

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSAN KAFASI MODELİ ÜZERİNDEN ELEKTROMAGNETİK
LİMİTLERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Selçuk YILDIRIM

Anabilim Dalı : ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı: Yard.Doç.Dr. Selçuk PAKER

ARALIK 2002

**İNSAN KAFASI MODELİ ÜZERİNDEN
ELEKTROMAGNETİK LİMİTLERİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Selçuk YILDIRIM
(504991178)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Ocak 2003**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Selçuk PAKER
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. İnci ÇİLESİZ
Yrd.Doç.Dr. Tanju**

OCAK 2003

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun Tanıtımı	3
1.2. EMC,BEM	5
1.2.1. EMC, BEM ile İlgili Standard ve Kuruluşlar	6
1.2.1. EMC, BEM Limitleri	8
1.3. Türk Standardı	9
2.BİYOLOJİK DOKULARDA SAR HESABI İÇİN SAYISAL İŞLEMLER	11
2.1. Zamanda Sonlu Faklar Yöntemi (Finite Diffrence Time Domain)	11
2.1.1 Kararlılık (Courant) Koşulu	16
2.1.2 FDTD Yönteminde Parametre Seçimi	17
2.2. FDTD Algoritması	18
3.İNSAN KAFA MODELİNDE HESAPLANAN SAR (ÖZGÜL SOĞURMA ORANI) VE ELEKTRİK ALAN GENLİK DEĞERLERİ	20
3.1. Giriş	20
3.2.Hesaplamalar ve Bulunanlar	21
3.2.1. Kafa Yapısı ile İlgili SAR Hesaplamaları	24
3.2.2. Kafa Yapısı ile İlgili Elektrik Alan Hesaplamaları	42
4.SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	80

ÖNSÖZ

Hep inandığım bir şey vardı; hayatımdaki “keşkeleri” minimum düzeyde tutacaktım. Çünkü, insan bir süre sonra geriye dönüpte baktığında keşke şunu yapsaydım diye bir cümle kurduğu zaman iş işten geçmiş olacak. Zaman çok hızlı akıyor ve zamanı geri döndürmek mümkün değil. Bu tez benim hayatımda yapmayı çok istediğim, hayalini kurduğum İTÜ’ de yüksek lisans yapma düşümün bir eseridir. Artık zaman ilerleyipte geriye baktığım zaman; “keşke” benim hayalim olan İTÜ’de yüksek lisansı yapsaydım demekten kendimi kurtarmış oldum. Bunun bana vermiş olduğu mutluluk, yüksek lisansı bitirirken çekmiş olduğum acıya, öfkeye ve bana ödettiği bedele değer mi şuanda karar veremiyorum.

Sevgili ailem, babam ve annem; benim için yüksek lisansının önemini, hiç bir zaman idrak edemeyeceksiniz. Anlayabilmenizi çok isterdim, çünkü çok güzel şeyler yaptığıma inanıyorum.

Hiç bilmediğim, yabancısı olduğum bir üniversitede sizin gibi bir danışman karşıma çıktığı için kendimi ne kadar mutlu addetsem azdır herhalde. Bana yol gösteren ve her konuda yardımcı olan değerli danışmanım Yrd.Doç.Dr.Selçuk PAKER’e teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik kariyer yapmamda bana cesaret veren sevgili abim Sadi YILDIRIM’a, bir tesadüf eseri tanıştığım Yeditepe Üniversitesi Sistem Mühendisliği bölümü öğretim görevlilerinden Dilek KAPTANOĞLU’na çok teşekkür ederim. Sizin yardımlarınız, manevi desteğiniz olmasaydı inanınki bitmezdi. Ama buraya kadarmış...

Her şeye rağmen, ne yaparsak yapalım hayatımızda “keşkeler” olacak sanırım.

Keşke...

Aralık 2002

Selçuk YILDIRIM

KISALTMALAR

EMR	: Elektromagnetik Radyasyonlar
SAR	: Özgöl Soğurma Oranı (Specific Absorption Rate)
FDTD	: Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain)
MoM	: Moment metodu (Method of Moment)
TLM	: İletim Hattı Matrisi(Transmission Line Matrix)
FE	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
EM	: ElektroMagnetik
EMC	: Elektromagnetik Uyumluluk (ElectroMagnetic Compatibility)
BEM	: Biyo-elektromagnetik (Bio-elektromagnetic)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komitesi (International Electrotechnical Commision)
CENELEC	: Avrupa Elektroteknik Normalizasyon Komitesi (Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique)
CISPR	: Comite International Special des Perturbations Radioelectriques
AB	: Avrupa Birliği
IRPA	: Uluslararası Radyasyondan Korunma Ajansı (International Radiation Protection Agency)
ICNIRP	: Uluslararası İyonlaşmayan Radyasyondan Korunma Komitesi (International Committe on Non-Ionising Radiation Protection)
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)
EMF	: Elektromagnetik Alan :(ElectroMagnetic Field)
ÖSO	: Özgöl Soğurma Oranı
MR	: Magnetik Rezonans (Magnetic Resonance)
SMAX	: Maksimum SAR

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. TS ENV 50166-2 Standardındaki yüksek frekanslarda SAR limitleri.....	10
Tablo 2.1. Ana FDTD döngüsü ve iterasyon adımları.....	20
Tablo 3.1. Küre şeklinde yapıda kullanılan dokular ve dokuların frekansa göre dielektrik özellikleri.....	24
Tablo 3.2. Ayırık kafa modelinde kullanılan dokular ve hücre sayıları.....	26
Tablo 3.3. İnsan Kafa modelindeki dokuların dielektrik özellikleri...	27
Tablo 3.4. 1,2 ve 3. Durum için Kafa Yapısında 10gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 10gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.....	37
Tablo 3.5. 4,5 ve 6. Durum için Kafa Yapısında 10gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 10gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.....	38
Tablo 3.6. 7,8,9 ve 10. Durum için Kafa Yapısında 10gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 10gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.....	39
Tablo 3.7. 1,2,3 ve 4. Durum için Kafa Yapısında 1gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 1gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.....	41
Tablo 3.8. 5,6,7 ve 8. Durum için Kafa Yapısında 1gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 1gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.....	42
Tablo 3.9. 9. ve 10. Durum için Kafa Yapısında 1gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 1gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.....	43
Tablo 3.10. 1.,2. ve 3. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 10 gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri.....	49
Tablo 3.11. 4.,5. ve 6. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 10 gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri.....	50
Tablo 3.12. 7.,8.,9 ve 10. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 10 gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri	51

Tablo 3.13.	1.,2.,3 ve 4. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 1 gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri	53
Tablo 3.14.	5.,6.,7 ve 8. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 1 gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri	54
Tablo 3.15.	9. ve 10. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 1 gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri	55

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Birim Yee hücresi ve alan bileşenlerinin yerleşimi.....	4
Şekil 2.1 : Birim Yee hücresi ve alan bileşenleri yerleşimi.....	14
Şekil 3.1 : a) MR görüntüsü b) Sayısallaştırılarak elde edilen insan kafası.....	24
Şekil 3.2 : Ayırık kafa modeli ve hesap uzayı.....	24
Şekil 3.3 : Kafatası ve Beyin Dokularının Elektriksel Özellikleri, (a) Kafatası Dielektrik Sabiti (b) Kafatası İletkenlik Sabiti (c) Beyin Dielektrik Sabiti (d) Beyin İletkenlik sabiti.....	27
Şekil 3.4 : Tüm Kafa Üzerindeki 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR.....	29
Şekil 3.5 : Beyin dokuları için 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR.....	30
Şekil 3.6 : Göz Dokuları için 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR.....	31
Şekil 3.7 : Tüm Kafa Üzerinden 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR.....	32
Şekil 3.8 : Beyin Dokuları için 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR.....	33
Şekil 3.9 : Göz Dokuları için 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR.....	34
Şekil 3.10 : Standartlarda tüm vücut için belirtilen sınırlara (0.08 W/kg tüm vücut için) karşı düşen SAR değerlerini oluşturaca elektrik alan genlikleri ve Limit E, 10 gr'lık Maximum SAR değerlerine göre.....	44
Şekil 3.11 : Standartlarda her hangi bir 10'lık doku belirtilen sınıra (2.0 W/kg küp şeklindeki herhangi 10gr'lık doku) karşı düşen SAR değerlerini oluşturaca elektrik alan genlikleri ve Limit E....	45
Şekil 3.12 : Standartlarda tüm vücut için belirtilen sınırlara (0.08 W/kg tüm vücut için) karşı düşen SAR değerlerini oluşturaca elektrik alan genlikleri ve Limit E, 1 gr'lık Maksimum Sar değerlerine göre.....	46
Şekil 3.13 : Standartlarda her hangi bir 1gr'lık doku için belirtilen sınıra (1.6 W/kg küp şeklindeki herhangi 1gr'lık doku) karşı düşen SAR değerlerini oluşturaca elektrik alan genlikleri ve Limit E....	47

SEMBOL LİSTESİ

T	: FDTD için hesap süresi
Δt	: Hesaplama zaman aralığı
n	: Zaman adımı
$\vec{E}$	: Elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	: Magnetik alan vektörü
μ	: Dielektrik sabiti
ϵ	: Magnetik geçirgenlik
$\vec{E}_x$	: Elektrik alanın x bileşeni
$\vec{E}_y$	: Elektrik alanın y bileşeni
$\vec{E}_z$	: Elektrik alanın z bileşeni
$\vec{H}_x$	: Magnetik alanın x bileşeni
$\vec{H}_y$	: Magnetik alanın y bileşeni
$\vec{H}_z$	: Magnetik alanın z bileşeni
Δx	: x ekseninde konum adım uzunluğu
Δy	: y ekseninde konum adım uzunluğu
Δz	: z ekseninde konum adım uzunluğu
c	: Işık hızı
f	: Frekans
V	: Gerilim
$v_{\max}$	: Maksimum hız
u	: Kaynak fonksiyonu
Φ	: Dalga fonksiyonu
f_n	: Temel fonksiyon
a_n	: Genişletme katsayıları
c	: Isı kapasitesi
ΔT	: Isı artışı
σ	: Elektriksel iletkenlik
ρ	: Dokunun yoğunluğu
e_{θ_i}	: θ açısı yönünde birim vektör
e_{φ_i}	: φ açısı yönünde birim vektör
P	: Ortalama güç yoğunluğu

İNSAN KAFASI MODELİ ÜZERİNDEN ELEKTROMAGNETİK LİMİTLERİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Yeni bin yılda yaşamakta olduğumuz çevre kirliliği, gürültü kirliliği, etik kirlilik gibi sorunlar yanına bir yenisi -elektromanyetik kirlilik- eklenmiştir. Özellikle çevremizde bulunan kablosuz uzak ve yakın alan kaynaklarının sayısının artması, elektromagnetik enerjinin neden olduğu sağlık problemleriyle karşılaşma riskini artırmıştır. Tehlikeli biyolojik etkilerin belirlenmesinde, uzak alan kaynaklarının saçtığı elektromanyetik ışımanın (radyasyon) dokularda meydana getirdiği ısıl değişim özel bir öneme sahiptir.

Soğurulan elektromanyetik enerjinin meydana getirdiği ısıl etkileşimin sonucunda dokularda sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Meydana gelen sıcaklık artışının belirlenmesinde elektriksel güç yoğunluğu cinsinden ifade edilebilen (SAR) büyüklüğü kullanılmaktadır.

SAR değeri noktasal değişim gösterir ve gözlem noktasındaki dokunun yoğunluğuna, iletkenliğine, di elektrik sabitine ve doku içinde indüklenen elektrik alanına bağlıdır. Bunların içinde en belirleyici olan büyüklük doku içinde indüklenen elektrik alanıdır. Doku içinde indüklenen elektrik alan fiziksel ve biyolojik değişkenlerle değişim gösterir. Bu değişimi etkileyen parametreler; frekans, kaynağın gücü, polarizasyonu, dokunun tipi, geometrisine ve geometri bileşimine bağlıdır.

Vücut tarafından yutulan elektromagnetik enerjinin dokularda tehlikeli biyolojik etkiler meydana getirmemesi için standartlarda belirtilen sınır değerlerini geçmemesi gerekmektedir. Bu sınır değerleri ICNIRP klavuzu ve ANSI/IEEE standardında tüm vücut için 0.08 W/kg, her hangi küp şeklindeki 10gr'lık doku için ICNIRP'nin belirlediği sınır değeri 2W/kg, her hangi küp şeklindeki 1 gr'lık doku için

ANSI/IEEE'nin belirlediği sınır değeri 1.6W/kg olarak belirlenmiştir. Bu bahsi geçen SAR sınırları, insan sağlığı açısından sakınca teşkil edebileceği eşik değerleri olduğu ve SAR değerinin aşılması durumunda dokularda biyolojik etkilerin görülebileceği belirtilmektedir

Bu yüzden insan vücudundaki SAR değişimlerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında insan kafasının maruz kalabileceği EM alan etkileri farklı yön, frekans ve polarizasyonda ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Elektromagnetik dalga aydınlatılan insan kafası modelindeki SAR değişimleri Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi ile belirlenmiştir.

3 boyutlu FDTD hesap uzayına yerleştirilen model için ayırık kafa modeli kullanılmıştır. MR (Magnetic resonance) görüntüsü ve sayısallaştırılarak elde edilen insan kafası 7 farklı dokudan oluşturulmuştur. SAR hesabı yapılabilmesi için FDTD hesap uzayına yerleştirilen kafa modeli ortalma güç yoğunluğu 1W/m^2 , elektrik alan genliği 27,46 V/m olan monokromatik düzlem dalgayla aydınlatılmış ve her hücrede oluşan elektrik alanın bileşenleri ve genliği bir periyotluk zaman diliminde hesap edilerek ortalaması gözlemlenmiştir. Bu değer üzerinden model üzerinde 1 gr ve 10 gr lık doku bölgeleri üzerinde ortalama SAR değeri bulunmuş ve 1gr ve 10gr-Maksimum değerleri belirlenmiştir. Ayrıca monokromatik düzlem dalganın elektrik alan genliği (27,46 V/m) kullanılarak standartta belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genliği değeri hesaplanmış ve frekans ile değişimi belirlenmiştir.

DETERMINATION OF ELECTROMAGNETIC LIMITS ON THE HUMAN HEAD

SUMMARY

In recent years, there has been dramatic increase in the utilization of wireless radio frequency technologies in the commercial world, specifically in communication applications. Currently all public places are covered by wide area wireless systems.

This has resulted in public concern about possible health effects of human exposure to electromagnetic (EM) energy emitted by mobile and fixed telecommunication equipment and generally, caused by the uncontrolled EM sources. Interaction as well as the resultant deposition of EM radiation are particular interest for far-field radiators.

The primary effect on the human tissues is explained in terms of heating (so-called thermal effect). Consequently, the specific absorption rate (SAR) of the human body is taken as a dosimetric quantity. The specific absorption rate (SAR) quantifies the power absorbed per unit mass of tissue and is a fundamental parameter used when discussing the health risks of electromagnetic power absorption in the body. The safety standards (the U.S. ANSI/IEEE C95.1-1992 and ICNIRP Guideline) recommend limits on the mass-normalized maximum local SAR, and the whole-body averaged SAR. An exposure condition can be considered to be acceptable if it produces an average SAR below 0.08 W/kg (averaged over the entire human body), a peak SAR not exceeding 1.6 W/kg (averaged over any 1 g of tissue in the shape of the cube) and a peak SAR not exceeding 2.0 W/kg (averaged over any 10 g of tissue in the shape of the cube). Therefore, the knowledge of SAR distribution in the human body is of particular importance for the hazard assessment of thermal effects to persons. Unfortunately, SAR can not be obtained directly by means of a measuring instrument. One method to determine the SAR is to measure the temperature rise in tissue versus time. The specific heat of the tissue under investigation must be known

for this purpose. A second method is to determine the specific absorption by measuring the electric field strength in tissue. This method requires the knowledge of conductivity and density values of the tissue.

