücü için çokta önemli değildir. Küçük kafa boyutunda toplam gücün daha az absorblanması, anten çıkış gücünü dolayısıyla da uzaysal tepe SAR'ın azalmasına neden olabilmektedir¹⁷⁶.

Çalışmamızda kafa boyutlarının küçülmesi 835 MHz ve 900 MHz frekans değerleri için yanak ve eğik konumlarda kafada oluşan SAR değerlerinde önemli olmayan artış meydana getirdi. Artış oranının eğik durumda daha yüksek olduğu saptandı. Yanak konumunda 835 MHz ve 900 MHz frekanslarında kafa boyutundan kaynaklı SAR değişiminin %2 civarında olduğu hesaplandı. Eğik konumda 835 MHz frekansta %3 civarında SAR değerinde artış tespit edilirken, 900 MHz'de bu oran %2'yi geçmemektedir.

Biyolojik materyaller hücre içindeki su, iyon, organik moleküller ile hücre membranı ve hücre altı yapılardan oluşmaktadır¹⁷⁸. Organik moleküller sadece doku tipi ile ilişkiliyken, su miktarı yaşa bağlı olarak değişim göstermektedir¹⁷⁹. Yüksek su içeriği nedeni ile çocukların dokularının dielektrik özellikleri yetişkinlere göre daha yüksektir^{179,178}.

Gabriel, düzlem dalga kaynak ile 10, 30 ve 70 günlük sıçanların dielektrik özelliklerini kullanarak gerçekleştirdiği sayısal dozimetri çalışmasında; 27 MHz ile 2000 MHz arasındaki frekansların ve yaşa bağlı dielektrik özelliklerin SAR'a etkisinin %5'ten az olduğunu bildirmiştir¹⁷⁸.

Yüksek iletkenlik değerleri SAR'ın artmasına neden olurken, düşük dielektrik sabiti ise SAR'ın doku içerisindeki girme derinliğini arttırmaktadır. Dielektrik sabiti ve iletkenlik aynı oranda ve birlikte arttırıldığında, yetişkin ile çocuk arasında uzaysal tepe SAR değerinde

önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır¹⁷⁹. Dielektrik özelliklerin değişimine bağlı olarak sırası ile en yüksek SAR değerinden en düşük SAR değerine göre sıralama şu şekildedir¹⁷⁸:

- Sadece iletkenliğin (σ) artırıldığı durum
- Dielektrik sabitinin (ϵ_r) ve iletkenliğin (σ) birlikte artırıldığı durum
- Dielektrik sabitinin (ϵ_r) ve iletkenliğin (σ) değişmediği durum
- Sadece dielektrik sabitinin (ϵ_r) artırıldığı durum

Bu çalışmada, literatürde karşılaşılan iletkenlik (σ) ve dielektrik sabitinin (ϵ_r) aynı oranda ve/veya gelişigüzel seçildiği çalışmalar yerine, Gabriel ve Peyman'ın yaşın dielektrik özellikler üzerine etkisini inceleyen ölçüm çalışmaları dikkate alınmıştır (Sayfa 61, Tablo 5).

Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları neticesinde ele alınan değişkenler arasında SAR'a en fazla katkıyı gösteren değişkenlerden biri iletkenlik değerinin ve dielektrik sabitinin artırılmasıdır. Hem yanak konumunda hemde eğişik konumda 835 MHz ve 900 MHz için kafada oluşan SAR değerinde önemli ölçüde artış olduğu gözlenmiştir (Sayfa 103, 104; Tablo 11-12).

Bu araştırmada gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında EM alanlara maruziyet ile alınan doz arasındaki ilişkinin tesbiti amaçlanmıştır. Ancak günümüzde EM alanların olası etkilerinin araştırılmasında bilgisayar destekli yürütülen çalışmalar yalnızca dozimetri çalışmaları değildir. EM alan etkilerinin deney hayvanları ile araştırılmasında bilgisayar yardımı ile sinir ağları çalışmaları, formülasyon ve modelleme çalışmaları da mümkün olabilmektedir. Güler ve ark. çalışmalarında çok katmanlı idrak sinir ağları kullanılarak elektrik alanların lipid peroksidasyon ve antioksidan enzimler üzerine etkilerini araştırmıştır. Elde edilen deney sonuçları sinir ağlarına öğrenme verisi olarak uygulanıp ileri beslemeli sinir ağının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Bu eğitim sonucu; dokulara elektrik alan uygulamadan bilgisayar ortamında elektrik alanın doku etkisinin belirlenmesi sinir ağı ile tahmin edilmiştir. Elektrik alan deney sonuçlarına ait sinir ağı tahmin performansından elde edilen verilerin yüzde değerleri yüksek doğrulukta bulunmuştur. Sonuçta ileri beslemeli sinir ağlarının pek çok uygulama alanında kullanıldığı gibi elektrik alan çalışmalarında da uygulanabileceği tespit edilmiştir^{51,52}. Tohumoğlu ve ark., EM alanların biyolojik etkilerinin saptanması amacıyla in vivo yapılmış olan çalışmalar sonucunda deney hayvanlarının çeşitli dokularından elde edilen verileri kullanarak, bu etkilerin formülasyon ve modellemeleri konusunda çalışmışlardır. Lipid peroksidasyonu ve hücre solunum aktivitelerinde 50 Hz manyetik alanlar etkisinde gözlenen değişimlerin analizi ve formülasyonu için Genetik Programlama (GP) uygulanmış, seçilen yönteminin modellemelerde başarılı bir yöntem

olduğu elde edilen tutarlı standart sapmalar ve korelasyon katsayıları ile tespit edilmiştir⁵⁷.

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda kafada kullanılan metalik aksesuarların, kafa boyutunun, kafanın dielektrik özelliklerinin, telefonun kullanım pozisyonunun, telefonda kullanılan antenin konumunun ve kullanılan frekansın SAR değerine etkisi incelenmiş, 1 gr doku ve 10 gr doku ile maksimum SAR değerleri hesaplanmıştır. Böylece belirtilen parametrelerin SAR değeri üzerinde ne kadar etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Cep telefonu kaynaklı yakın alan EM enerjinin biyolojik dokular tarafından absorpsiyonunda, manyetik alan etkileşiminin vücudun yüksek dielektrik sabiti nedeni ile elektrik alan etkileşimine kıyasla daha baskın olduğu bildirilmiştir¹⁸³.

Manyetik alan, cep telefonu kullanıcısının kayıplı deri ve dokularında endüksiyon akımları (eddy current) oluşturmakta, dolayısıyla enerji absorpsiyonunda artış meydana gelmektedir. Absorpsiyon mekanizmasında rol alan temel parametreler cep telefonundaki RF akımlar, bu akımlar ile deri arasındaki mesafe ve dokunun dielektrik özellikleridir. Absorpsiyonun, ya da ortalama ve uzaysal tepe SAR değerlerinin, esas olarak anten besleme noktası akımından oluşan manyetik alan etkileşiminden kaynaklandığı ve maruziyet SAR dağılımının, anten ve telefon kasasındaki akım dağılımına ve bu akımların kafadan uzaklığına bağlı olarak yönetildiği düşünülmektedir¹⁸³.

Gazi Biyofizik Anabilim Dalı'nda "EM alanlar Simülasyon Laboratuvarı" kurmayı planlamaktayız. Bu modelleme çalışması ile Laboratuvar kurma aşamalarının ön çalışmalarından birisi gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, cep telefonu kullanıcılarına yönelik SAR dağılımını etkilediği düşünülen her aksesuar ya da maruziyet koşulları için modelleme çalışmalarının devamlılığı sağlanacaktır. Ayrıca EM alanların dokuda indükledikleri akım ve alanların ölçümünü gerçekleştirmek üzere gerekli donanımın temin edilmesi ve simülasyon çalışmalarının ölçümlerle desteklenmesi hedeflenmektedir. EM alan – biyolojik doku etkileşiminde gerçekleşen mekanizmaların neler olduğuna ilişkin ayrıntılı in vivo çalışmalar ile birlikte yürütülecek modelleme çalışmalarının ölçümlerle paralel olarak ELF, RF ve MW frekanslarda sürdürülmesi yakın gelecek planlarımız arasında yer almaktadır.

6. SONUÇ

Gelişen teknoloji ile birlikte kablosuz iletişim teknolojilerini kullanan RF alan kaynakları ve bu cihazları kullananların sayısı hızla artmıştır. Bu hızlı artış sonucunda bilimsel alanda ve halk arasında bu teknolojinin olası sağlık etkileri gündeme gelmiştir. İnsanların cep telefonu maruziyeti ile aldıkları SAR değerlerinin bilinmesi bu nedenle önem taşımaktadır.

Bu çalışmada SAM kafa fantom ve FDTD yönteminin kullanıldığı SEMCAD-X yazılımı ile cep telefonu maruziyetinden kaynaklı SAR değerleri tespit edilmiştir. SAR değerleri üzerinde etkisi olduğu düşünülen küpe, gözlük gibi metalik aksesuarlar, kafanın dielektrik özellikleri, kafa boyutu, anten konumu, cep telefonunun kullanım pozisyonu ve kullanılan cep telefonu frekansı gibi parametreler için 1 gr ve 10 gr uzaysal tepe SAR değerleri ile maksimum SAR değerleri incelenen tüm koşullar için hesaplanmıştır. Değerlendirme aşamasında Türkiye, Avrupa ve Amerika'daki standartların 10 gr uzaysal tepe SAR değeri üzerinde uzlaşması nedeni ile 10 gr uzaysal tepe SAR değerleri dikkate alınmıştır.

Yapılan SAR hesaplamaları sonucunda SAR değerine en fazla etkileyen parametrenin cep telefonunun kullanım pozisyonu olduğu saptanmıştır. Eğik pozisyonunun, yanak pozisyonuna göre dokuda %40 civarında daha az SAR oluşturduğu olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile cep telefonu maruziyetini en aza indirebilmek için alınabilecek önlemlerin başında cep telefonunun eğik pozisyonda kullanımı gelmektedir.

Cep telefonu kullanımında alınan SAR değerini etkileyen en önemli ikinci parametre ise kafanın dielektrik özellikleridir. Çocuk kafası hem boyutlarının küçüklüğü hem de dielektrik özelliklerinin yetişkinlere kıyasla daha yüksek olması nedenleriyle yetişkinlerden önemli derecede daha fazla SAR değeri almaktadırlar. Ayrıca gerçekte alınan SAR değerinin, bu çalışmada hesaba katılmayan kulak kepçesinin boyutu, elastikiyeti ve kafatasının inceliği gibi anatomik nedenler ile daha fazla artması söz konusudur. Bu şartlar altında çocukların cep telefonundan yetişkinlerden daha fazla etkilenecekleri dikkate alınarak gerekli önlemler alınmalıdır.

Cep telefonu çalışma frekansı arttıkça SAR değeri de artmaktadır. Gün geçtikçe teknolojinin gelişimine bağlı olarak kablosuz iletişim ve takip sistemlerinin çalışma frekanslarında artış gözlenmektedir. Dolayısı ile yeni teknolojilerin halka sunulmadan ya da yaygınlaşmadan önce doz oranlarının tespit edilmesi ve risk analizinin yapılması,

kullanımında da kar zarar hesabının göz önünde bulundurulması zorunlu hale gelmiştir.

Günlük hayatımızda yaygın olarak kullandığımız çeşitli metalik aksesuarlar nedeni ile de aldığımız SAR değeri değişim göstermektedir. Bu aksesuarlar arasında gözlük kullanımına bağlı olarak SAR değerleri incelenmiş telefonun konumu başta olmak üzere farklı koşullar altında SAR değerini önemli ölçülerde arttırabileceği saptanmıştır. Ayrıca gözlükte indüklenen akım nedeni ile göz gibi hassas bir organ daha yüksek SAR'a maruz kalmaktadır. Bu çalışmada hesaplanan en yüksek SAR değeri, yanak konumunda çocuk dielektrik özelliklerine sahip gözlüklü çocuk kafa modelinde saptanmıştır.

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan diğer bir metalik aksesuar olan küpenin SAR değerini etkilemediği gözlenmiştir. Ancak cep telefonunun farklı kullanım konumları ve farklı boyutlardaki küpe modellerinde, rezonans ve mesafeye bağlı olarak farklı SAR değerlerinin saptanması olasıdır. Dolayısı ile cep telefonu kullanımı sırasında olabildiğince metalik aksesuarların kullanılmaması önerilmektedir.

Diğer parametrelerden kafa boyutu ve anten konumunun SAR değeri üzerine önemli etkisi saptanmamıştır.

Modelleme çalışmalarının SAM fantomun yanı sıra MRI tabanlı anatomik fantomlarda da yürütülmesi, modelleme ile elde edilen alan ve akım değerlerinin ölçüm sistemlerinde doğrulanması, çalışmaların farklı boyut, konum ve koşullarda tekrarlanması planlanmaktadır.

7. ÖZET

Son yıllarda hızla gelişen teknoloji ile insanlar doğal alan kaynaklarının yanısıra yapay alanlara daha fazla maruz kalmaktadır. Özellikle kablosuz iletişim teknolojilerinin günlük yaşamının her alanında, giderek daha fazla yaygınlaşması ve beyin gibi hassas bir organa yakın olması insan sağlığı üzerinde oluşturabileceği olası risklerin ve endişelerin artmasına neden olmuştur.

Bu tez çalışmasında, insan kafasının cep telefonu kullanımı ile maruz kalabileceği EM alan etkileri; farklı frekans, anten konumları, kafa boyutu, kafanın dielektrik özellikleri, cep telefonu kullanım pozisyonları ve günlük hayatta yaygın olarak kullanılan küpe ve gözlük gibi metalik aksesuarlar göz önüne alınarak ayrıntılı olarak incelendi. Böylece cep telefonu maruziyetinden kaynaklı SAR değerine bu parametrelerin etkisi kontrollü deneyler ile saptanmaya çalışıldı. Bu amaçla dokuda oluşan doz değeri, incelenen her koşul için 1 gr ve 10 gr uzaysal tepe SAR değerleri ile maksimum SAR değerleri FDTD yöntemini kullanan SEMCAD X yazılımı ile hesaplandı.

Bu çalışma kapsamında gelişim sürecinde bulunan ve dış etkilere karşı yetişkinlere oranla daha hassas olan çocuklar da SAR değerleri hesaplandı ve buna ilişkin risk değerlendirmesi yapıldı.