These explain a considerable research effort devoted to development and application of computational methods for calculating the SAR in biological tissue. A number of methods has been developed allowing a detailed modeling of the human body and its parts. The most frequently used technique is the finite difference time domain (FDTD) method. The method is often regarded as the one with the greatest scope for the future.

We employed the FDTD procedures based upon the total field formulation for calculating the far-field electromagnetic quantities of heterogeneous and realistic head model. The FDTD computations were performed with 5 mm regular grids of 60X60X60 cells. The construction of the head model is based on a set of MRI images. The human head model make up of 7 tissues such as brain, bone, skin, humor, lens, cornea and muscle.

The human head model which is placed in FDTD space, illuminated with monochromatic incident plane waves. During the this calculations, we consider the linearly or circularly polarized plane waves, broad frequency band was scanned and different incident directions were applied. The most important directions and polarization are used, these ten different cases listed below, the first is the incident wave direction with respect to the human head, the second is the wave polarization.

Case 1: Left ear, vertical

Case 2: From up, back to nose

Case 3: Left ear, cross

Case 4: Left ear, horizontal

Case 5: Left eye, vertical

Case 6: Left eye, horizontal

Case 7: Left eye, cross

Case 8: Nose, vertical

Case 9: Nose, horizontal

Case 10: Nose, cross

Instantaneous and time average of the electrical fields were calculated and analyzed over the head model for each condition.

The first, local SAR values for each model cell were calculated, then maximum SAR values for 10g and 1g cubic tissues constructed over the head model. For each frequency and illumination case, human head exposed the 1.0W/m^2 incident power

density. Then, we use the obtained SAR values to define the incident wave's electrical field intensity. For the ICNIRP guideline and ANSI/IEEE standard, 10g local SAR limit value 2W/kg and 1g local SAR limit value 1.6W/kg was used respectively. For each frequency and ten different illumination cases, maximum SAR values converted the incident electrical field value. The below of this electrical field level which are produced from RF sources, guaranteed the 10g local SAR value will be lower than the 2W/kg for most possible directions and polarization. The obtained situations were compared each other and limit values of the dangerous electrical field were proposed for this observations and results were compared with ANSI/IEEE and ICNIRP standards and guidelines. Another objective of this study is to make people pay attention on the potential risk of EM waves in public areas.

1. GİRİŞ

Modern toplumlarda yaşayan hemen herkes sürekli olarak doğal olaylardan kaynaklananların çok üstünde elektromanyetik alan ve dalgaların içinde bulunmaktadır. Bunların, yüksek şiddet veya güç düzeylerinde insan sağlığına zararlı olduklarına kuşku yoktur. Ancak, insanların günlük hayatta karşılaştıkları daha düşük düzeydeki alan ve dalgaların uzun vadede insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olup olmadığı tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Dünya genelinde , elektrik üretim ve dağıtım şirketleri ve elektrikli aygıtların üreticileri, çoğunlukla insan sağlığı açısından bir tehdit olmadığını veya çok az olduğunu söylemektedirler. Öte yandan, bu konuda araştırma kaynakları talep eden bilim insanları ve korunma amaçlı ürün veya hizmet satanlar, çoğunlukla olası veya gerçekleşen zararların inkar edilemeyeceğini ve ciddi boyutlarda olduğunu iddia etmektedirler. Bugüne kadar yapılan bilimsel araştırmalar elektromanyetik alan ve dalgaların çok küçük şiddet ve güçlerde bile çeşitli biyolojik etkileri olduğunu göstermiştir.

Elektromanyetik radyasyonlar (EMR) dalga özellikli radyasyonlar olarak tanımlanır. EMR boşlukta yayılma özelliğine sahiptir. Bu tür dalgalar dalga boyları ve frekansları ile belirlenir. Tüm elektromanyetik dalgalar, boşlukta aynı hızla yayılırlar. Bu hız, ışık hızına eşit olup , saniyede 300.000 km'dir. Elektromanyetik radyasyonlar iyonlaştırıcı olanlar ve iyonlaştırıcı olmayanlar olarak ikiye ayrılır. İyonlaştırıcı olanlar X ve gamma ışınlarıdır ve sağlığa olumsuz etkileri olduğu kanıtlanmış durumdadır. İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik radyasyonlar uzun dalga boyludan kısa dalga boyluya doğru radyo dalgaları, mikro dalgalar, infrared ışınları, görünür ve laser ışınları ve ultraviole ışınlarıdır. İyonize etmeyen radyasyon yayan kaynaklarda kendi arasında ikiye ayrılır; bir maksada yönelik olanlar ve istenmeden radyasyon yayan kaynaklar. Haberleşme sistemlerinin verici antenleri maksada yönelik yayınım yapan kaynaklara örnek olup bu tip kaynakların oluşturduğu etkiler, güç, frekans, ışınım demeti gibi özelliklere bağlıdır. Cihazların ve aksesuarların örneğin kablo ve bağlayıcıların yeterince ekranlanmaması sonucu

olarak da istenmeyen yayının meydana gelebilmektedir[1]. Ortam da oluşan elektromagnetik yayının sonucunda insanlar istese de istemese de bu kaynaklara maruz kalmaktadırlar. Bu sebepten dolayı, istem dışı kaynakların oluşturdıkları elektromagnetik ısımanın, vücut dokularında meydana getireceği biyolojik etkilere sebep teşkil edecek elektromagnetik dağılımın belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Tehlikeli biyolojik etkilerin belirlenmesinde, uzak alan kaynaklarının saçtığı elektromanyetik ısımanın (radyasyon) dokularda meydana getirdiği ısı değişim özel bir öneme sahiptir. Soğurulan elektromanyetik enerjinin meydana getirdiği ısı etkileşimin sonucunda dokularda sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Meydana gelen sıcaklık artışının belirlenmesinde elektriksel güç yoğunluğu cinsinden ifade edilebilen (SAR) büyüklüğü kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, SAR parametresi referans alınarak, uzak alan kaynaklarının sebep olduğu elektromanyetik ısımanın dokularda meydana getirdiği elektriksel etkileşiminin sayısal olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için standartlarda belirtilen elektromanyetik ısımanın değerlendirildiği yapılar sayısal olarak benzetilmiştir. Standartlarda belirtilen sınır değerleri 1'gr ve 10'gr oluşturan küp şekilli dokulardaki ortalama SAR değeridir. Bu yapılardaki SAR değeri sayısal olarak bulunmuş ve standartlardaki referans sınırlar ile karşılaştırılmıştır. Bu bahsi geçen SAR sınırlarının, insan sağlığı açısından sakınca teşkil edebileceği eşik değerleri olduğu ve SAR değerinin aşılması durumunda dokularda biyolojik etkilerin görülebileceği belirtilmektedir. Yani, belirtilen kısıtlamalara uyulduğunda; ısınmadan, elektrik şoklarından ve radyo frekans yanmalarından kaynaklanabilecek zararlı etkiler önlenmiş olacaktır[1]. Bu çalışmada, elektromagnetik etkileşimin SAR büyüklüğü ile değerlendirildiği frekans bölgesi olan 200MHz ile 4000MHz bölgesinde hesaplamalar yapılmıştır. Kamuya ait alanlarda kontrolsüzce maruz kalınan EM alanlarının yarattığı potansiyel risklere dikkat çekilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde elektromagnetik alan ve dalga ile mikro dalga problemlerin de yoğun olarak kullanılan sayısal yöntemlerinden biri olan Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD) hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, SAR ve Elektrik Alan hesabının yapılması için kullanılan benzetim modeli üzerinde durulmuş,farklı yön ve polarizasyonda gelen dalga için

farklı frekanslarda Maksimum SAR değeri, Limit SAR ve elektrik alan genlikleri hesaplanmıştır.

Son bölümde sonuçlara ait değerlendirmeler sunulmuştur.

1.1. Konun Tanıtımı

Elektromagnetik etkilerin belirlenmesinde denek hayvanları üzerinde yapılan ölçümler, eşdeğer modeller üzerindeki ölçümler ve sayısal benzetim yöntemleri kullanılmaktadır. Bütün bu yöntemlerle yapılan çalışmalar, standartların belirlenmesinde ihtiyaç duyulacak bilgi birikimini oluşturmaktadır. Ancak elektromagnetik enerjinin biomedikal dokularda yarattığı etkileri belirlemek gerçekten zordur. Bu zorluklar :

- Biyolojik mekanizmaların EM karmaşıklığı
- EMI etkisine karşı organizmanın ürettiği tepki
- Vücudun değişik bölgelerinde farklı etkilerin oluşması
- Etkilerin frekansa ve vücut boyutlarına bağlı olması[2].

Bütün bu zorluklara karşın özgül soğurma oranı (SAR) parametresine dayalı ölçmeler ve benzetim yöntemiyle doku-elektromagnetik enerji etkileşimi ayrıntılı incelenebilmektedir. Sayısal elektromagnetik benzetim yöntemleri kullanılarak yapılan SAR hesabında, insan vücudu ve onun anatomik özelliklerini ayrıntılarıyla modellenmesi için çok sayıda metot geliştirilmiştir. Bunlar; Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD), Moment Yöntemi (MoM), Sonlu Elemanlar Yöntemi (FE) ve İletim Hatları Yöntemi (TLM)'dir. Kullanılan bu metotlardan en önemlisi Zamanda Sonlu Farklar Yöntemidir.

Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi kayıplı bir ortamda;

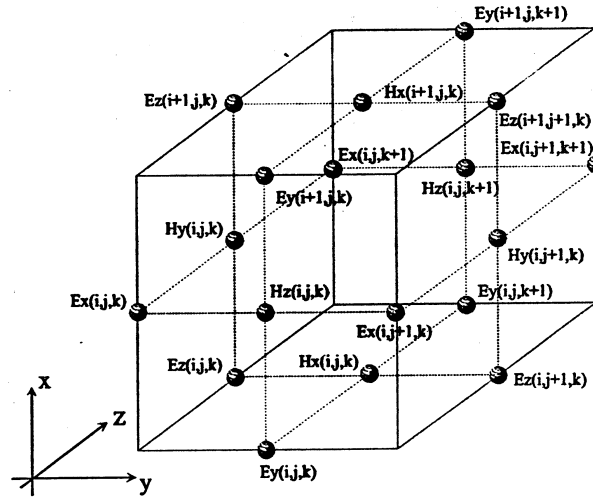
$$\text{rot}\vec{E}(\vec{r},t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(\vec{r},t)}{\partial t} \quad (1.1a)$$

$$\text{rot}\vec{H}(\vec{r},t) = \epsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t} + \vec{J}(\vec{r},t) \quad (1.1b)$$

şeklinde verilen ilk iki Maxwell denklemlerinin (rotasyon denklemlerinin), 3 boyutlu uzayda sırasıyla (x,y,z)'de $\Delta x, \Delta y$ ve Δz olmak üzere farklı boyutlardaki Yee birim hücresi kullanılarak ayrıklaştırılır [3]. Yani her alan bileşeni için ;

$$(i, j, k) = (i \times \Delta x, j \times \Delta y, k \times \Delta z) ; \quad (1.2)$$

Böylece Elektrik alan ve Manyetik alanların her bir bileşeni, yarım hücre aralığı boyunca her bir hücreye yerleştirilir. Şekil 1.1'de Yee birim hücresi ve alan bileşenlerinin yerleşimi görülmektedir.



Şekil 1.1 Birim Yee hücresi ve alan bileşenlerinin yerleşimi

Elektrik ve magnetik alanlar birbirinden $\Delta t/2$ kadar farklı zamanlarda hesaplanırlar. Yani elektrik alan bileşenleri $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ adımlarında hesaplanırken, magnetik alanlar $t = \Delta t/2, 3\Delta t/2, 5\Delta t/2, \dots$ adımlarında hesaplanmaktadır. Böylece hesaplama bir elektrik alanlar bir magnetik alanlar diye iteratif olarak sürdürülür [4].

Bu şekilde Maxwell denklemleri diferansiyel formunda çözülerek elektrik ve magnetik alanlar tüm model üzerinde belirlenerek SAR değeri hesaplanmaktadır. FDTD yönteminde kullanılan elektromagnetik dalganın frekansı ve söz konusu vücut bölgesinin geometrik şekli ve di elektrik özellikleri değerlendirilerek hesaplama yapılabilir. Bu çalışmada, önemi ve özellikleri nedeni ile insan kafasının

modeli üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Beyin hayati önemi bulunan bir bölge, göz ise kan akışının az olması nedeni ile özel bir organı oluşturmaktadır.

FDTD hesap uzayına yerleştirilen kafa modelindeki SAR değişimleri gerçeğe uygun insan kafası modeli oluşturularak hesaplanmıştır. SAR hesabı yapılabilmesi için FDTD hesap uzayına yerleştirilen kafa modeli ortalama güç yoğunluğu 1W/m^2 , elektrik alan genliği $27,46\text{ V/m}$ olan monokromatik düzlem dalgayla aydınlatılmış ve her hücrede oluşan elektrik alanın bileşenleri ve genliği bir periyotluk zaman diliminde hesap edilerek ortalaması gözlemlenmiştir. Bu değer üzerinden model üzerinde 1gr ve 10gr'lık doku bölgeleri üzerinde ortalama SAR değeri bulunmuş ve 1gr ve 10gr-Maksimum değerleri belirlenmiştir. Ayrıca monokromatik düzlem dalgaının elektrik alan genliği ($27,46\text{ V/m}$) kullanılarak standartta belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genliği değeri hesaplanmış ve frekans ile değişimi belirlenmiştir.

1.2. EMC, BEM

Gündelik yaşantımızda sık karşılaştığımız bilgisayarların radyo yayınlarını bozması, saç kurutma makinasının TV'lerde karlanmaya neden olması, cep telefonlarının araçların ABS fren sistemini kilitlemesi benzeri olaylar elektromagnetik (EM) girişim ve etkileşim (EMI, Electromagnetic Interference) olaylarından sadece bir kaçıdır. Bir EMI probleminde üç unsur, EMI kaynağı, girişimden etkilenen kurban ve kaynak ile kurban arasındaki girişim yolu bulunur.

Bir EMI probleminde cihaz – cihaz etkileşimi söz konusu ise EMC (Electromagnetic Compatibility) elektromanyetik uyumluluk problemi olarak isimlendirilir. Etkileşim cihaz–canlı doku arasında ise problem BEM (Bio-electromagnetic) Biyo-elektromanyetik olarak anılır. EMC mühendisliğinin ana amacı üç EMI unsurundan en az birini ortadan kaldırmak ya da etkilerini en aza indirmek iken BEM

mühendisliğin amacı EM enerjinin canlı dokularda yaratacağı kısa, orta ve uzun süreli etkileri incelemek ve en aza indirmek yönündedir.

EMC ve BEM tartışmaları özellikle cep telefonları ve baz istasyonları ile kamuoyunun ilgisini çekmiştir. Görünen o ki, cep telefonlarının kullanımı daha da yaygınlaşacak ve belki çok yakın bir gelecekte kola takılacak bir cihazla hem telefon, faks, görüntü iletimi sağlanacak, hem de kimlik, sağlık, banka hesabı gibi tüm kişisel bilgiler depolanacaktır. Bunun önüne geçilecek gibi görünmediğinden sorun ve çözüm yaklaşan bu yeni düzende EM kirlilik etkilerine ne derece önem verileceği noktasında yoğunlaşmaktadır. EM kirlilik elektrik, elektronik, elektro-mekanik, kimya, sistem, tıp ve biyoloji benzeri konuları içeren çok disiplinli bir konudur.

Bu yüzden elektromagnetik alanların insan sağlığı üzerine etkileri ve güvenlik konusu uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çeken bir konudur. Hükümetlerin haberleşme ile ilgili güvenlik kuruluşları ve özel kuruluşlar bu konuda çalışmakta, belli standartlar oluşturmaktadır ve limitler belirlenmiştir. SAR elektromagnetik alan enerjisinin dokularda yarattığı etkiyi ölçmek için kullanılan, bu konuda standartların oluşturduğu önemli bir parametredir.

1.2.1. EMC ve BEM ile İlgili Kuruluşlar ve Standartlar

EMC, elektronik cihazların bir arada, birbirini rahatsız etmeden ve birbirinden en az etkilenecek şekilde çalışabilmesi için gerekli düzenlemelerle ilgilenir. Örneğin, buzdolabı, çamaşır makinası gibi şehir şebekesinden yüksek akım çeken cihazlar çalışırken, şehir şebekesine gürültü aktarmaması için üreticinin alması gereken önlemleri ayrıntılı olarak sıralar. Ya da, televizyon üreticisine ürününün ne tür etkilere karşı dayanıklı olması gerektiğini belirtir. Ya da, kişisel bir bilgisayardan çevreye istenmeyen sızıntının frekansa ve uzaklığa göre en fazla ne olması gerektiğini belirler. Tüm bunlar standartlar halinde yayınlanır. Standartları belirleyen başlıca üç uluslararası kuruluş vardır. Bunlar; uluslar arası IEC (International Electrotechnical Committee), CISPR (Comite International Special des Perturbations RadioElectriques) kuruluşları ile Avrupa Birliğinin (AB) CENELEC (Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique) kuruluşudur. Bu kuruluşlar ve onların belirlediği teknik uzman kadrolar bilimsel ve teknolojik çalışmaları yürütür, izler, inceler ve değişik standartlar olarak belgelere döker. IEC standartları IEC ile

CENELEC standartları EN ile başlar (örneğin IEC 61000-4-1 ve EN 61000-4-1 EMC bağışıklık test düzenleri hakkında ayrıntılı bilgi içerir.)

Tam üye olmayı hedeflediğimiz AB yasal EMC düzenleme çalışmalarını 1992’ de başlatmış ve 4 yıllık geçiş sürecinden sonra 1996’ da zorunlu hale getirmiştir. Artık AB pazarına girecek her ürün EM uyumluluk, CE (Conformity Europe) markası taşımak zorundadır. Bunun anlamı, o ürünün bağlı olduğu EN tipi standartlarca belirlenen tüm koşulları sağladığının belgelenmesi ve üretici firmanın bunu garanti etmesidir.

BEM, cihaz – insan etkileşimiyle (EM enerji – canlı doku ilişkisi ile) ilgilenir. Konuyla ilgili uluslararası kuruluş International Radiation Protection Agency (IRPA)’dır. IRPA 1974 yılında NIR (Non-Ionizing Radiation) İyonlaştırmayan Radyasyon çalışma grubunu oluşturmuş ve 0Hz–300GHz frekans bölgesinde BEM konusunu incelemekle görevlendirmiştir. Bu çalışma grubu 1977 yılında Paris’te yapılan bir IRPA kongresinde INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee) Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyon Komitesine dönüştürülmüştür. IRPA/INIRC, WHO (World Health Organisation) Dünya sağlık Örgütü’nün Çevre Sağlığı birimi ile birlikte UNEP (United Nations Environment Programme) Birleşmiş Milletler Çevre Programınca desteklenen bir dizi çalışma sonucu çevre sağlık kriterlerini oluşturmuştur. Bu belgelerde iyonlaştırmayan radyasyon konusundaki (problemin fiziği, kaynaklar, ölçü teknikleri ve cihazları, vb.) bilgiler derlenmiştir. Bu bilgiler sürekli gözden geçirilmiş, yenilenmiş ve bugün konuşulan temel ve türetilmiş limitlerin kaynağını oluşturmuştur. IRPA’nın 1992 yılında Kanada’ da yapılan sekizinci uluslararası kongresinde bağımsız ICNIRP (International Committee on Non-Ionising Radiation Protection) Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyondan Koruma Komitesi kurulmuş ve bu kurul IRPA/INIRC kurumunun yerini almıştır.

ICNIRP günümüzde Birleşmiş Milletler, WHO, IRPA ve AB benzeri örgütlerin BEM konusunda tanıdığı uzman kurumdur. ICNIRP;

İyonlaştırmayan radyasyon konusunda bağımsız, bilimsel çalışmalar yapmak, ulusal ve uluslararası sağlık kuruluşları ve örgütleri ile ortak çalışmalar yürütmek ve yapılan çalışmalarını izlemek, bunların

sonunda elde edilen verilere dayanarak iyonlaştırmayan radyasyon konusunda insan ve toplum sağlığı kılavuzları hazırlamakla

yükümlü olup üyeleri fizik, biyoloji, epidemioloji, tıp ve mühendislik alanlarında tanınmış uzmanlarda seçilir. İlki 1988 yılında yayınlanan IRPA/INIRC BEM kılavuzları ICNIRP tarafından sürekli güncellenmektedir[5] .

ICNIRP kılavuzlarında sözü edilen sınır değerler ve seviyeler bilimsel bütün verilerin derlenmesi ve gözden geçirilmesiyle elde edilmektedir. Bu değerlere ulaşmada kısa ve orta vadeli ve hemen gözlenebilecek adale kasılması, yanma, şok, sıcaklık artması benzeri etkilerden yola çıkılmıştır. Uzun dönemde kanserojen etkiler yaratabileceği gibi etmenler göz önüne alınmamıştır. Bu etkiler söz konusu olduğunda ICNIRP eldeki bilimsel verilerin bunun aksini gösterecek herhangi bir etkiyi göstermediğini söylemektedir. Her ne kadar epidemiolojik (insan ya da denek hayvanlarla yapılan istatistiksel) çalışmalar bir takım bulgulardan söz etse de ICNIRP bu bulguların bilimsel yeterlilikten uzak olduğunu belirtmektedir.

1.2.2. EMC ve BEM Limitleri

ICNIRP'nin BEM konusunda belirlediği iki tip limit vardır; temel limitler ve türetilmiş limitler. Temel limit olarak

“ortalama insanda vücut sıcaklığını 1 derece arttıracak EM enerji yutulmasının zararlı olduğu”

düşüncesinden yola çıkılmıştır[5]. Bunun sonucu kilogram başına dokuların yutabileceği en yüksek güç değeri olarak 4W bulunmuştur. İş yerleri için 10 kat, genel ve meskun yerler için ise 50 kat güvenlik payları alınarak temel limitler

- fabrika, atölye gibi iş yerleri için → 0.4 W/kg SAR
- genel yerler için → 0.08 W/kg SAR

olarak belirlenmiştir. Her hangi küp şeklindeki 10gr'lık doku için ICNIRP'nin belirlediği sınır değeri 2.0W/kg yada 2000mW/kg olarak belirlenmiştir[5]. ANSI/IEEE 1992 yılında yayınlamış olduğu standarda sınır SAR değeri tüm vücut için 0,4 W/kg ve her hangi 1gr'lık doku için ise 8.0 W/kg olarak açıklamıştır. Bu

değerler denetimsiz bölgeler için 5 te 1 faktörü göz önünde bulundurularak tüm vücut için 0.08 W/kg, her hangi 1 gr'lık doku için 1.6 W/kg olarak belirlenebilir[12].

Burada SAR, özgül soğurma oranı (Specific Absorbtion Rate) olarak kullanılmaktadır. Dokularda ısı yutulma dokunun iletkenliği ile ilgilidir. Hacmi V olan bir dokunun iletkenliği (σ [S/m]), yoğunluğu (ρ [kg/m³]) ve dokunun içine nüfuz eden elektrik alan şiddeti (E [V/m]) biliniyorsa SAR değeri $\sigma E^2/\rho$ çarpımının hacim üzerinden toplamı (integrali) alınarak elde edilir. Yani, SAR değerinin bulunması için dokunun içindeki elektrik alan şiddetinin ölçülmesi gerekir. Oysa canlılarda bu ancak tıbbi deneklerle yapılmaktadır. Bu nedenle SAR ölçülmesi ya insanın EM özelliklerine yakın değişik kimyasal jellerden yapılmış robotlar üzerinde yapılır, ya da bu amaçla güçlü sayısal teknikler kullanılarak bilgisayar benzetimlerinden yararlanılır. SAR modelleme çalışmaları yürüten uluslararası birkaç bilimsel araştırma grubu içinde Türkiye de vardır.

Temel limitler sadece dokularda yutulan ve ısıya dönüşen güçle ilgilidir. Temel limitlerden yola çıkarak türetilen limitler ise kolay ölçülebilen EM güç yoğunluğu (metrekareye düşen güç, [W/m²]) cinsinden verilmiştir. Uzak alan kabulü altında güç yoğunluğu ile elektrik ya da manyetik alan şiddeti arasında basit bir katsayı farkı vardır. O nedenle herhangi birinin ölçülmesi diğerlerinin hemen elde edilmesi demektir (manyetik alan ölçülen elektrik alan değerin 377'ye bölünmesi ile, güç yoğunluğu da elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin çarpımı ile elde edilebilir). Türetilen limitler frekansa göre ortamlarda izin verilen en yüksek değerleri (alan şiddeti ya da güç yoğunluğu) belirlemektedir.

EMC limitleri açıktır ve bu cihazların bu limitleri sağladığının test edilmesi ve ölçülmesi kolaydır. Ele alınan cihazın bağlı olduğu standartta ölçü düzeni, ölçü ve testlerin hangi koşullarda ve nasıl yapılacağı, hangi özelliklere sahip ölçü aletlerinin kullanılacağına varıncaya dek ayrıntılı bilgi bulunur.

BEM limitleri tartışmalıdır. Yukarıda belirtildiği gibi sadece dokulardaki ısı etkileri göz önüne alır. Psikolojik ya da biyolojik gibi etkiler göz önüne alınmamıştır. Aslında teknik, aletsel bir değer olarak ısı etkilerden (yani SAR' dan) başka bir parametre de belirlemek kolay değildir. ICNIRP'nin ısı etkiler cinsinden limitleri belirlemenin yeterli olacağı konusunda görüşü olmasına karşın limitlerin kendileri

tartışma konusudur. Bu nedenle ülkeler ya da uluslararası kuruluşların kabul ettiği değerler arasında da farklılıklar olabilmektedir. BEM konusunda bilinenler bilinmeyenlere göre çok az olduğundan Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 1996 yılında EMF (Electromagnetic Field) diye bir proje başlatmıştır ve 2005 yılında sonlandırmayı hedeflemektedir. Bu proje ile BEM konusunda yapılan bütün çalışmalara ulaşmak, tartışmak ve olası etkiler konusunda sağlıklı veri tabanı oluşturmak hedeflenmektedir.

1.5. Türk Standardı (TS ENV 50166 – 2/Nisan 1996)

Bu standard iki bölümden oluşmuş olup sıfır ile 300 GHz arasındaki bütün frekanslardaki elektromanyetik alanlara ve radyasyona insanların maruz kalması ile ilgilidir. Elektromanyetik alanlar insanlar ve diğer biyolojik sistemlerle pek çok fiziksel mekanizmalar aracılığı ile etkileşir. Bu standard, frekansa bağlı olarak, vücutta oluşan akımlar gibi iyi bilinen kısa süreli etkilere dayanır. Vücut akımları sinir hücrelerinin ve kas dokularının uyarılmasına veya ısısal etkilere neden olurlar. Bu standard, sözü edilen etkilerin zararlı sonuçlarını önlemek için temel kısıtlamalar verilmektedir. Bu kısıtlamalar indüklenen akım yoğunluğu ve özgül soğurma gibi biyolojik açıdan anlamı olan değerler cinsinden verilmektedir. Bu kısıtlamalar indüklenen akım yoğunluğu ve özgül soğurma gibi biyolojik açıdan anlamlı olan değerler cinsinden verilmektedir. Bu değerler doğrudan doğruya tayin edilemediğinden, standard dış elektrik ve manyetik alan değerleri ve gelen güç yoğunluğu cinsinden kolayca oluşabilecek temel kısıtlamalardan kaynaklanan bazı referans seviyeleri belirtir[1].

Tablo 1.1 TS ENV 50166-2 Standardındaki yüksek frekanslarda SAR Limitleri[1].

Yüksek Frekanslarda SAR limitleri					
İşçiler (Denetimli)			Genel Halk (Denetimsiz)		
Tüm vücut	Kısmi vücut	El,ayak ve bilekler	Tüm vücut	Kısmi vücut	El,ayak ve bilekler
0,4W/kg	10 W/kg	20 W/kg	0.08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

2. BİYOLOJİK DOKULARDA SAR HESABI İÇİN SAYISAL İŞLEMLER

Elektromagnetik alanlara maruz kalmanın sonucu olarak insan vücudundaki özgül soğurma oranının (ÖSO) bilinmesi insanlara zararlı etkilerin değerlendirilmesinde temel bir öneme sahiptir. Bu sebeple ÖSO hesabında kullanılan insan vücudunu ve onun anatomik özelliklerini ayrıntılarıyla modelleyen çok sayıda metot geliştirilmiştir. Elektromagnetik dalgalar için Maxwell denklemleri diferansiyel ve integral formunda çözülerek elektrik ve manyetik alanlar ve bunlardan faydalanarak ÖSO hesaplanır. Frekansa ve söz konusu vücut bölgesine göre, üç boyutlu geometrik şekil ve di elektrik özelliklere sahip, hemen hemen kesin, alt bölümler belirlenebilir[6]. Bu hesaplama metotlarından en önemlilerinden biri Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD)dir. Bu bölümde Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi açıklanacaktır.

2.1 FDTD Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain)

Yöntem, diferansiyel formadaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zamanda ve konumda, merkezi farklar yöntemine göre ayrıştırılıp iteratif olarak adım adım çözülmesine dayanır. İlk kez 1996 yılında Yee tarafında ortaya atılmıştır [3]. O zamanda günümüze FDTD, hemen her türlü elektromanyetik problem çözümlemelerinde kullanılan bir yöntem olmuştur.

Yöntemin ilk uygulamaları, çeşitli ortamlarda darbe iletimi ve geniş bantlı analizler ile özellikle biyomedikal alanında doku analizleri üzerinde olmuştur. Bu uygulamalarda FDTD yöntemi, önceleri ele alınan ortam içerisinde ilgilenilen cisimlerin yakın civarındaki alanların hesabında kullanılmıştır.

Ele alınan problemde üç boyutlu hesap uzayının eş özellikli $N_x \times N_y \times N_z$ adet dikdörtgen prizmadan oluştuğu varsayılır. Birbirinin özdeşi olan bu küçük prizmaların boyutları $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ olup, FDTD hücresi olarak isimlendirilir. Hücre numaraları, (i,j,k) sırasıyla, x'te, y'de ve z'deki hücre numarası olmak

üzere tam sayılarla belirtilir. İlk kez Yee tarafından da belirtildiği gibi, her hücrede farklı yerlerde konuşlandırılan üç elektrik ve magnetik alan bileşeni aralarında zaman farkı olacak şekilde, iteratif olarak istenen zaman süresinde hesaplanır[6].

T : hesap süresi

Δt : hesaplama zaman aralığı

n : zaman adımı

$T = n \times \Delta t$ süresince her hücrede bütün bileşenler için hesaplama yapılır. Çözümler iteratif olduğundan zaman ve konum aralıkları arasında belli bir kararlılık kriteri söz konusudur. Yani, konumda ayırıklaştırma yapıldıktan sonra zaman aralığı keyfi seçilemez. Ayrıca, FDTD ile zaman domeninde geniş bandlı darbesel işaretlerin simülasyonu da söz konusu olduğundan simüle edilen en yüksek frekanslı (en küçük dalga boylu, $\lambda_{\min}$) bileşen için sayısal bozulmaya neden olmayacak konum örneklemesine dikkat etmek gerekir[6]. Pratikte sayısal bozulmaya sınırı, probleminden probleme değişmekle birlikte ($\Delta x, \Delta y$ ya da Δz 'nin en büyüğü) $\lambda_{\min}/100$ ile $\lambda_{\min}/4$ arasında seçilebilmektedir.