Çalışmada elde edilen bulgular sonucunda SAR değerini en fazla etkileyen parametrenin cep telefonu kullanım pozisyonu olduğu saptandı. Yanak konumunda eğişik konumuna kıyasla önemli oranda artış gözlemlendi.

Dokuların dielektrik özellikleri SAR değerlerinde önemli bir artışa neden olan bir parametre olduğu doğrulandı. Çocuk dielektrik özellikleri, yetişkin dielektrik özelliklerine kıyasla daha fazla SAR değerleri oluşturdu. Çocuklarda kafa boyutundan kaynaklı SAR değerindeki artış önemli oranda olmamasına rağmen, yüksek dielektrik özelliklerinin katkısı ile çocukların yetişkinlere göre önemli oranda daha yüksek SAR değerleri aldığı saptandı.

Cep telefonunun kullanım frekansına, antenin konumuna, küpe ve gözlük gibi metalik aksesuarların kullanımına bağlı olarak farklı oranlarda SAR değerlerine etki tespit edildi. Böylece hangi parametrenin daha önemli olduğu ve alan maruziyetini en aza indirebilmek için neler yapılabileceği belirlendi.

8. SUMMARY

In recent years humans are more exposed to human-made fields than natural fields with developing technologies. Especially, widespread of wireless communication technologies in all areas of daily life and getting closer to sensitive organs like brain caused an increase in possible risks and worries about human health.

In this study, effects of EM field exposure on human head while using mobile phone have been investigated in detail considering different frequencies, antenna locations, head dimension, dielectric properties of head, usage positions of mobile phone and widespread usage metallic accessories like earrings and glasses. So, an effect of these parameters on SAR values, caused by mobile phone exposure, was determined by controlled experiments. With this aim, dose value in the tissue, for each condition 1 gr. and 10 gr. spatial-peak SAR values and maximum SAR values were calculated by SEMCAD X software which uses FDTD method.

Within the scope of this study, SAR values were calculated in growing-up children, who are more sensitive to external impacts than adults, and risk evaluation was done.

As a result of findings obtained in the study, it was determined that the most affectional parameter on SAR value was mobile phone usage position. In the cheek position, it was observed a crucial increase compared to tilt position.

The increase in dielectric properties of tissues was confirmed as a parameter causing a significant increase in SAR values. Child tissue's dielectric properties contributed more SAR values when compared to adults'. Although the increase in SAR values due to child's head dimension was not enough considerable, it was observed that children absorbed higher SAR values with respect to adults because of high dielectric properties.

Effects on SAR values in different ratios depending on mobile phone frequency, antenna position, usage of metallic accessories like earrings and glasses were determined. Thus, which parameter is most important and what can be done to minimize the field exposure was defined.

9. KAYNAKLAR

1. Internal Dosimetry, Working Group Report, EMF RAPID: Assessment of Health Effects from exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields. US. 1998.
2. Canseven AG, Seyhan N. Çevresel ELF Manyetik Alanların Etkileri: Kobay Deri Kollagen Sentezinde Değişimler ve Deney Hayvanından İnsana Ölçülendirme. Gazi Tıp Dergisi 2005, 16 (4): 160 - 165.
3. Kaune WT, Philips RD. Dosimetry for Extremely Low-Frequency Electric Fields. Grondolfo M, Michaelson SM, Rindi A. Editors. Biological Effects and Dosimetry of static and ELF Electromagnetic Fields. New York, Plenum press, 1985. pp: 145-165.
4. Tenford TS. Interaction of ELF Magnetic Fields with Living Matter. In Polk C, Postow E. Editors. CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields. Boston, CRC press, 1986. pp197-228.
5. Rafferty CN, Philips RD, Guy Aw. Dosimetry Workshop: Extremely-Low-Frequency Electric and Magnetic Fields. Bioelectromagnetics 1992; Supplement 1: 1-10.
6. Durney CH. Electromagnetic Dosimetry for Models of Humans and Animals: A Review of Theoretical and Numerical Techniques. Proceedings of IEEE 1980; 68(1): 33-40.
7. Kaune WT, Guttman JL, Kavet R. Comparison of Coupling of Humans to Electric and Magnetic Fields with Frequencies Between 100 Hz and 100kHz. Bioelectromagnetics 1997; 18: 67-76.
8. Polk, C. and Postow, E. Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, Second Edition, CRC Press, Florida, USA, 1996.
9. Stuchly MA, Lecuyer DW, McLean J. Cancer promotion in a mouse skin model by a 60 Hz magnetic field: 1. Experimental design and exposure system. Bioelectromagnetics 1991; 12: 261-271.
10. CANSEVEN AG. Değişik Şiddet ve Süreli Manyetik Alanların Deri Hidroksiprolin Seviyesine Etkisi. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi; 1998.
11. Canseven AG, Seyhan N. Ellipsoid Models for Human and Guinea Pigs Exposed to Magnetic Fields. Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03. IEEE International Symposium on 2003; 2:1227 – 1231.
12. CANSEVEN AG, SEYHAN N. AC Manyetik Alanların Deri Kollagen Sentezine Etkisi. XIII. Ulusal Biyofizik Kongresi, ESKİŞEHİR, Bildiri Özetleri, S19 (2001)
13. CANSEVEN AG, SEYHAN N. Manyetik (B) Alanlar Deride Protein Sentezini Etkiler mi? XI. Ulusal Biyofizik Kongresi, 31 Ekim-2 Kasım, 1999, ANTALYA, Program ve Bildiri Özetleri Kitabı, P13, sayfa 49

14. CANSEVEN AG, SEYHAN N. Deneý Hayvanlarına Uygulanan Manyetik (B) Alanların İnsan için Ölçülandırılması: Elipsoid Modelleme, XI. Ulusal Biyofizik Kongresi, 31 Ekim-2 Kasım, 1999, ANTALYA, Program ve Bildiri Özetleri Kitabı, P14, sayfa 50 (1999)
15. Schwan HP, Li K. Hazards due to total body irradiation. 1956 (Proceedings IRE 44 pp: 1572-1581).
16. Johnson CC, Durney CH, Massoudi H. Electromagnetic power absorption in anisotropic tissue media. IEEE Trans Microwave Theory Tech. 1975; MTT- 23: 529-532.
17. Anne A, Santio M, Salati OM, Schwan HP. Relative microwave absorption cross sections of biological significance. Biological Effects of Microwave Radiation. New York: Plenum, 1960, vol. 1. pp:153-176.
18. Shapiro AR, Lutomirski RF, Yura HT. Induced fields and heating within a cranial structure irradiated by an electromagnetic planewave. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1971; MTT-19: 187-196.
19. Kritikos HN, Schwan HP. Hot spots generated in conducting spheres by electromagnetic waves and biological implications. IEEE Trans Biomed. Eng. 1972, BME-19: 53-58.
20. Lin JC, Guy AW, Kraft GH. Microwave selective brain heating. J. Microwave Power 1973; 8: 275-286.
21. Lin JC, Guy AW, Johnson CC. Power deposition in a spherical model of man exposed to 1-20 MHz Electromagnetic fields. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1973; MTT-21:791-797.
22. Joines WT, Spiegel RJ. Resonance absorption of microwaves by the human skull. IEEE Trans Biomed. Eng. 1974; BME-21: 46-48.
23. Weil CM. Absorption characteristics of multilayered sphere models exposed to UHF/microwave radiation. IEEE Trans Biomed. Eng. 1975; BME-22: 468-476.
24. Kritikos HN, Schwan HP. The distribution of heating potential inside lossy spheres. IEEE Trans Biomed. Eng. 1975; BME-22: 457-463.
25. Durney CH, Johnson CC, Massoudi H. Long-wavelength analysis of planewave irradiation of a prolate spheroid model of man. IEEE Trans Microwave Theory Tech. 1975; MTT-23: 246-254.
26. Johnson CC, Durney CH, Massoudi H. Long-wavelength electromagnetic power absorption in prolate spheroidal models of man and animals. IEEE Trans Microwave Theory Tech. 1975; MTT-23: 739-747.
27. Massoudi H, Durney CH, Johnson CC. Long-wavelength analysis of planewave irradiation of an ellipsoidal model of man. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1977; MTT-25: 41-46.
28. Massoudi H, Durney CH, Johnson CC. Long-wavelength electromagnetic power absorption in ellipsoidal models of man and animals. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1977; MTT-25: 47-52.