Maxwell denklemleri uzayın belli bir noktasında ve anında elektrik ve magnetik alan değerlerini birbirine bağlar.

$$\text{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2.1a)$$

$$\text{rot} \vec{H}(\vec{r}, t) = \epsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{J}(\vec{r}, t) \quad (2.1b)$$

Elektrik alanın konuma göre kısmi türevi, magnetik alanın zamana göre kısmi türevine ortam parametreleri ϵ (di elektrik sabiti), μ (magnetik geçirgenlik) ve σ (iletkenlik) ile bağlıdır.

Yukarıdaki (2.1) Maxwell denklemleri alan büyüklüklerinin yerine konursa, skaler bileşenleri cinsinden (2.2) eşitliklerindeki gibi ifade edilir.

$$-\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (2.2a)$$

$$-\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.2b)$$

$$-\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (2.2c)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x \quad (2.2d)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y \quad (2.2e)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z \quad (2.2f)$$

Bu denklemlerde görülen alan büyüklükleri konum ve zaman boyutunda (2.3) bağıntısı ile merkezi farklara göre ayrıklaştırılıp düzenlenirse uzayın her noktasında üç elektrik ve üç magnetik alan bileşenini içeren iteratif denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (2.3)$$

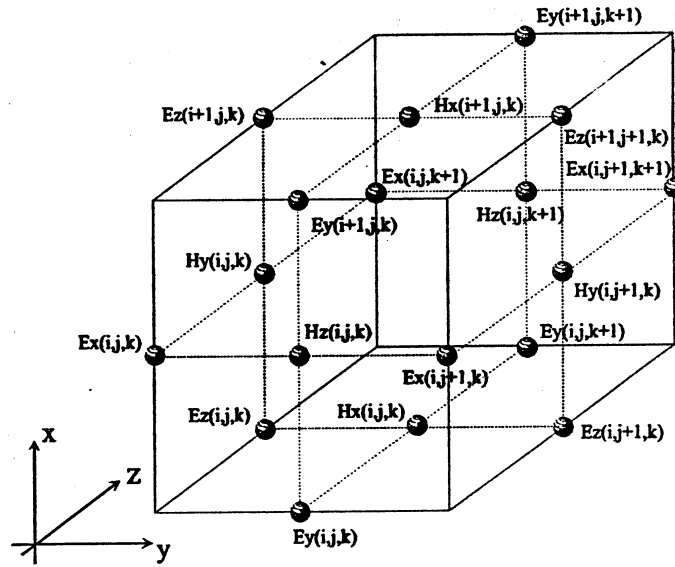
Şekil 2.1’de Yee hücresi ve alan değişimi verilmiştir.

Her birim Yee hücresinde üç elektrik ve üç magnetik alan bileşeni bulunur. Her hücre (i,j,k) etiketi ile anılır. Bunlar sırasıyla x,y ve z’deki hücre indisleridir. Zamanda ve konumda ayrıklaştırma adımları $\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ ’dir. Yani her alan bileşeni için ;

$$(i, j, k) = (i \times \Delta x, j \times \Delta y, k \times \Delta z) ; \quad (2.4)$$

anlamına gelmektedir. ($t = n \times \Delta t$ burada zaman indisi karışıklığa neden olmamak için gösterilmemiştir[7]. Aslında n zaman adımındaki alan bileşenleri, örneğin x -bileşeni, $E_x = E_x^n$ şeklindedir.)

her ne kadar bir hücre içerisindeki altı bileşen de aynı (i, j, k) etiketi ile gösterilse de Şekil 2.1'den görüldüğü gibi, bu bileşenlerin hücre yerleşimi farklıdır. Örneğin $E_x(i, j, k)$ hücrenin x -kenar ortasında iken, $H_z(i, j, k)$ hücrenin xy -yüzey ortasında bulunur. Yani elektrik alanlar hücre kenarlarında, magnetik alanlar hücre yüzeylerindedir.



Şekil 2.1 Yee Birim hücresi ve alan bileşenlerinin yerleşimi

Aynı hücrede, elektrik ve magnetik alanların yerleşimleri gibi hesaplandıkları zaman adımları da farklıdır. Elektrik ve magnetik alanlar birbirinden $\Delta t/2$ kadar farklı zamanlarda hesaplanırlar. Yani elektrik alan bileşenleri $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ adımlarında hesaplanırken, magnetik alanlar $t = \Delta t/2, 3\Delta t/2, 5\Delta t/2, \dots$ adımlarında hesaplanmaktadır. Böylece hesaplama bir elektrik alanlar bir magnetik alanlar diye iteratif olarak sürdürülür[4].

(2.3) eşitliğinden yararlanarak (2.2) eşitlikleri fark eşitlikleri şeklinde yazılırsa (2.5) eşitlikleri elde edilir.

$$\mu(i, j, k) \frac{H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta t} = \frac{E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j + 1, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta y} \quad (2.5a)$$

$$\mu(i, j, k) \frac{H_y^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n-1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta t} = \frac{E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i - 1, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i - \frac{1}{2}, j, k + 1) - E_x^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta z} \quad (2.5b)$$

$$\mu(i, j, k) \frac{H_z^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n-1/2}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta t} = \frac{E_x^n(i - \frac{1}{2}, j + 1, k) - E_x^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_y^n(i - 1, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \quad (2.5c)$$

$$\varepsilon(i, j, k) \frac{E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_x^{n-1}(i + \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta t} = \frac{H_z^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} + \sigma(i, j, k) E_x^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k) \quad (2.5d)$$

$$\varepsilon(i, j, k) \frac{E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_y^{n-1}(i, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta t} = \frac{H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{H_z^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n-1/2}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta x} + \sigma(i, j, k) E_y^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k) \quad (2.5e)$$

$$\varepsilon(i, j, k) \frac{E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^{n-1}(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta t} = \frac{H_y^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n-1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n-1/2}(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta y} + \sigma(i, j, k) E_z^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k) \quad (2.5f)$$

Bu eşitlikler düzenlenir ve gerekli genelleştirmeler yapılırsa (2.6) elde edilir.

$$H_x^{\tilde{n}}(i, j, k) = H_x^{\tilde{n}-1}(i, j, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_y^n(i, j, k) - E_y^n(i, j, k-1)] - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} [E_z^n(i, j, k) - E_z^n(i, j-1, k)] \quad (2.6a)$$

$$E_z^n(i, j, k) = \frac{2\varepsilon - \sigma \Delta t}{2\varepsilon + \sigma \Delta t} E_z^{n-1}(i, j, k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma \Delta t) \Delta y} [H_x^n(i, j, k) - H_x^n(i, j-1, k)] - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma \Delta t) \Delta x} [H_y^n(i, j, k) - H_y^n(i-1, j, k)] \quad (2.6b)$$

Burada n ve $\tilde{n}$ aralarında yarım adım fark olan zaman adımlarıdır. İteratif denklemlerden görüldüğü gibi, uzayın bir noktasındaki magnetik alan bileşeni aynı noktada bir önceki kendi değerine ve diğer eksenlerdeki komşu elektrik alan değerlerine bağlıdır. Örneğin, H_x bileşeni kendisinin zamanda önceki değeri ile komşu E_y ve E_z değerlerine bağlıdır.

Benzer şekilde E_z bileşeni de zamanda önceki değeri ile komşu H_x ve H_y değerleri ile belirlenir. Bu durumda, hiçbir bileşen verildiği noktadaki diğer bileşenlere gerek duymaktadır.

Aynı hücrede belli bir noktada elektrik ve magnetik alanlardan söz edebilmek için konumda ve zamanda ortalama almak yeterlidir. Örneğin alan bileşenlerini hücre merkezine ötelemek için iki magnetik alan bileşeni

$$H_x(i, j, k) = \frac{1}{2} \times [H_x(i, j, k) + H_x(i+1, j, k)] \quad (2.7a)$$

yeterlidir. Ancak elektrik alan bileşenleri için komşu dört bileşene gerek vardır.

$$E_z(i, j, k) = \frac{1}{4} \times [E_z(i, j, k) + E_z(i+1, j, k) + E_z(i, j+1, k) + E_z(i+1, j+1, k)] \quad (2.7b)$$

(2.6) İteratif denklemlerinden görüleceği üzere, üç magnetik alan bileşeninin hesabında sadece μ_0 kullanılmaktadır. Oysa elektrik alan bileşenlerinin hesabında (ε, σ) ortam parametreleri yer almaktadır. Bu nedenle her hücrede (ε, σ) ortam

parametreleri, ilgili elektrik alan bileşeninin tanımlandığı noktada verilmelidir. Üç elektrik alan bileşeni, hücrede üç ayrı noktada hesaplandığından hücre içerisinde bu noktaların (ϵ, σ) değerleri farklı verilerek değişik cisimler modellenenbilir[9].

2.1.1 Kararlılık (Courant) Koşulu

FDTD tekniğinde zaman adımı Δt 'nin, konum adımları $\Delta x, \Delta y$ ve Δz 'den bağımsız değildir. Courant kriteri ile konum ve zaman adımları ışık hızı (c) ile birbirine

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (2.8)$$

şeklinde bağlıdır. Courant kriterini açıklayacak olursak; bir an için sadece zamana ve x 'e bağlı dalga problemi için ele alalım. Bu durumda (2.8) bağıntısı

$$c \times \Delta t \leq \Delta x$$

şekline dönüşür. Eşitliğin sol tarafı, $c \times \Delta t$ yani dalganın aldığı yolu verir. Işık hızı dalganın maksimum hızı olduğuna göre dalganın alacağı maksimum yoldur. Sağ tarafında ise hücre boyutu vardır. O halde FDTD iteratif denklemlerinin kararlı olabilmesi için seçilen zaman adımında dalganın maksimum ilerlemesi hücre boyutunu aşmamalıdır. Başka bir deyişle, dalga hareketinin bir zaman adımında hücre içerisinde kalabilmesi için zaman adımı yeterince küçük seçilmelidir[9].

2.1.2 FDTD Yönteminde Parametre Seçimi

FDTD yönteminde önemli bir unsur uygun parametre seçmektir. Yöntemde birbirini doğrudan etkileyen bir çok parametre söz konusudur. Ele alınan yapıya, gerçekleştirilmek istenen simülasyona ve beklenen sonuçlara göre bu parametrelerin adım adım optimize edilmesi gerekir.

Bir çok elektromagnetik problemde frekans çözümleriyle ilgilenilir. FDTD ile elde edilen zaman domen davranışından Fourier dönüşümü ile frekans davranışı elde edilir. Bu nedenle, özellikle ayrık Fourier dönüşümünde karşılaşılan örtüşme ve spektral sızıntı gibi sorunlara karşı önlem almak gerekir.

FDTD simülasyonunda darbesel kaynak kullanılarak geniş frekans bandlarında analiz yapılır. İlgilenilen band içerisinde en yüksek frekans $f_{\max}$ ve frekans çözünürlüğü Δf , zaman parametrelerinden T : gözlem süresi ve Δt örnekleme aralığına bağlıdır. En yüksek frekans ile zaman örnekleme aralığı birbirine

$$\Delta t_{\text{Nyq}} = \frac{1}{2f_{\max}} \quad (2.9a)$$

ile bağlıdır. Görüldüğü gibi frekans analizi açısından parametreler keyfi seçilememektedir. İlgilenilen frekans yükseldikçe (Nyquist örnekleme hızı) zaman domeninde işareti daha sık örnekleme gerekmektedir. Benzer şekilde;

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (2.9b)$$

olduğundan, daha iyi frekans çözünürlüğü için işaretin zaman domeninde daha uzun süre gözlenmesi gerekmektedir. FDTD için gerekli Δt zaman adımı pratikte

$$\Delta t \leq \frac{\Delta t_{\text{Nyq}}}{K}; K > 1 \quad (2.10)$$

olarak seçilmektedir.

Zaman adımı bu şekilde belirlendikten sonra konum adımı için gerekli alt ve üst sınırlar iki koşula göre hesaplanmaktadır. Courant kararlılık kriteriyle 3D-FDTD için konum adımı alt sınırı

$$\sqrt{3}v_{\max} \Delta t \leq \Delta z \quad (2.11)$$

şeklinde belirlenmektedir. x ve y boyutları içinde (2.3) denkleminde Δz yerine sırasıyla Δx ve Δy konulmaktadır.

Konum adımının üst sınırı, sayısal dispersiyon koşulu ile hesaplanmaktadır. Konum-ışaret dalga boyu arasında da zaman-frekans ilişkisindeki Nyquist örnekleme hızına benzer koşul bulunmaktadır. Konumda seçilen adım uzunluğuna bağlı olarak, işaret

içindeki en küçük dalga boyu, yani en yüksek frekanslı bileşen, konumda en az iki düğüm ile gösterilmektedir. Üç boyutlu ve Δz adımlarına sahip bir yapıda konumda en uzak iki nokta $\sqrt{3}\Delta z$ olduğundan üst sınır

$$\sqrt{3}\Delta z \leq \frac{\lambda_{\min}}{2}$$

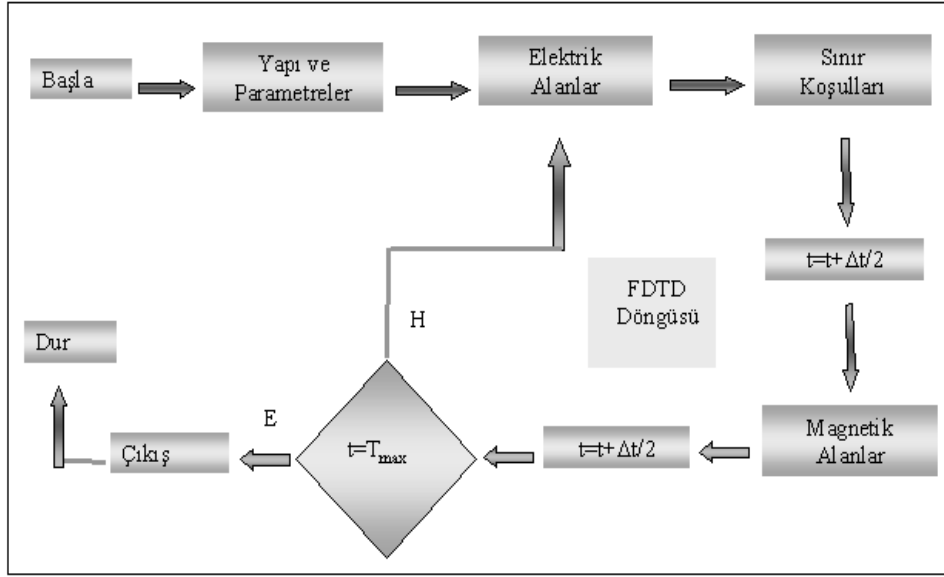
olarak hesaplanmaktadır. Uygulamada bu değer $\sqrt{3}\Delta z \leq \frac{\lambda_{\min}}{200}$ değerine kadar inebilmektedir[10].

2.2. FDTD Algoritması

FDTD algoritmasında döngü zaman döngüsüdür. Seçilen maksimum zaman adımı tamamlanıncaya kadar ana zaman döngüsü çalıştırılır. Ayrı ayrı işleri yapan alt programlar şeklinde düzenlenmesi, FDTD algoritmasının gerek işleyişini, gerekse kullanımı ve anlaşılmasını kolaylaştırır.

Tablo2.1'den de görüleceği gibi, ana FDTD algoritması önce ilgili yapıyı yerleştirir, gerekli parametrelerin hesabını yapar ve sonra zaman döngüsünü başlatır[9].

Tablo 2.1 Ana FDTD döngüsü ve iterasyon adımları



Ana FDTD döngüsü $t=0$ anında başlar. Önce elektrik alan bileşenleri bütün hücrelerde hesaplanır. Bitiminde, sınırlarda ışıınım koşullarının sağlanması elektrik alan bileşenleri kullanılarak gerçekleştirildiğinden, altı ışıınım koşullarının sağlandığı alt program çağırılır. Bu işlem için her sınır yüzeydeki teğetsel elektrik alan bileşenleri kullanılır.

FDTD uzayı içerisindeki bütün hücrelerde elektrik alanlar hesaplanıp, sınır yüzeylerde ışıınım koşullarının (ABS; açık bölge simülasyonu) sağlanması gerçekleştirildikten sonra magnetik alanların hesabına geçilir. Ancak, elektrik ve magnetik alanların hesaplandıkları anlar birbirinden $\Delta t/2$ kadar farklı olduğundan önce zaman adımı $\Delta t/2$ kadar artırılır. Sonra üç magnetik alan alt programı çağırılır.

Bunların bitiminden tekrar zaman $\Delta t/2$ kadar artırılır. Böylece simülasyon iteratif olarak sürdürülür. Yani, bir elektrik alanlar, bir magnetik alanlar hesaplanarak işleme devam edilir. Arda sınır yüzeylerde ABS gerçekleştirilir. Programda simüle edilen kaynak, istenen çıkışların yazdırılması, her türlü gerilim, akım ya da güç hesaplarının yapılması ve (isteniyorsa) uzak alan dönüşümlerinin hesaplanması bu döngü içerisinde yerini alır[7].

3. İNSAN KAFA MODELİNDE HESAPLANAN SAR (ÖZGÜL SOĞURMA ORANI) ve ELEKTRİK ALAN GENLİK DEĞERLERİ

3.1. Giriş

Elektromagnetik enerjinin biomedikal dokularda yarattığı etkileri belirlemek gerçekten zordur. Bu zorluklar

- Biyolojik mekanizmaların EM karmaşıklığı
- EMI etkisine karşı organizmanın ürettiği tepki
- Vücudun değişik bölgelerinde farklı etkilerin oluşması
- Etkilerin frekansa ve vücut boyutlarına bağlı olması[2].

Bütün bu zorluklara karşın özgül soğurma oranı (SAR) parametresine dayalı ölçmeler ve benzetim yöntemiyle doku-elektromagnetik enerji etkileşimi ayrıntılı incelenebilmektedir. SAR, ısıl etkinin kaynak büyüklüğüdür ve belli bir noktadaki SAR değeri ;

$$SAR = c \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.1)$$

ΔT : ısı artışı

Δt : enerji uygulanan süre

c : ısı kapasitesi [$J / kg^{\circ}C$]

SAR : Özgül soğurma oranı [W / kg]

Bu değer elektromagnetik alan büyüklükleri ile oluşturulan gücün sıcaklık artışına karşı düşen büyüklüğüdür ve elektriksel büyüklükler cinsinden;

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

σ : Dokunun iletkenliği [S/m]

ρ :dokunun yoğunluğu [Kg/m³]

$|E|$: Elektrik alan şiddetinin zaman ortalaması [V/m]

şeklinde ifade edilebilir. SAR değeri noktasal değışim gösterir ve gözlem noktasında buluna dokunun; yoğunluğuna, iletkenliğine, di elektrik sabitine ve doku içinde indüklenen elektrik alana bağlıdır. Bunların içinde en belirleyici olan büyüklük doku içinde indüklenen elektrik alandır[11]. Doku içinde indüklenen elektrik alan fiziksel ve biyolojik değışkenlerle değışim gösterir. Bu değışimi etkileyen parametreler; frekans, kaynağın gücü, polarizasyon, dokunun tipi, geometri ve geometri bileşimidir.

3.2. Hesaplamalar ve Bulunanlar

Sayısal elektromagnetik benzetim yöntemleri kullanılarak yapılan SAR hesabında, insan vücudu ve onun anatomik özelliklerini ayrıntılarıyla modellenmesi için Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi kullanılmıştır. FDTD hesap uzayına yerleştirilen kafa modelindeki SAR değışimleri gerçeğe uygun insan kafası modeli oluşturularak hesaplanmıştır. SAR hesabı yapılabilmesi için FDTD hesap uzayına yerleştirilen kafa modeli elektromagnetik dalgayla aydınlatılmış ve her hücrede oluşan elektrik alanın bileşenleri ve genliği bir periyotluk zaman diliminde hesap edilerek ortalaması gözlemlenmiştir. Bu değeri üzerinden model üzerinde 1gr ve 10gr'lık doku bölgeleri üzerinde ortalama SAR değeri bulunmuş ve maksimum değeri belirlenmiştir. Bu çalışmada, elektromagnetik etkileşimin SAR büyüklüğu ile değeriendirildiği frekans bölgesi olan 200MHz ile 4000MHz bölgesinde hesaplamalar yapılmıştır. Bu frekans bandında 7 frekans değeri seçilmiştir. Burada seçilen frekans değeriğerlerinin seçilme sebebi şöyledir;

200-900 MHz arasındaki frekanslar TV ve telsiz vericilerinin çalışma frekansı, 900 MHz ile 1800 MHz cep telefonu frekansı, 2450 MHz mikro dalga fırınların, 2500 MHz sayısal haberleşme sistemlerinin frekansıdır. Diğer frekanslar insanın maruz kalması muhtemel elektromagnetik dalganın frekansı olabilir[7].

Tüm sayısal hesaplarda ortalama güç yoğunluğu 1W/m² olan düzlem dalga kullanılmıştır. Dalganın genliği için şu hesap yapılabilir. A genlikli monokromatik

düzlem dalganın boşlukta güç yoğunluğunun bir periyot ortalaması

$\frac{1}{2} \frac{A^2}{120\pi} W/m^2$ 'dir. Buradan $1W/m^2$ yoğunluklu dalganın E alan genliği;

$A=27.46 V/m$ olarak belirlenir

Hesaplarda gelen alanın genliği $27.46V/m$ alınmıştır.

Bu değer, frekans ve polarizasyondan bağımsızdır.

$e_{\theta_i} = 1$ ise θ polarize, $e_{\psi_i} = 1$ ise ψ polarize dalga demektir.

Yukarıda belirtilen (90,180) yönünde gelen dalga için (-1,0) polarizasyonu kullanıldığında +x yönünde giden , +z yönünde lineer polarize olmuş dalgayı belirlemek için kullanılır (1,0) ise -z yönünde polarize olmuş demektir.

Sinüzoidal besleme durumunda simülasyon başlangıcında geçici olaylardan sonra hesap hacmi içerisinde sürekli sinüzoidal hale geçilmektedir. Geçici süre genelde 4-6 periyotta sona ermektedir. O halde SAR hesabı yapılırken simülasyonda sürekli hale geçilmesi için 4-6 periyot beklemek gerekir. Bu çalışmada 5 periyot bekleme uygun görülmüştür[7].

FDTD hesap uzayında parametre seçimi çok önemlidir. FDTD hesap uzayı için Δx konum ayırıklaştırma büyüklüğü $\lambda/10$ mertebesinde olması gerektiği göz önüne alınırsa kullanılacak en yüksek hesaplama frekansı $f = 5000MHz$ için;

$f = 5000MHz \rightarrow \lambda = 6cm$ 'dir.

$\Delta x = \frac{\lambda}{10} = 0,6cm$ 'den küçük olacak şekilde $\Delta x = 0,5cm$ seçilmiştir. (Δy ve Δz için de aynı hücre boyutu seçilir)

Δt seçimi için Bölüm 2.1.1'de belirtilen Courant kararlılık kriteri gereği

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} = \frac{\Delta x}{c\sqrt{3}}$$

Δx ve ışık hızı c yerine konursa $\Delta t \cong 9,6 \text{psn}$ bulunur.

Yapılan hesaplarda $\Delta t = 5 \text{psn}$ süresince sayısal hesaplama yapılmıştır. Kararlılık koşulunun sınırından uzak bir noktada çalışılarak yakınsama garanti edilmiştir[7].

Zaman adımı (NSTOP) seçilirken frekansa göre 5 periyotluk zamanı seçtiğimiz zaman adımına sığdırmaktır.

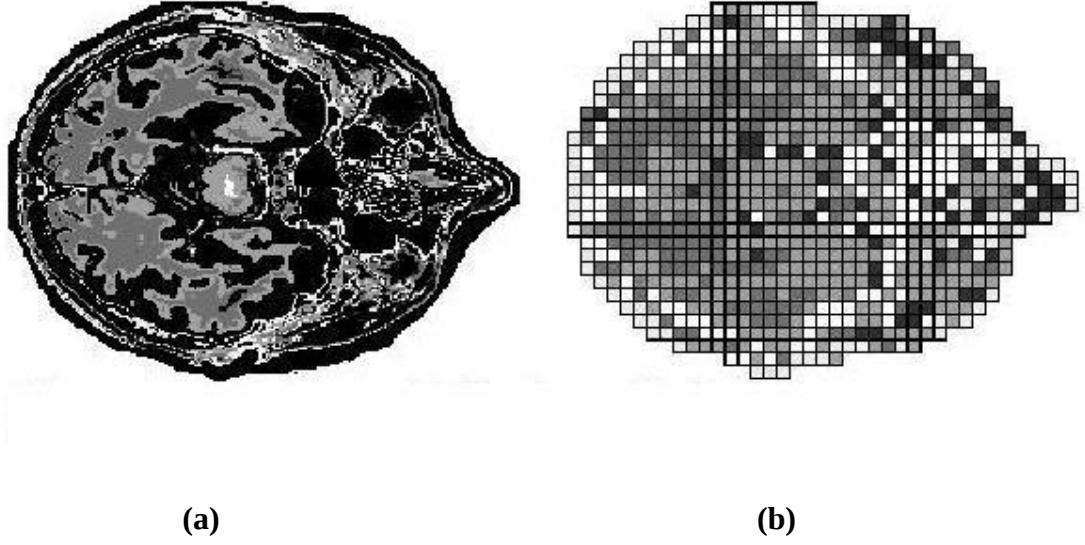
Tablo 3.1’de SAR hesabı yapılırken seçilen frekans değerleri, frekansa karşılık gelen periyotlar, seçilen zaman adımı, NSTOP değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1 Küre ve Kafa Yapısında SAR Hesapları için Seçilen Frekanslar ve Adım Sayıları

Frekans (MHz)	T (Periyot)	Δx	Δt	NSTOP	Seçilen NSTOP
200	5 nsn	0,005 m	5 psn	5000	6000
300	3,3 nsn	0,005 m	5 psn	3333	4500
500	2 nsn	0,005 m	5 psn	2000	3000
900	1,11 nsn	0,005 m	5 psn	1110	1500
1000	1 nsn	0,005 m	5 psn	1000	1500
1800	0,56 nsn	0,005 m	5 psn	556	1000
2500	0,4 nsn	0,005 m	5 psn	400	1000
4000	0,25 nsn	0,005 m	5 psn	250	1000

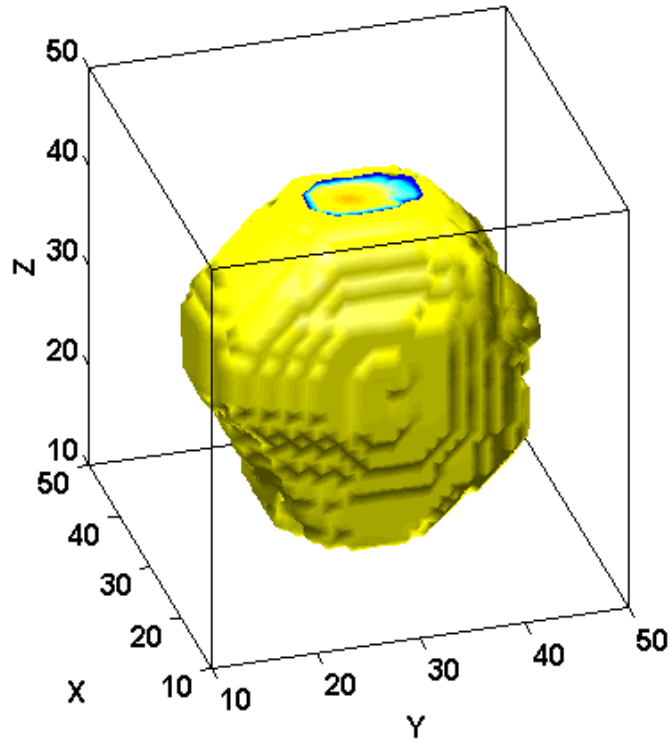
3.2.1. Kafa Yapısı ile İlgili SAR Hesapları

3 boyutlu FDTD hesap uzayına yerleştirilen model için ayrık kafa modeli kullanılmıştır. Şekil 3.1 'de, MR (Magnetic resonance) görüntüsü ve sayısallaştırılarak elde edilen insan kafası görülmektedir.



Şekil 3.1 (a) MR görüntüsü (b) Sayısallaştırılarak elde edilen İnsan Kafası

Şekil 3.2' de ise FDTD hesap uzayına yerleştirilmiş insan kafa modeli görülmektedir



Şekil 3.2 Ayrık Kafa Modeli ve Hesap Uzayı

FDTD hesap uzayı (60x60x60) boyutlarında seçilmiş, toplam hücre sayısı 216000 (60x60x60) ve hücre boyutları 0.5 cm alınmıştır. FDTD hesap uzayına yerleştirilen ayırık kafa modeli toplam 24552 (24x33x31) hücreden oluşmuştur. Ayırık kafa modelinde kullanılan dokular, kapladıkları hücre sayıları Tablo 3.2 'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Ayırık kafa modelinde kullanılan dokular ve hücre sayıları.

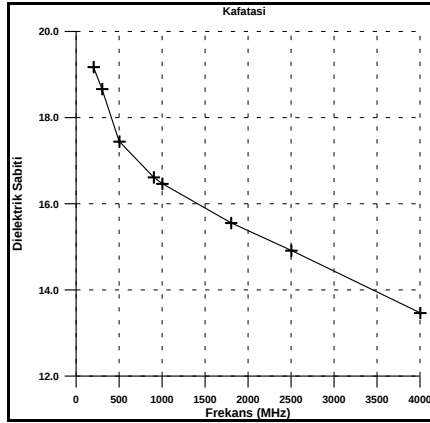
No	Doku	Hücre sayısı
0	Hava	203808
1	PEC (mükemmel iletken)	-
2	Kafatası	2188
3	Deri/yağ	2318
4	Kas	3490
5	Beyin	4066
6	Humor	16
7	Göz merceği	8
8	Kornea	106

Yedi farklı doku ayırık kafa modeline yerleştirilmiş, 7 ayrı frekans, 4 farklı yön ve 10 farklı polarizasyon durumunda aydınlatılan elektromagnetik dalga için SAR hesaplaması yapılmıştır. Ayırık kafa modelinde kullanılan dokular ve kullanılan frekansa göre bu dokuların elektriksel özellikleri şöyledir[7].