29. Massoudi H, Durney CH, Johnson CC. Geometrical-optics and exact solutions for internal fields and SARs in a cylindrical model of man as irradiated by an electromagnetic planewave. *Rad. Sci.* 1979.
30. Livesay DE, Chen K. Electromagnetic fields induced inside arbitrary shaped biological bodies. *IEEE Trans Microwave Theory Tech.* 1974; MTT-22 (11): 1273-1280.
31. Chen KM, Guru BS. Internal EM field and absorbed power density in human torsos induced by 1-500-MHz EM waves. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1977; MTT-25:746-755.
32. Chen KM, Guru BS. Induced EM fields inside human bodies irradiated by EM waves of up to 500 MHz. *J. Microwave Power* 1977; 12:173-183.
33. Hagmann MJ, Gandhi OP, Durney CH. Numerical calculation of electromagnetic energy deposition for a realistic model of man. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1979; 27(9): 804-809.
34. Gandhi OP, Hagmann MJ, D'Andrea JA. Part-body and multibody effects on absorption of radio frequency electromagnetic energy by animals and by models of man. *Rad. Sci.* 1979; Suppl. 6, 14: 15-21.
35. Hagmann MJ, Gandhi OP. Numerical calculation of electromagnetic energy deposition in man with ground and reflector effects. *Rad. Sci.* 1979; Suppl. 6, 14: 23-29.
36. Hagmann MJ, Gandhi OP, D'Andrea JA, Chatterjee I. Head resonance: Numerical solutions and experimental results. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1979; 27(9): 809-813.
37. Lacy-Hulbert A, Metcalfe JC, Hesketh R. Biological responses to electromagnetic fields. *The FASEB Journal* 1998; 12: 395-420.
38. Foster KR, D'Andrea JA, Chalfin S, Hatcher DJ. Thermal modeling of millimeter wave damage to the primate cornea at 35 GHz and 94 GHz. *Health Physics* 2003; 84 (6): 764-769.
39. Simko M, Mattsson MO. Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields as Effectors of Cellular Responses In Vitro: Possible Immune cell Activation. *Journal of Cellular Biochemistry* 2004; 93: 83-92.
40. Nordenson I, Mild KH, Andersson G, Sandstrom M. Chromosomal aberrations in human amniotic cells after intermittent exposure to fifty hertz magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1994; 15: 293-301.
41. Ivancsits S, Diem E, Jahn O, Rüdiger HW. Intermittent extremely low frequency electromagnetic fields cause DNA damage in a dose dependent way. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 2003; 76(6): 431-436.
42. Khalil AM, Qassem W. Cytogenetic effects of pulsing electromagnetic field on human lymphocytes in vitro: chromosome aberrations, sister-chromatid exchanges and cell kinetics. *Mutat. Res.* 1991; 247 (1): 141-6.
43. Scarfi MR, Lioi MB, Zeni O, Franceschetti G, Franceschi C, Bersani F, et al. Lack of chromosomal aberration and micronucleus

- induction in human lymphocytes exposed to pulsed magnetic fields. *Mutat Res.* 1994; 306(2): 129-33.
44. Schimmelpfeng J, Dertinger H. Action of a 50 Hz magnetic field on proliferation of cells in culture. *Bioelectromagnetics* 1997; 18(2): 177-183.
 45. Harakawa S, Inoue N, Hori T, Tochio K, Kariya T, Takahashi K, et al. Effects of a 50 Hz Electric field on plasma lipid peroxide level and antioxidant activity in rats. *Bioelectromagnetics* 2005; 26,589-594.
 46. Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology* 1979; 109(3): 273-284.
 47. Fulton JP, Cobb S, Preble L, Leone L, Forman E. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *American Journal of Epidemiology* 1980; 111(3): 292-296.
 48. Tomenius L. 50 Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm country. *Bioelectromagnetics* 1986; 7(2): 191-207.
 49. Maes A, Collier M, Vandoninck S, Scarpa P, Verschaeve L, et al. Cytogenetic effects of 50 Hz magnetic fields of different magnetic flux densities. *Bioelectromagnetics* 2000; 21(8): 589-596.
 50. Sobczak A, Kula B, Danch A. Effects of Electromagnetic Field on Free Radical Processes in Steelworkers. Part II: Magnetic Field Influence on Vitamin A, E and Selenium Concentrations in Plasma. *J. Occup. Health* 2002;44: 230-233.
 51. Güler G, Hardalaç F, Arıcıoğlu A. Examination of electric field effects on lipid peroxidation and antioxidant enzymes by using multilayer perception neural network. *G.U. Journal of Science* 2005a; 18(1): 27-37.
 52. Güler G, Hardalaç F, Arıcıoğlu A. Examination of electric field effects on tissues by using back propagation neural network. *J. Med.Syst.* 2005b; 29(6): 679-708.
 53. Güler G, Seyhan N, Arıcıoğlu A. Effects of static and 50 Hz alternating electric fields on Superoxide Dismutase activity and TBARS levels in guinea pigs. *Gen. Physiol. Biophys.* 2006; 25(2): 177-93.
 54. Seyhan N, Canseven AG. In vivo effects of ELF MFs on collagen synthesis, free radical processes, natural antioxidant system, respiratory burst system, immune system activities, and electrolytes in the skin, plasma, spleen, lung, kidney and brain tissues. *Electromagnetic Biology and Medicine* 2006; 25: 291-305.
 55. Seyhan N, Güler G. Review of In Vivo Static and ELF Electric Fields Studies Performed at Gazi Biophysics Department. *Electromagnetic Biology and Medicine* 2006; 25(4): 307-323.
 56. Seyhan N, Canseven AG, Güler G. Animal Studies on the Effect of SMF and ELF EMF. In: Ayrapetyan S., Markov M. editors.