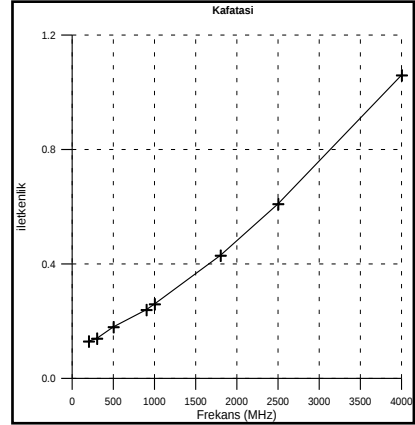
Tablo 3.3 İnsan Kafa Modelindeki Dokuların Di elektrik Özellikleri[7]

Dokular	Kafatası ρ (kg/m ³)=1850		Deri/ Yağ ρ (kg/m ³)=1100		Kas ρ (kg/m ³)=1040		Beyin ρ (kg/m ³)=1030		Humor ρ (kg/m ³)=1010		Göz merceği ρ (kg/m ³)=1050		Kornea ρ (kg/m ³)=1040	
F (MHz)	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ
4000	13,74	1,06	30,68	1,97	51,52	3,15	40,53	2,61	66,92	4,04	37,62	2,33	49,22	3,65
2500	14,92	0,61	32,12	1,17	53,51	1,85	42,47	1,54	68,17	2,52	39,24	1,32	51,53	2,33
1800	15,56	0,43	32,91	0,88	54,54	1,39	43,54	1,15	68,57	2,03	40	0,96	52,76	1,86
1000	16,47	0,26	34,24	0,62	55,74	1	45,43	0,8	68,87	1,67	41,03	0,66	54,83	1,44
900	16,62	0,24	34,50	0,60	55,96	0,97	45,8	0,77	68,90	1,63	41,20	0,63	55,23	1,39
500	17,45	0,18	36,26	0,49	57,32	0,84	48,42	0,63	68,98	1,54	42,29	0,54	57,93	1,23
300	18,67	0,14	39,57	0,43	59,75	0,78	53,58	0,53	69,02	1,51	44,29	0,49	62,97	1,13
200	19,18	0,13	41,10	0,41	60,86	0,76	56,06	0,5	69,03	1,50	45,25	0,48	65,28	1,10

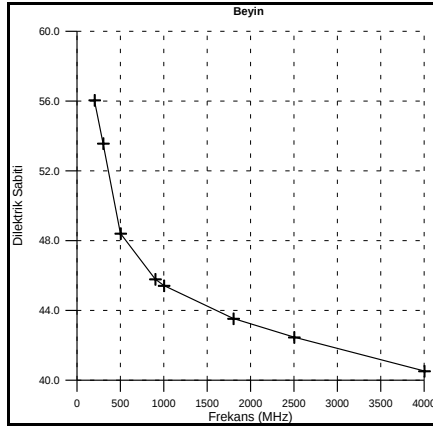
Şekil 3.3' de kafatasının ve beyin elektriksel özellikleri gösterilmiştir.



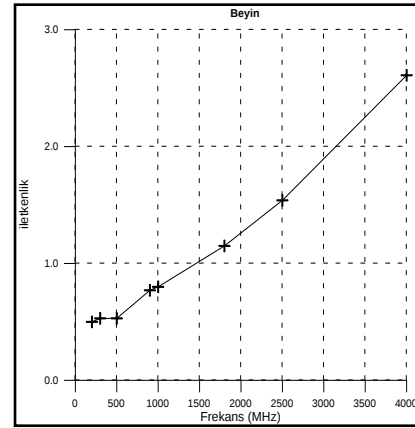
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.3 Kafatası ve Beyin Dokularının Elektriksel Özellikleri, (a) Kafatası Di elektrik Sabiti (b) Kafatası İletkenlik Sabiti (c) Beyin Di elektrik Sabiti (d) Beyin İletkenlik sabiti

FDTD hesap uzayına yerleştirilen ayırık kafa modeli aşağıdaki yön ve polarizasyondaki elektromagnetik dalgalarla aydınlatılmıştır.

1.durum;geliş yönü $\theta=90$, $\phi=180$,polarizasyon $(-1,0)$;+x yönünde giden dalga; geliş yönü sol kulak,düşey polarizasyon.

2.durum;geliş yönü $\theta =0$, $\phi =180$,polarizasyon $(-1,0)$;+z yönünde giden dalga; geliş yönü kafanın üst kısmı,düşey polarizasyon.

3.durum;geliş yönü $\theta=45$, $\phi=180$,polarizasyon $(-0.707,0.707)$;+x yönünde giden dalga; geliş yönü sol kulak yönünden kafaya doğru,çapraz yönde çapraz polarizasyon.

4.durum;geliş yönü $\theta =90$, $\phi =180$,polarizasyon $(0,1)$;+x yönünde giden dalga; geliş yönü sol kulak ,yatay polarizasyon

5.durum;geliş yönü $\theta =90$, $\phi =135$,polarizasyon $(-1,0)$;+z yönünde giden dalga; geliş yönü sol göz,düşey polarizasyon.

6.durum;geliş yönü $\theta =90$, $\phi =135$,polarizasyon $(0,1)$;+z yönünde giden dalga; geliş yönü sol göz,yatay polarizasyon.

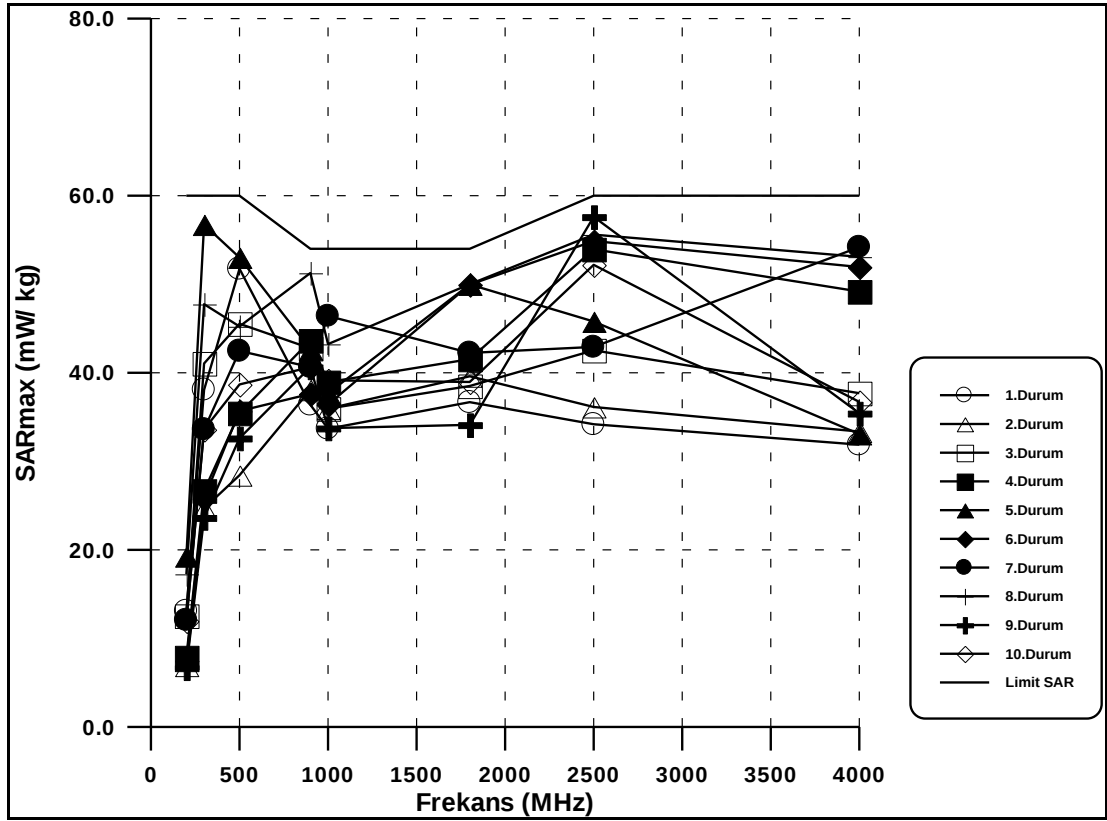
7.durum;geliş yönü $\theta =90$, $\phi =135$,polarizasyon $(0.707,0.707)$;+z yönünde giden dalga; geliş yönü sol göz,çapraz polarizasyon.

8.durum;geliş yönü $\theta =90$, $\phi =90$,polarizasyon $(-1,0)$;+z yönünde giden dalga; geliş yönü burun,düşey polarizasyon.

9.durum;geliş yönü $\theta =90$, $\phi =90$,polarizasyon $(0,1)$;+z yönünde giden dalga; geliş yönü burun,yatay polarizasyon.

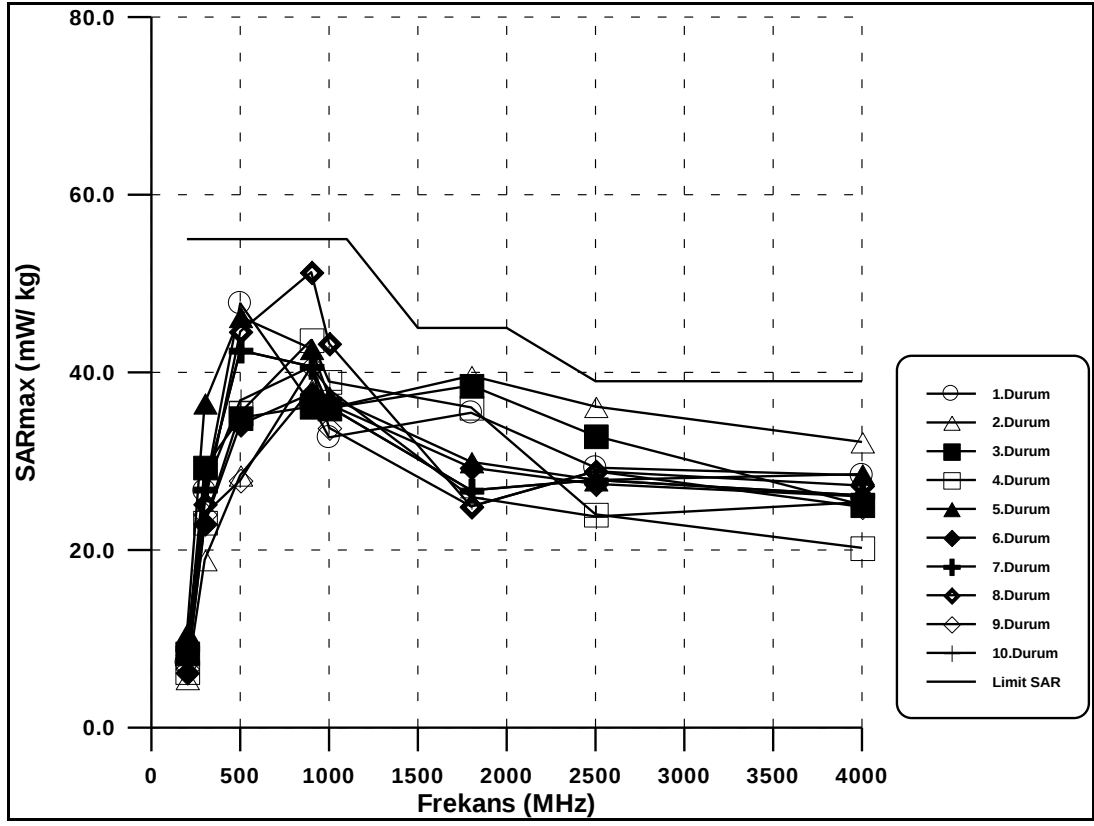
10.durum;geliş yönü $\Phi =90$, $\theta =90$,polarizasyon $(0.707,0.707)$;+z yönünde giden; geliş yönü burun, çapraz polarizasyon

10 durumun her biri için her hücrede oluşan elektrik alanın bileşenleri ve genliği bir periyotluk zaman diliminde hesap edilerek ortalaması gözlemlenmiştir. Bu değer üzerinden model üzerinde 1gr ve 10gr'lık doku bölgeleri üzerinde ortalama SAR değeri bulunmuş ve maksimum değeri belirlenmiştir. Maksimum değerleri belirlenen 1gr ve 10gr doku bölgeleri beyin, göz ve tüm kafa üzerindeki dokular olaraktan seçilmiştir. Şekil 3.4'de 10 farklı durumda monokromatik düzlem dalgayla aydınlatılan ayırık kafa modelinden elde edilen 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR değerleri gösterilmiştir.

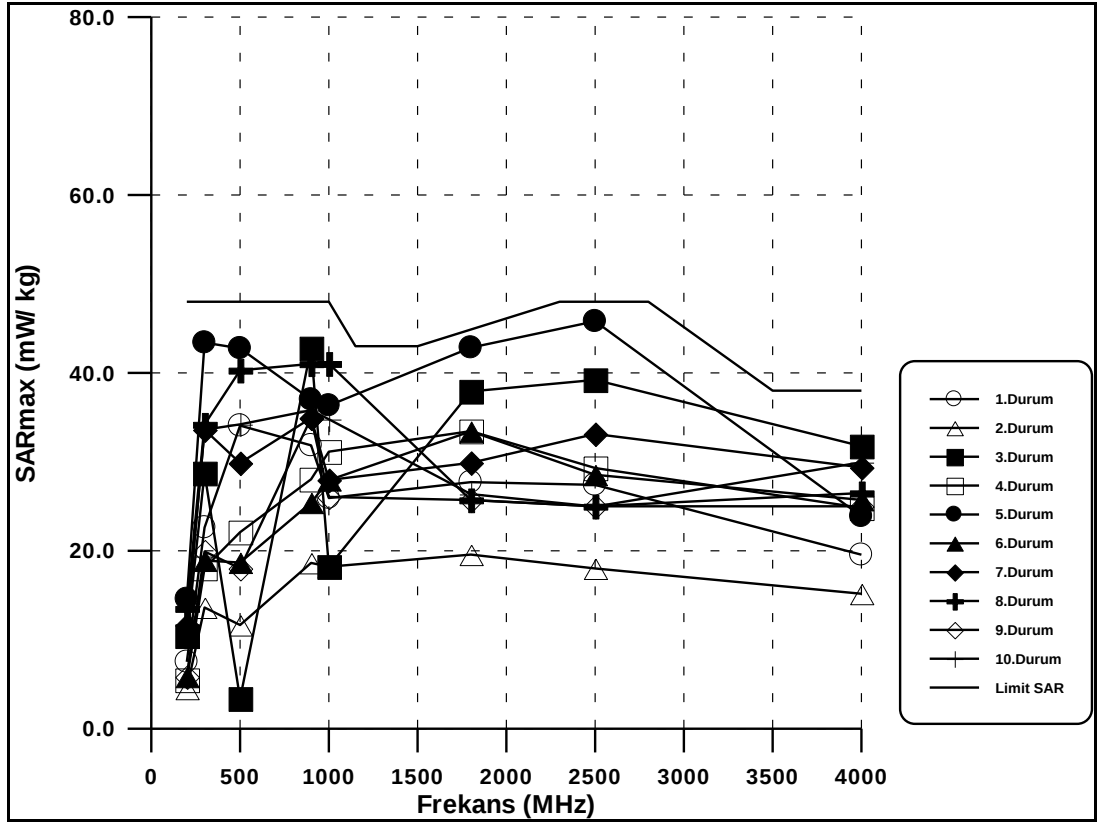


Şekil 3.4 Tüm Kafa Üzerindeki 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR

Şekil 3.5 ve 3.6’de ise 10gr’lık beyin ve göz dokuları için 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR değerlerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Göz ve beyin dokularının seçilmesinin sebebi; yapılarındaki su oranının (dolayısıyla zayıflatma sabitinin) fazlalığının yutulmayı artırması ve soğurulmayı sağlayabilecek kan dolaşımının olmamasıdır.

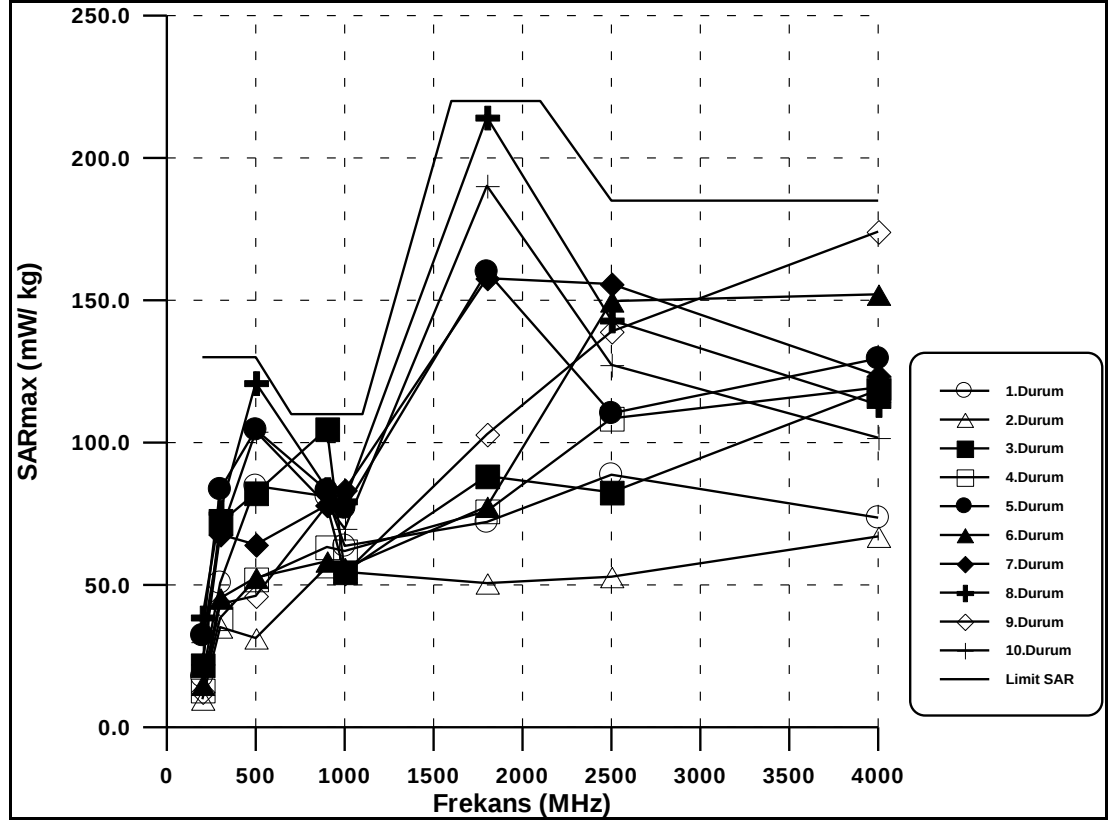


Şekil 3.5 Beyin dokuları için 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR

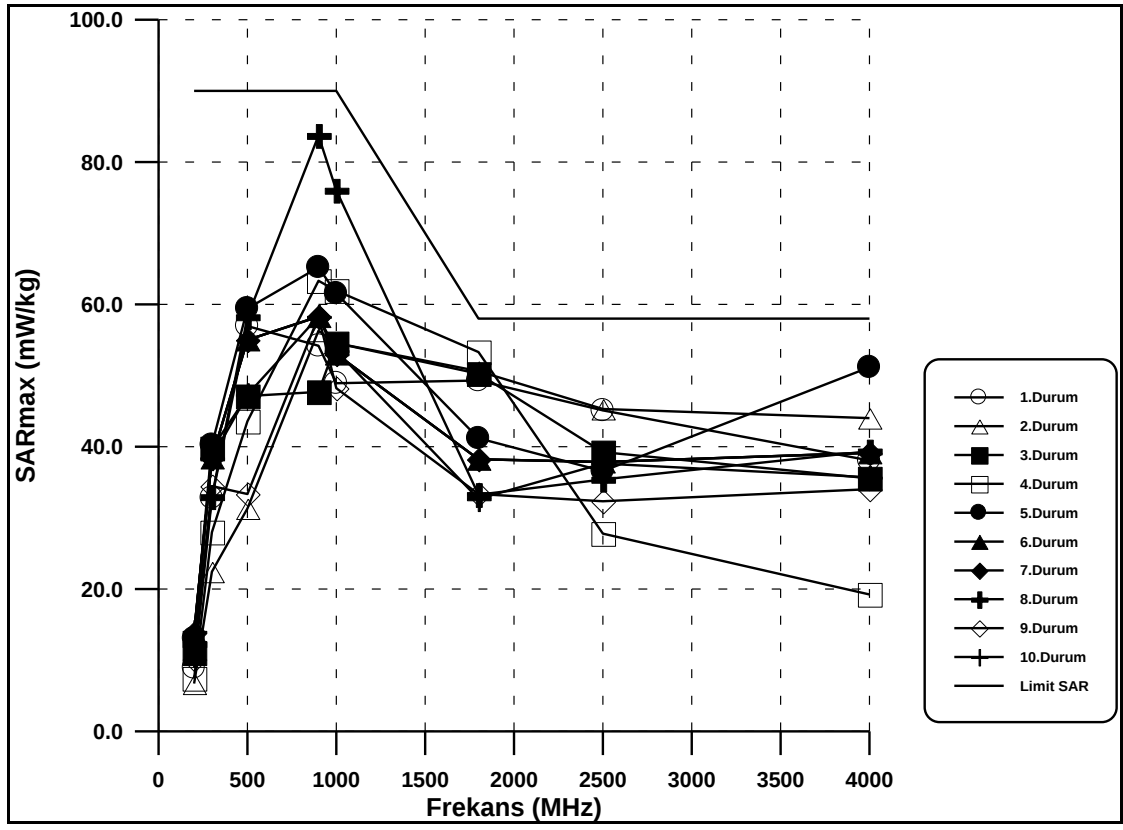


Şekil 3.6 Göz Dokuları için 10gr-Maksimum SAR ve Limit SAR

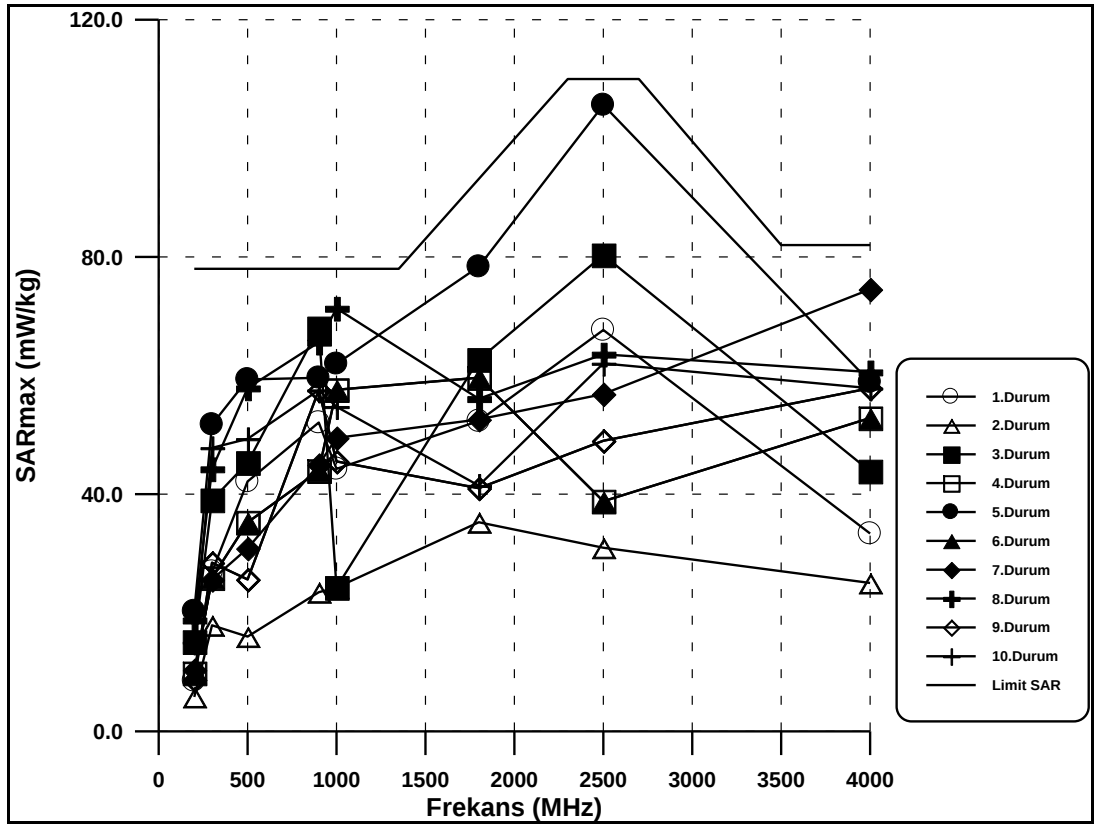
Şekil 3.7’de tüm kafa üzerinden elde edilen 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR değerleri, Şekil 3,8 ve Şekil 3,9’de sırasıyla Beyin ve Göz dokuları için 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR değerleri verilmiştir.



Şekil 3.7 Tüm Kafa Üzerinden 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR



Şekil 3.8 Beyin Dokuları için 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR



Şekil 3.9 Göz dokuları için 1gr-Maksimum SAR ve Limit SAR

Tüm kafa üzerinden 10gr'lık dokular için elde edilen 10gr-Maksimum SAR, dokunun gerçek ağırlığı ve maksimum SAR değerinin bulunduğu yerdeki dokular tablolar halinde verilmiştir.

İlk 3 durum Tablo 3.4, 3.5 ve 3.6'da sunulmuştur.

Tablo 3.4 1,2 ve 3. Durum için Kafa Yapısında 10gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 10gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	1.Durum			2.Durum			3.Durum		
Frekans (MHz)	SARmax mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SARmax mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SARmax mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi
200	13.07	10.54	kas,deri,kemik,beyin	6.91	10.54	kemik,deri,kas	12.54	10.19	kemik,deri,kas
300	38.09	11.07	kas,deri,kemik,beyin	24.67	10.23	kemik,deri,kas	41.07	9.90	kemik,kas
500	51.75	9.36	kas	28.43	10.30	beyin	45.54	10.18	kas
900	36.39	10.30	beyin	38.09	10.40	beyin	42.77	9.98	kemik,kas,deri,cor,lens
1000	33.69	10.43	deri,kas	35.95	10.40	beyin	35.95	10.40	kemik.beyin
1800	36.68	10.36	deri,kas,kemik	39.61	10.47	beyin,kemik,deri	38.52	10.09	kemik,kas,deri,kor,lens,humor
2500	34.19	10.26	deri,kas	36.14	10.47	beyin,kemik,deri	42.54	9.60	kemik,deri,kas
4000	31.88	9.76	kas,deri,kemik,beyin	33.37	10.13	beyin,kemik,deri	37.71	10.52	kemik,kas,deri,kor,lens,humor

Tablo 3.5 4,5 ve 6. Durum için Kafa Yapısında 10gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 10gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular.

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	4.Durum			5.Durum			6.Durum		
Frekans (MHz)	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi
200	7.86	10.46	kas,deri	19.28	10.52	kemik,kas	7.48	9.85	kemik,deri,kas
300	26.67	10.60	kas,kemik	56.74	10.52	kemik,kas	25.79	10.60	kas
500	35.45	10.30	beyin	53.03	9.36	kas	35.69	9.36	kas
900	43.65	10.30	beyin	42.66	10.30	beyin	37.62	10.30	beyin
1000	38.95	10.30	beyin	37.69	10.43	deri,kas,beyin,humor,kens,kornea	36.40	10.30	beyin
1800	41.54	10.50	kemik,deri,beyin	49.99	9.65	kemik,kas,deri	49.96	9.50	kemik,deri,kas
2500	53.96	9.50	kemik,deri,kas	45.80	9.36	kemik,kas,deri,kornea,lens	54.89	10.86	kemik,deri,kas
4000	49.17	9.50	kemik,deri,kas	33.09	9.21	deri,kas,	51.96	9.50	kemik,deri,kas

Tablo 3.6 7,8,9ve 10. Durum için Kafa Yapısında 10gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 10gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	7.Durum			8.Durum			9.Durum			10.Durum		
Frekans (MHz)	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX mW/kg	Agirlik (gr)	Doku Adi
200	12.08	11.34	kemik,kas,kor.	17.26	9.81	deri,kas,kemik	6.66	11.13	beyin,kemik,kor.	11.97	10.90	deri,kas,kemik
300	33.61	11.01	kemik,kas,kor.	47.76	10.52	kemik,kas	23.63	11.13	beyin,kemik,kor.	33.61	11.01	kemik,kas,beyin,humor,kor.
500	42.48	10.30	beyin	45.24	9.36	kas	32.62	10.40	kas	38.69	9.89	kemik,kas
900	40.65	10.30	beyin	51.27	10.30	beyin	40.65	10.30	beyin	40.65	10.30	beyin
1000	46.42	10.41	deri,kas	43.24	10.30	beyin	33.75	10.30	beyin	39.16	10.52	deri,kas
1800	42.24	10.52	deri,kas	50.00	9.81	deri,kas,kemik	34.12	10.86	deri,kas,kemik	38.97	10.83	deri,kas,kemik
2500	42.92	10.86	deri,kas,kemik	55.61	10.86	deri,kas,kemik	57.62	10.86	deri,kas,kemik	52.20	11.28	deri,kas,kemik
4000	54.19	9.50	deri,kas,kemik	53.10	10.61	deri,kas,kemik	35.44	11.41	deri,kas,kemik	36.71	10.86	deri,kas,kemik

Tüm kafa üzerinden 1gr'lık dokular için elde edilen 1gr-Maksimum SAR, dokunun gerçek ağırlığı ve maksimum SAR değerinin bulunduğu yerdeki dokular Tablo 3.7,3.8 ve 3.9'da sunulmuştur.