- Bioelectromagnetics: Current Concepts. Netherlands: Springer Press; 2006. pp 195-212
57. Tohumoglu G, Canseven AG, Cevik A, Seyhan N. Formulation of ELF magnetic fields' effects on Malondialdehyde level and myeloperoxidase activity in kidney using genetic programming. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2007; 86: 1-9.
 58. Güler G, Atalay Seyhan N. The interaction of electric fields with biological systems I: Liver Hydroxyproline. *Gazi Medical Journal* 1995; 6: 125-129.
 59. Canseven AG, Atalay Seyhan N. Is it possible to trigger collagen synthesis by electric current in skin wounds?. *Indian J. Biochem. Biophys.* 1996; 33(3): 223-227.
 60. Güler G, Atalay Seyhan N, Özoğul C, Erdoğan D. Biochemical and structural approach to collagen synthesis under electric fields. *Gen. Physiol. Biophys.* 1996a; 15: 429-440.
 61. Güler G, Atalay Seyhan N. Changes in hydroxyproline levels in electric field tissue interaction. *Indian J. Biochem. Biophys.* 1996b; 33(6): 531-3.
 62. Seze De R, Bouthet C, Tuffet S, Deschaux P, Caristan A, Moreau JM, et al. Effects of time-varying uniform magnetic fields on Natural Killer cell activity and antibody response in mice. *Bioelectromagnetics* 1993; 14(5): 405-412.
 63. House RV, McCornick DL. Modulation of Natural Killer cell function after exposure to 60 Hz magnetic fields: confirmation of the effect in mature B6C3F1 mice. *Radiation Research* 2000; 153: 722-724.
 64. Canseven AG, Seyhan N, Mirshahidi S, Imir T. Immune Response of Guinea Pigs to AC Magnetic Fields. 2nd EMF Seminar in China: Electromagnetic Fields and Biological Effects, 23-26 Ekim, 2000, Xi'an, Çin (Proceedings pp:229-235).
 65. Canseven AG, Seyhan N, Aydın A, Işımer A. Effect of Magnetic Field on Concentrations of Blood Plasma Electrolytes. *Med&Biol Eng&Comput.* 1997; 37(2): 1336-1337.
 66. Canseven AG, Seyhan N, Aydın A, Işımer A. Does ELF Magnetic Field Influence Cu⁺⁺, Zn⁺⁺, Ca⁺⁺ ve Mg⁺⁺ Concentrations of Brain Tissues . *Med&Biol Eng&Comput.* 1997; 35(1): 3.
 67. Canseven AG, Seyhan N, Mirshahidi S, Turhan A, Imir T. Inhibition of Natural Killer (NK) Cell Activity By ELF Magnetic Fields. *Med&Biol Eng&Comput.* 1997; 35(1): 44.
 68. Canseven AG, Seyhan N, Mirshahidi S, Turhan A, Imir T. Manyetik alanın Natural Killer (NK) Aktivitesine Etkisi, IX. Ulusal Biyofizik Kongresi, Ankara, Bildiri özetleri 75, 1997.
 69. Canseven AG, Seyhan N, Mirshahidi S, Imir T. Suppression of natural killer cell activity on *Candida stellatoidea* by a 50 Hz magnetic field. *Electromagn. Biol. Med.* 2006; 25(2): 79-85.

70. Sikov MR, Montgomery LD, Smith LG, Philips RD. Studies on prenatal and postnatal development in rats exposed to 60 Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1984; 5(1): 101-112.
71. Rommereim DN, Rommereim RL, Sikov MR, Buschbom RL, Anderson LE, et al. Reproduction, Growth and Development of Rats during Chronic Exposure to Multiple Field Strengths of 60 Hz Electric Fields. *Toxicological Sciences* 1990; 14(3): 608-621.
72. Kowalczyk CI, Robbins L, Thomas JM, Butland BK, Saunders RD. Effects of prenatal exposure to 50 Hz magnetic fields on development in mice: I. Implantation rate and fetal development. *Bioelectromagnetics* 1994; 15(4): 349-61.
73. Sert C, Akdağ MZ, Bashan M, Büyükbayram H, Dasdağ S. ELF Magnetic Field Effects on Fatty-acid Composition of Phospholipid Fraction and Reproduction of Rats' Testes. *Electromagnetic Biology and Medicine* 2002; 21(1): 19-29.
74. Canseven AG, Coşkun Ş, Seyhan N. Magnetic Fields have an effect on Antioxidant Defense System in Heart Tissue. "The 3rd European Medical and Biological Engineering Conference EMBEC'05" 20-25 Kasım 2005, Prag, Çekoslovakya
75. Canseven AG, Coşkun Ş, Seyhan N. ELF Magnetic fields' Effects on lipid peroxidation in Lung and Kidney. "The 3rd European Medical and Biological Engineering Conference EMBEC'05" 20-25 Kasım 2005, Prag, Çekoslovakya.
76. Coşkun Ş, Seyhan N, Canseven AG. Alterations induced in the lipid peroxidation levels of heart and liver tissues with ELF Magnetic Fields. International Conference and COST 281 Workshop on Emerging EMF Technologies, Potential Sensitive Groups and Health, Graz, April 20/21, 2006.
77. Canseven AG, Özel Ü, Bilgihan A, Seyhan N. Does ELF Magnetic Field Effect The Myeloperoxidase (MPO) Activity in the Lung. International Electromagnetic Field (EMF) Project, Workshop, Sensitivity of Children to Electromagnetic Fields, 9-10 Haziran 2004, İstanbul, Türkiye
78. Canseven AG, Özel Ü, Bilgihan A, Seyhan N. The Effect of ELF Magnetic field Exposure on Kidney Myeloperoxidase (MPO) Activity. 13th Balkan Biochemical Biophysical Days & Meeting on Metabolic Disorders, 12-15 October 2003, Kuşadası, Turkey, Programme & Abstracts, p96, Turkish Journal of Biochemistry, 28(3): 123 (2003).
79. Canseven AG, Özel Ü, Bilgihan A, Seyhan N. Myeloperoxidase (MPO) Activities in Brain, Lung and Renal Tissues After Exposure to magnetic Fields of 50 Hz. 13th Balkan Biochemical Biophysical Days & Meeting on Metabolic Disorders, 12-15 October 2003, Kuşadası, Turkey, Programme & Abstracts, p94, Turkish Journal of Biochemistry, 28(3): 123 (2003).

80. Güler G, Seyhan N. Effect of Static and 50 Hz Electric Fields on the Activity of Superoxide Dismutase and the level of Thiobarbituric Acid-Reactive substances in Guinea pigs, *General Physiology and Biophysics* 2006. 25(2).
81. Güler G, Seyhan N. Effects of electric fields on lipid peroxidation and SOD enzyme activity, *Electromagnetic Compatibility*, 2003. EMC '03. 2003 IEEE International Symposium on EMC. Volume 2, 11-16 May 2003, Istanbul, Turkey p1223-1226.
82. Güler G, Atalay Seyhan N. Changes in Hydroxyproline Level in Electric Field Tissue Interaction. *Indian Journal of Biochemistry and Biophysics* 1996; 33: 531-533.
83. Güler G, Atalay Seyhan N. Extremely low Frequency (ELF) Electric Field with Different Application Times Inhibits Protein Synthesis. *Med&Biol Eng&Comput.* 1999; 37, Suppl. 2: 1338-1339.
84. WHO Fact Sheet No 263. *Electromagnetic Fields and Public Health-Extremely Low Frequency Fields and Cancer*: 2001.
85. IARC Non-ionizing Radiation. *Static and Extremely Low Frequency (ELF) Electric and magnetic Fields Part 1*, Vol. 80, Lyon; 2002.
86. Frey A.H. 1994. *An Integration of the Data on Mechanisms with Particular Reference to Cancer in Medical Intelligence Unit: On the Nature of Electromagnetic Field Interactions with Biological Systems* (FREY A:H., ed.), 9, R.G: Landes Company Austin USA (1994).
87. Savitz DA, Watchel H, Barnes FA. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 1988; 128: 21-38.
88. Kheifets L. Childhood leukemia and EMF. Sensitivity of children to electromagnetic fields workshop., 9-10 June 2004, İstanbul, Turkey.
89. Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *Br. J. Cancer* 2000; 83: 692-698.
90. ICNIRP 1998 Standards: Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields (Up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Health Physics*, 74, 494-522, (1998).
91. IEEE Standards: IEEE Standards for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Std. C95.1, (1999).
92. Sırav, B. Radyo Frekans Radyasyon (RFR) Kaynakları, Ülkeler ve Uluslararası Kurumların Standartları, Türkiye'de Durum, Bir Pilot Bölge Radyasyon Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyofizik Anabilim Dalı, Ankara, 2001.
93. Sırav B, Seyhan N. Radio frequency radiation (RFR) from radio antennas, *Electromagnetic compatibility*, 2003. EMC '03. 2003

- IEEE International Symposium on EMC. Volume 2, 11-16 May 2003, p 1232-1236.
94. Sirav B, Seyhan N. TV and radio Transmitter' s Radio Frequency Radiation (RFR), 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, 23-28 May 2004, Madrid, Spain.
 95. Elder J. Radiofrequency radiation activities and issues: a 1986 perspective. *Health Phys.* 1987; 53: 607-611.
 96. ANSI (1982): ANSI safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300kHz to 100 GHz (ANSI C95.1-1982). New York: American National Standards Institute.
 97. ANSI/IEEE (1992a): IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300 GHz (ANSI/IEEE C95.1-1992; revision of ANSI C95.1-1982). Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc.
 98. ANSI/IEEE (1992b): IEEE recommend practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields-RF and Microwave (ANSI/IEEE C95.3-1992). Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc.
 99. Shaposhnikov YG. Histomorphological Study of Wound Regeneration in Animals Following Long-Term Exposure to Low-Intensity Microwaves. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine* 1975; 80(2): 988-990.
 100. Behari J. Effect of ultraviolet light on the dielectric behavior of bone at microwave frequencies *Annals of Biomedical Engineering* 1982; 10(3): 139-144.
 101. Ozgur, E. Cep Telefonu Radyasyonunun Farklı Frekans-Şiddetteki Ses ile Değişimi ve Doku Hidroksiprolin Seviyesine Etkisi. Yüksek Lisans. Ankara: Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyofizik Anabilim Dalı; 2006.
 102. Lai H, Singh NP. Acute Low-Intensity Microwave Exposure Increases DNA Single Strand Breaks in Rat Brain Cells, *Bioelectromagnetics* 1995; 16: 207-210,
 103. Phillips JL, Ivaschuk O, Ishida-Jones T, Jones RA, Campbell-Beachler M, Haggren W, et al. DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. *Bioelectrochem Bioenerg.* 1998; 45: 103- 110.
 104. Goud SN, Usha Rani MV, Reddy PP, Reddy OS, Rao MS, Saxena VK, et al. Genetic effects of microwave radiation in mice, *Mutation Res.* 1982; 103: 39-42.
 105. Lary JM, Conover DL, Johnson PH, Hornung RW. Dose-response relationship between body temperature and birth defects in radiofrequency- irradiated rats. *Bioelectromagnetics* 1986; 7(2): 141-9.

106. Brown-Woodman PDC, Hadley JA. Studies of the teratogenic potential of exposure of rats to 27.12 MHz pulsed short-wave radiation. *J. Bioelectricity* 1988; 7: 57-67.
107. Jensch RP. Behavioral teratologic studies using microwave radiation: is there an increased risk from exposure to cellular phones and microwave ovens? *Reprod Toxicol.* 1997; 11(4): 601-11.
108. Moe KE, Lovely RH, Meyers DE, Guy AW. Physiological and behavioral effects of chronic low level microwave radiation in rats. *Biological Effects of Electromagnetic Waves, Vol. 1*, edited by C. C. Johnson and M. L. Shore (Rockville, Maryland: Department of Health, Education and Welfare), HEW Publication (FDA) 77-8010, pp. 248-256, 1976.
109. D'Andrea JA, Chou CK, Johnston SA, Adair ER. Microwave effects on the nervous system. *Bioelectromagnetics* 2003; Suppl 6:S107-47.
110. Lebovitz RM. Pulsed Modulated and Continuous wave Microwave Radiation Yield Equivalent Changes in Operant Behaviour of Rodents. *Physiology & Behaviour* 1983; 30, 891-8.
111. Lai H, Singh NP. Single and Double Strand DNA Breaks in Rat Brain Cells After Acute Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Radiation, *International. J. Radiation Biology* 1996; 69, 513-521.
112. Challis LJ. Mechanism for interaction between rf fields and biological tissue. *Bioelectromagnetics supplement* 2005; 7: 98-106
113. Sirenko YM, Stroschio MA, Kim KW. Elastic vibrations of microtubules in a fluid. *Phys Rev.* 1996; E53: 1003-1010
114. Kotnik T, Miklavcic D. Second-order model of membrane electric field induced by alternating external electric fields. *IEEE Trans Biomed Engineering* 2000; 47: 1074-1081.
115. Adair RK. Effects of weak high-frequency electromagnetic fields on biological systems. *IN Radiofrequency Radiation Standards.* New York. Plenum Pres. 1994.
116. Laurence JA, French PW, Lindner RA, McKenzie DR. Biological effects of electromagnetic fields-mechanisms for the effects of pulsed microwave radiation on protein conformation. *J Theor Bio* 2000; 206: 291-298.
117. Laurence JA, McKenzie DR, Foster KR. Application of the heat equation to the calculation of temperature rises from pulsed microwave exposure. 2003; *J Theor Biol* 222: 403-405.
118. Bohr H, Bohr J. Microwave enhanced kinetics observed in ORD studies of a protein. *Bioelectromagnetics* 2000a; 21: 68-72.
119. Bohr H, Bohr J. 2000b. Microwave-enhanced folding and denaturation of globular proteins. *Phys Rev E* 61:4310-4314.
120. Astumian RD. Adiabatic pumping mechanism for ion motive ATPases. *Phys Rev Letts* 2003; 91: 118102 1-4.

121. Chiabrera A, Bianco B, Moggia E, Kaufman JJ. Zeeman-Stark modelling of the RF EMF interaction with ligand binding. *Bioelectromagnetics* 2000; 21: 312–324.
122. Adair RK. Vibrational resonances in biological systems at microwave frequencies. *Biophysical J* 2002; 82: 1147–1152.
123. Krasil'nikov PM. Resonance interaction of surface-charged lipid vesicles with the microwave electromagnetic field. *Biofizika* 44:1078–1082 (English Translation in *Biophysics* 1999; 44: 1041–1045).
124. Dobson J, Pierre TG. Application of the ferromagnetic transduction model to D.C. and pulsed magnetic fields: Effect on epileptogenic tissue and implications for cellular phone safety. *Biochem. Biophys Res. Commun.* 1996; 227: 718-723.
125. Cranfield CG, Wieser HG, Al Maddam J, Dobson J. Preliminary evaluation of nanoscale biogenic magnetitebased ferromagnetic transduction mechanisms for mobile phone bio-effects. *IEEE Trans NanoBioscience* 2003a; 2: 40–43.
126. Woodward JR, Timmel CR, McLaughlan KA, Hore PJ. Radio frequency magnetic field effects on electron-hole recombination. *Phys Rev Letts* 2001; 87: 077602 1–4.
127. Chou CK, Bassen H, Osepchuk J, Balzano Q, et al. Radio Frequency Elektromagnetic Exposure: Tutorial Review on Experimental Dosimetry. *Bioelectromagnetics* 1996; 17: 195-208
128. Michaelson SM, Lin JC. *Biological Effect and Health Implications of Radiofrequency Radiation*. 1 st ed. New York: Plenum Press; 1987
129. Durney CH, Massodi H, Iskander MF. *Radiofrequency Radiation Dosimetry Hadbook*. 4 th ed. Utah: (Report TR-85-73) Brooks Air Force Base, TX: USAF School of Aerospace Medicine; 1986.
130. Johnson CC, Guy AW. Nonionizing Elektromagnetic wave effects in Biological Materials and System: *Proc IEEE* 1972; 60: 692-718
131. Chou CK, Guy AW. Microwave and RF dosimetry. In Taylor LS, Cheung AY: *Workshop on the Physical Basis of electromagnetic Interactions with Biological Systems*. Proceedings of the Workshop Held at the University of Maryland, Collage Park, Md 1977; June 15-17; 165-216
132. Chou CK, Guy AW. Research on Nonionizing Radiation: Physical Aspects in Extrapolating Infra Human Data to Man. In Monathan JC, D'Andrea JA: *Behavioral Effects of Microwave Radiation Absorption*. Washington DC: HHS Publication FDA 85-8238 August 1985; 135-149
133. Stuchly MA, Stuchly SS. Experimental Radio and Microwave Dosimetry. In Polk C, Postow E, : *Handbook of Biological Effects and Medical Applications of Elektromagnetic Fields*. Boca Raton, FL: CRC Pres 1986; 229-272

134. Guy AW. Dosimetry Associated with Exposure to Nonionizing Radiation: very Low Frequency to Microwaves. *Health Phys* 1987; 53: 569-584
135. Mittleman E, Osborne SL, Coulter J. Shortwave Diathermy Power Absorption and Deep Tissue Temperature. *Arch Phys Ther* 1941; 22: 133-139
136. Cogan DG, Fricker SJ, Lubin M, Donaldson DD, Hardy H. Cataracts and UHF Radiation. *AMA Arch Indust Med* 1958; 10: 299-302
137. Gandhi OP, Hunt EL, D'Andrea JA. Deposition of Electromagnetic Energy in Animals and in Models of Man with and without grounding and Reflector Effects. *Radio Sci* 1977; 12(6s): 39-47
138. Meltz ML, Eagan P, Haris CR, Erwin DN. Dosimetry Considerations in Far Field Microwave Exposure of Mammalian Cells. *Physiol Chem Phys Med NMR* 1988; 20: 23-30
139. Lin JC, Guy AW, Johnson CC. Power Deposition in a Spherical Model of Man Exposed to 1-20 MHz Electromagnetic Fields. Boca Ration FL: CRC Press 1973; 273-313
140. Stuchly MA, Lecuyer DW. Induction Heating and Operator Exposure to Electromagnetic Fields. *Healty Phys* 1985; 49: 693-700
141. Kuster N, Balzano Q. Energy Absorption Mechanism by Biological Bodies in the Near Field of Dipole Antennas Above 300 MHz. *IEEE Trans Vehicular Technol* 1992; 41: 17-23
142. Gandhi OP, Hunt EL, and D'Andrea JA. Deposition of electromagnetic energy in animals and in models of man with and without grounding and reflector effects. *Radio Sci.* 1977; 12(6): 39-47.
143. Lin JC. *Microwave Auditory Effects and Applications*. Springfield, IL: C. Thomas 1978
144. Chou CK, Guy AW, Galambos R. Auditory Perception of Radiofrequency Electromagnetic field. 80th Review and Tutorial paper. *J Acoust Soc Am* 1982; 71: 1321-1334.
145. Justesen DR, King NW. Behavioral effects of low level microwave irradiaton in the close-space situation: Biological effects and health implications of microwave radiation. In Cleary SF (Ed): "Symposium proceedings." BRH/DE 70-2, pp 154-179.
146. Guy AW, Wallace J, McDougall JA. Circularly Polarized 2450 Mhz Waveguide System for Chronic Exposure of Small Animals to Microwaves. *Radio Sci* 1979; 14(6s): 63-74
147. Chou CK, Guy AW, Kuntz LL, Johnson RB, et al. Long-Term, Low-Level Microwave Irradiation of Rats. *Bioelectromagnetics* 1992; 13: 469-496
148. Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Phys. Med. Biol.* 1996a; 41: 2231-2249.

149. Chiabrera A, Nicolini C and Schwan HP, editors. Interactions between electromagnetic fields and cells. New York: Plenum Press; 1985.
150. Caputa K. Modeling of Interactions of Electromagnetic Fields with Human Bodies. Doctor of Philosophy. Canada: University of Victoria; 2002.
151. Schwan HP. Electrical Properties of Tissues and Cell Suspensions: Mechanisms and Models. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE 1994; 1: A70-A71.
152. Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Biol. 1996c; 41: 2271-2293.
153. Foster KR, Schwan HP. Dielectric Properties of Tissues. In: Polk C, Postow E, editors. Handbook of biological effects of electromagnetic fields. Boca Raton: CRC press; 1995. pp. 535-580
154. Cole KS. Membranes, Ions and Impulses. Berkeley and Los Angeles: University of California Press; 1968.
155. Yee KS. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 1966; 14: 302-307.
156. Sevgi L. Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler. İstanbul: Birsen yayınevi; 1999.
157. İnce S. FDTD Yöntemiyle İnsan Kafası Modelinde Elektromagnetik Etkilerin Belirlenmesi. Yüksek Lisans. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2001.
158. Taflove A, Susan CH. Computational Electrodynamics The Finite-Difference Time-Domain Method. 3 rd ed. Boston: Artech House; 2005. p. 51-10.
159. Lazzi G. The Finite-Difference Time Domain method as Applied to The Dosimetry of Mobile Telephones. Doctor of Philosophy. USA: The university of Utah Graduate School; 1998.
160. Sadiku MNO. Numerical Techniques in Electromagnetics. 2nd Edition. New York: CRC Press; 2001.
161. Speag. Semcad X Reference Guide. Zurich: Speag; 2007.
162. Gedney SD. An Anisotropic perfectly matched layer absorbing media fort he truncation of FDTD lattices. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 1996; 44: 1630-1639.
163. Roden JA, Gedney SD. Convolutional PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media. Microwave Optical Tech. Lett. 200;27: 334-339.
164. Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques, IEEE Standard 1528-2003; 2003.
165. Human Exposure to Radio Frequency Fields from Hand-Held and Body-Mounted Wireless Communication Devices- Human Models,

- Instrumentation and Procedures-PartI: Procedure to Determine the Specific Absorption Rate (SAR) for Hand-Held Devices Used in Close Proximity to the Ear (Frequency Range of 300 MHz to 3 GHz), IEC 62209-1, 2005.
166. Christ A, Chavannes N, Nikoloski N, et al. A numerical and experimental comparison of human head phantoms for compliance testing of mobile telephone equipment. *Bioelectromagnetics* 2005; 26: 125-137.
 167. Kainz W, Christ A, Kellom T, et al. Dosimetric comparison of the specific anthropomorphic mannequin (SAM) to 14 anatomical head models using a novel definition for the mobile phone positioning. *Physics in Medicine and Biology* 2005; 50: 3423-3445.
 168. Kainz W, Neubauer G, Alesch F, Schmid G, Jahn O. Electromagnetic Compatibility of electronic implants-review of the literature. *Wien Klin. Wochenschr*; 2001; 113: 903-914.
 169. Irnich W. Electronic security systems and active implantable medical devices. *Pacing Clin. Electrophysiol.* 2002; 25: 1235-58.
 170. Sorri MJ, Püparinen PJ, Huttunen KH, Haho MJ. Solutions to electromagnetic interference problems between cochlear implants and GSM phones. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2006; 14: 101-8.
 171. Virtanen H, Keshvari J, Lappalainen R. Interaction of radio frequency electromagnetic fields and passive metallic implants –a brief review *Bioelectromagnetics* 2006; 27: 431-439.
 172. Virtanen H, Keshvari J, Lappalainen R. The effect of authentic metallic implants on the SAR distribution of the head exposed to 900, 1800 and 2450 MHz near field. *Physics in Medicine and Biology* 2007; 52: 1221-1236.
 173. Whittow WG, Edward RM. A study of changes to specific absorption rates in the human eye close to perfectly conducting spectacles within the radio frequency range 1.5 to 3.0 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagations* 2004; 52: 3207-3217.
 174. Edward RM, Whittow WG. Applications of a genetic algorithm for identification of maxima in specific absorption rates in the human eye close to perfectly conducting spectacles. *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* 2005; 152: 89-96.
 175. Joo E, Szasz A, Szendro P. Metal-Framed spectacles and implants and specific absorption rate among adults and children using mobile phones 900/1800/2100 MHz. *Electromagnetic Biology and Medicine* 2006; 25: 103-112.
 176. Wang J, Fujiwara O. Comparison and evaluation of electromagnetic absorption characteristic in realistic human head models of adult and children for 900-MHz mobile telephones. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques* 2003; 51: 966-971.

177. Peyman A, Rezzadeh AA, Gabriel C. Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies. *Physics in Medicine and Biology* 2001; 46: 1617-1629.
178. Gabriel C. Dielectric properties of biological tissue: variation with age. *Bioelectromagnetics Supplement* 2005; 7: 12-18.
179. Wang J, Fujiwara O, Watanabe S. Approximation of aging effect on dielectric tissue properties for SAR assessment of mobile telephones. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility* 2006; 48: No:2: 408-413.
180. Beard BB, Kainz W. Review and standardization of cell phone exposure calculations using the SAM phantom and anatomically correct head models. *Biomedical Engineering Online* 2004; 3-34.
181. Beard BB, Kainz W, Onishi T, et al. Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in anatomically correct models of the human head. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility* 2006; 48: No:2: 397-407.
182. Ito I, Imada M, Ikeda M, Sueno K, Arikuni T, Kida A, et al. A morphological study of age changes in adult human auricular cartilage with special emphasis on elastic fibers. *The Laryngoscope* 2001; 111: 881-886.
183. Christ A, Kuster N. Differences in RF energy absorption in the heads of adults and children. *Bioelectromagnetics Supplement* 2005; 7: 31-44.
184. Kuster N, Kastle R, Schmid T. Dosimetric evaluation of mobile communications equipment with known precision. *IEICE Trans Commun* 1997b; E80-B(5): 645-652.
185. Wiart J, Hadjem A, Gadi N, et al. Modelling of RF head exposure in children. *Bioelectromagnetics Supplement* 2005; 7: 19-30.
186. Wang J, Joukou T, Fujiwara O. Localized specific absorption rate in the human head in metal- framed spectacles for 1.5 GHz hand-held mobile telephones. *IEE Japan* 1998; 118: 1234-1240.
187. Gandhi OP, Lazzi G, Furse CM. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz. *IEEE trans. Microw. Theory Tech.* 1996; 44: 1884-97.
188. Salles AA., Bulla G., Rodriguez CEF. Electromagnetic Absorption in the Head of Adults and Children due to Mobile Phone Operation Close to the Head. *Electromagnetic Biology and Medicine* 2006; 25: 349-360.
189. Schönborn F, Burkhardt M, Kuster N. The difference of EM energy absorption between adults and children. *Health Phys.* 1998; 74: 160-168.
190. Gandhi OP, Kang G. Some present problems and a proposed experimental phantom for SAR compliance testing of cellular telephones at 835 and 1900 MHz. *Physics in Medicine and Biology* 2002; 47: 1501-1518.

191. Lee AK, Choi HD, Choi JI, Pack JK. Specific Absorption Rate Values of Handsets in Cheek Position at 835 MHz as a Function of Scaled Specific Anthropomorphic Mannequin Models. ETRI Journal 2005; 27: 227-230.

10. ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Zahid TÜYSÜZ

Eğitim :

Harran Üniversitesi /Fizik Bölümü, Şanlıurfa, 2004

İletişim :

Adres : Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik Anabilim Dalı 5. Kat
06510 Beşevler ANKARA

Tel (İş) : 0 312 202 69 41
Faks (İş) : 0 312 212 90 23
E-mail : mtuysuz@gazi.edu.tr

Mezuniyet Sonrası Eğitim ve Görevler :

- Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik Anabilim Dalı, (2004-2007)
- Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Biyofizik Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi (Aralık, 2005- ...)
- Cyberpark, Bilkent, ANKARA, TÜRKİYE, Ar-Ge Uzmanı.

Katıldığı Bilimsel Aktiviteler :

- Türk Biyofizik Derneği'nin Hacettepe Üniversitesi'nde düzenlediği 16. Ulusal Biyofizik Kongresine ve EEG kursuna katılım, Eylül 2004, Ankara.
- Türk Biyofizik Derneği'nin Ege Üniversitesi'nde düzenlediği 17. Ulusal Biyofizik Kongresine katılım, Eylül 2005, İzmir.

Uzmanlık Alanları:

- İyonize ve non-iyonize radyasyon modellemeleri
- Radyo Frekans (RF) ve Mikrodalga (MW) Radyasyon Kaynakları ve Radyasyon Ölçümü
- ELF Radyasyon Kaynakları ve Radyasyon Ölçümü

Yabancı Dil:

- İngilizce

İlgi ve Araştırma Alanları:

- EM Alanların teşhis ve tedavide kullanımı
- Mikrodalga ve RF alanların Biyolojik ve Sağlık Etkileri
- Radyo Frekans (RF) ve Mikrodalga (MW) Radyasyon Kaynakları ve Radyasyon Ölçümü