Tablo 3.7 1,2,3ve 4. Durum için Kafa Yapısında 1gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 1gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	1.Durum			2.Durum			3.Durum			4.Durum		
Frekans (MHz)	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi
200	17.77	1.04	kas	9.80	1.04	kas	21.86	1.07	deri,kas	12.98	1.26	kas,kemik,deri
300	50.67	1.04	kas	35.13	1.04	kas	71.77	0.91	kas	38.40	1.04	kas
500	84.75	1.04	kas	31.31	1.03	beyin	82.27	1.04	kas	52.04	1.04	kas
900	81.05	1.07	kas,deri	56.30	1.03	beyin	104.77	1.07	deri,kas	63.30	1.03	beyin
1000	63.68	1.07	kas,deri	54.54	1.03	beyin	54.54	1.03	beyin	61.91	1.03	beyin
1800	72.09	1.09	kas,deri	50.61	1.03	beyin	88.25	1.10	deri	75.95	1.04	kas
2500	88.67	1.07	kas,deri	52.85	1.07	beyin,deri	82.51	1.06	kas,deri,lens,kor.	108.47	1.07	kas,deri
4000	73.60	1.07	kas,deri	67.01	1.24	kemik,deri	118.49	1.05	kas,deri,kemik	119.34	1.09	kas,deri

Tablo 3.8 5,6,7ve 8. Durum için Kafa Yapısında 1gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 1gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	5.Durum			6.Durum			7.Durum			8.Durum		
Frekans (MHz)	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi
200	32.23	1.07	kas,deri	14.97	1.26	kemik,kas,deri	22.14	1.07	deri,kas	38.65	1.07	kas,deri
300	83.56	1.04	kas	45.30	1.14	kemik,kas	67.74	0.91	deri	75.75	1.04	kas
500	104.54	1.07	kas,deri	52.55	1.04	kas	64.13	1.06	deri,kas	120.96	1.07	kas,deri
900	83.17	1.07	kas,deri	58.31	1.26	kemik,kas,deri	78.01	1.07	deri,kas	83.72	1.03	beyin
1000	77.04	1.07	kas,deri	55.94	1.03	beyin	83.32	1.07	deri,kas	79.45	1.07	kas,deri
1800	160.03	1.09	kas,deri	77.51	0.95	kas,deri	157.74	1.09	deri,kas	214.29	1.09	kas,deri
2500	110.29	1.07	kas,deri	149.68	1.07	kas,deri	155.70	1.07	deri,kas	143.00	1.07	kas,deri
4000	129.53	0.94	kas,deri	152.07	1.10	deri	123.47	1.07	deri,kas	113.29	1.10	kas

Tablo 3.9 9. ve 10. Durum için Kafa Yapısında 1gr-Maksimum SAR Değeri, Gerçek Doku Ağırlığı ve 1gr-Maksimum Değerinin Bulunduğu Yerdeki Dokular

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	9.Durum			10.Durum		
Frekans (MHz)	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi	SMAX (mW/kg)	Agirlik (gr)	Doku Adi
200	12.45	1.26	kemik,kas,deri	29.97	1.06	kas,deri
300	43.31	1.14	kemik,kas	67.74	0.91	kas
500	46.15	8.10	kas,deri	103.91	1.06	kas,deri
900	78.01	1.07	kas,deri	78.01	1.07	kas,deri
1000	54.11	0.81	kas,deri	69.76	1.07	kas,deri
1800	102.88	1.07	kas,deri	190.21	1.09	kas,deri
2500	139.01	1.07	kas,deri	127.32	1.07	kas,deri
4000	174.11	1.10	deri	101.67	1.10	deri

3.2.2 Kafa Yapısı ile İlgili Elektrik Alan Hesaplamaları

Tüm sayısal hesaplarda ortalama güç yoğunluğu 1W/m^2 olan düzlem dalga kullanılmıştır. Dalganın genliği için şu hesap yapılabilir. A genlikli monokromatik düzlem dalganın boşlukta güç yoğunluğunun bir periyot ortalaması

$$\frac{1}{2} \frac{A^2}{120\pi} \text{ W/m}^2 \text{ 'dir. Buradan } 1\text{W/m}^2 \text{ yoğunluklu dalganın E alan genliği;}$$

$A=27.46 \text{ V/m}$ olarak belirlenir

Bu değer, frekans ve polarizasyondan bağımsızdır. Bu çalışmada SAR hesaplamaları yapılırken, gelen dalganın elektrik alan genliği 27,46 olduğu kabul edilmiştir. Bulunan SAR değerleri, 27,46 V/m değerine karşılık gelen 10gr ve 1gr-Maksimum SAR değerleridir. Monokromatik düzlem dalganın elektrik alan genliği (**27,46 V/m**) kullanılarak standartlarda belirtilen sınırlara (**0.08 W/kg tüm vücut için, 1.6 W/kg küp şeklindeki herhangi 1gr'lık doku, 2.0 W/kg küp şeklindeki herhangi**

10gr’lık doku) karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genliği için şu hesaplama yapılır;

200MHz’de ortalama güç yoğunluğu 1 W/m^2 ve elektrik alan genliği $27,46\text{ V/m}$ olan düzlem dalga için tüm kafa üzerindeki 10 gr doku bölgeleri göz önüne alındığında 10gr-Maksimum SAR değeri $7,2\text{ mW/kg}$ ’dır. Tüm vücut ve 10 gr için satandardlarda belirtilen SAR limitleri sırasıyla 80 mW/kg ve 2000 mW/kg ’dır. Bu sınırlara karşı gelen ortalama güç yoğunlukları sırasıyla $11,11\text{ W/m}^2$ ve $277,8\text{ W/m}^2$ ’dir.

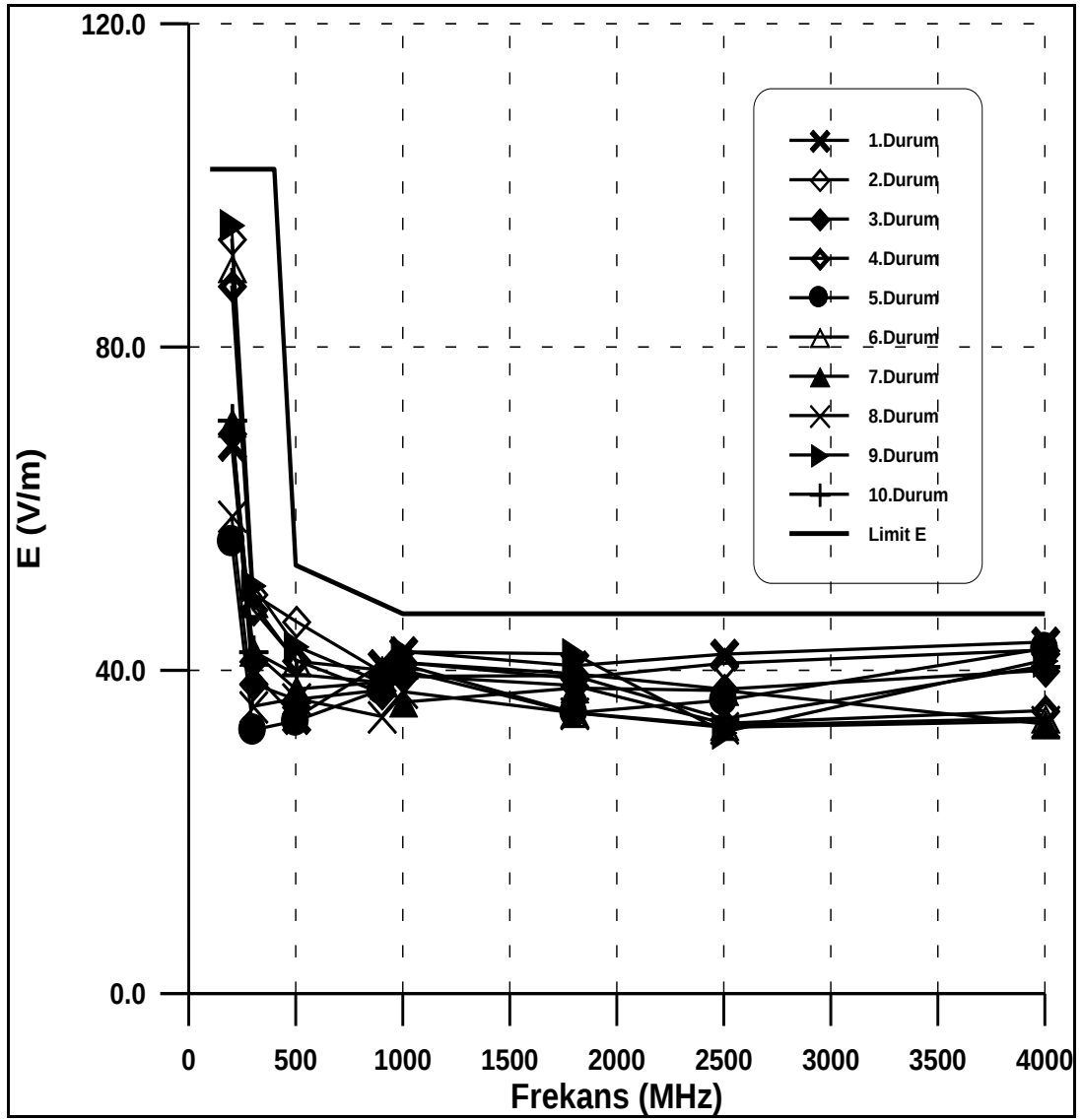
$$P = \frac{1}{2} \frac{E^2}{\eta_0}$$

formülü gereği 80 mW/kg ve 2000 mW/kg için gerekli olan elektrik alan

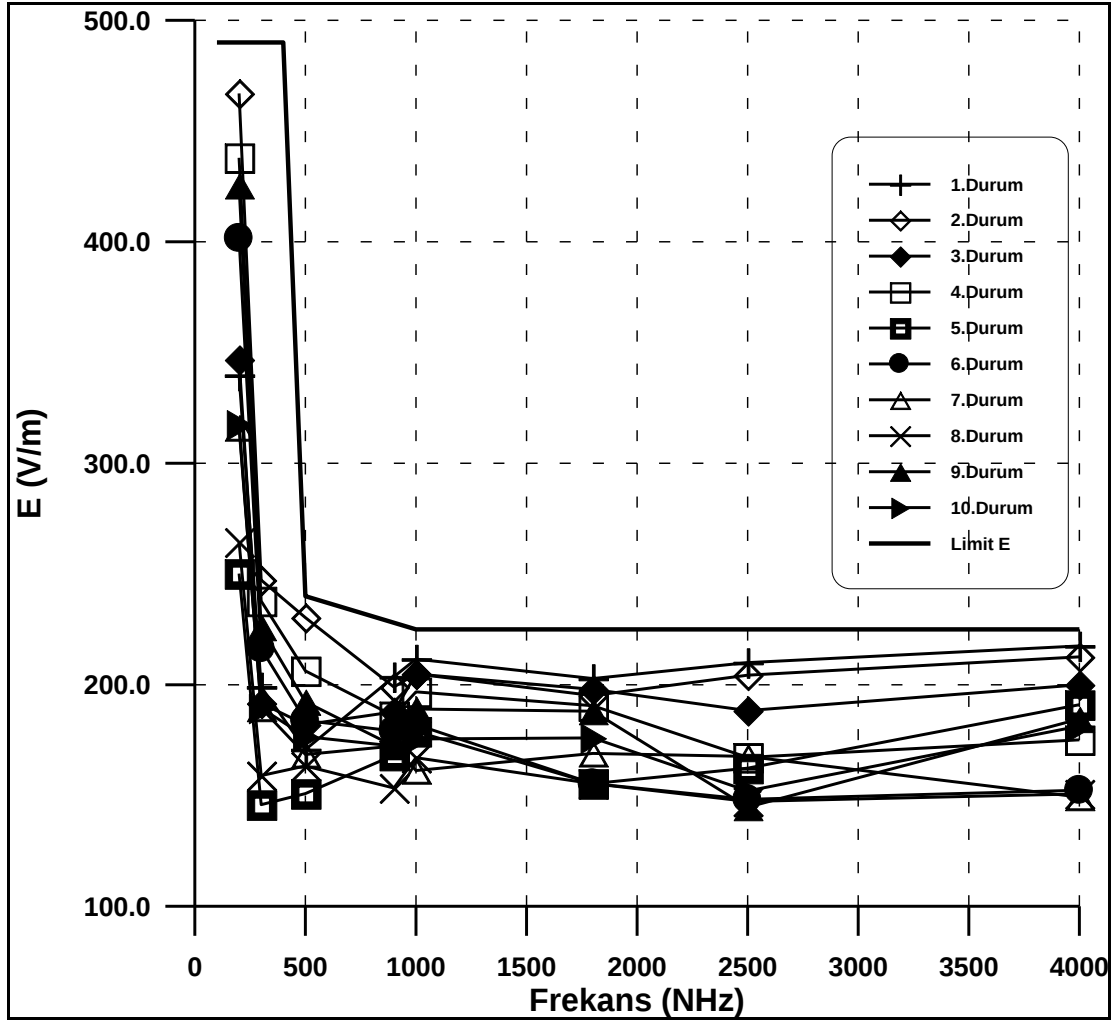
genlikleri sırasıyla $91,53\text{ V/m}$ ve $457,65\text{ V/m}$ olarak bulunur.

1gr ve 10 gr için farklı frekans durumlarında satandardlarda belirtilen sınırlara **(0.08 W/kg tüm vücut için, 1.6 W/kg küp şeklindeki herhangi 1gr’lık doku, 2.0 W/kg küp şeklindeki herhangi 10gr’lık doku)** karşı düşen elektrik alan genliği değerleri için aynı hesaplama yapılabilir.

Şekil 3.10 ve 3.11’da herhangi bir 10gr’lık doku ve tüm vücut için satandardlarda belirtilen sınırlara **(0.08 W/kg tüm vücut için, 2.0 W/kg küp şeklindeki herhangi 10gr’lık doku)** karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri ve Limit E her bir durum için frekansla değişimleri verilmiştir.

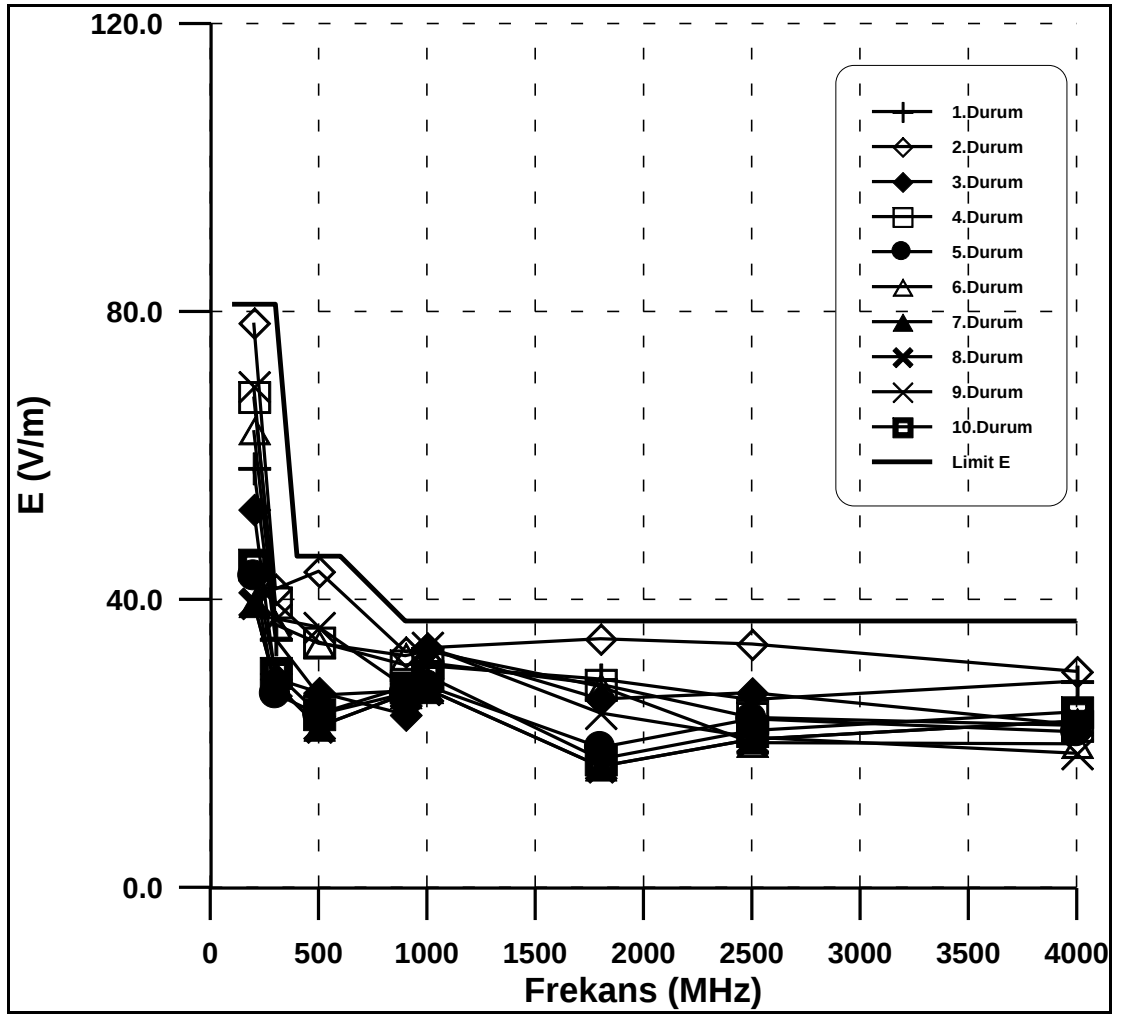


Şekil 3.10 Standardlarda tüm vücut için belirtilen sınırlara (**0.08 W/kg tüm vücut için**) karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri ve Limit E, 10 gr'lık Maximum SAR değerlerine göre

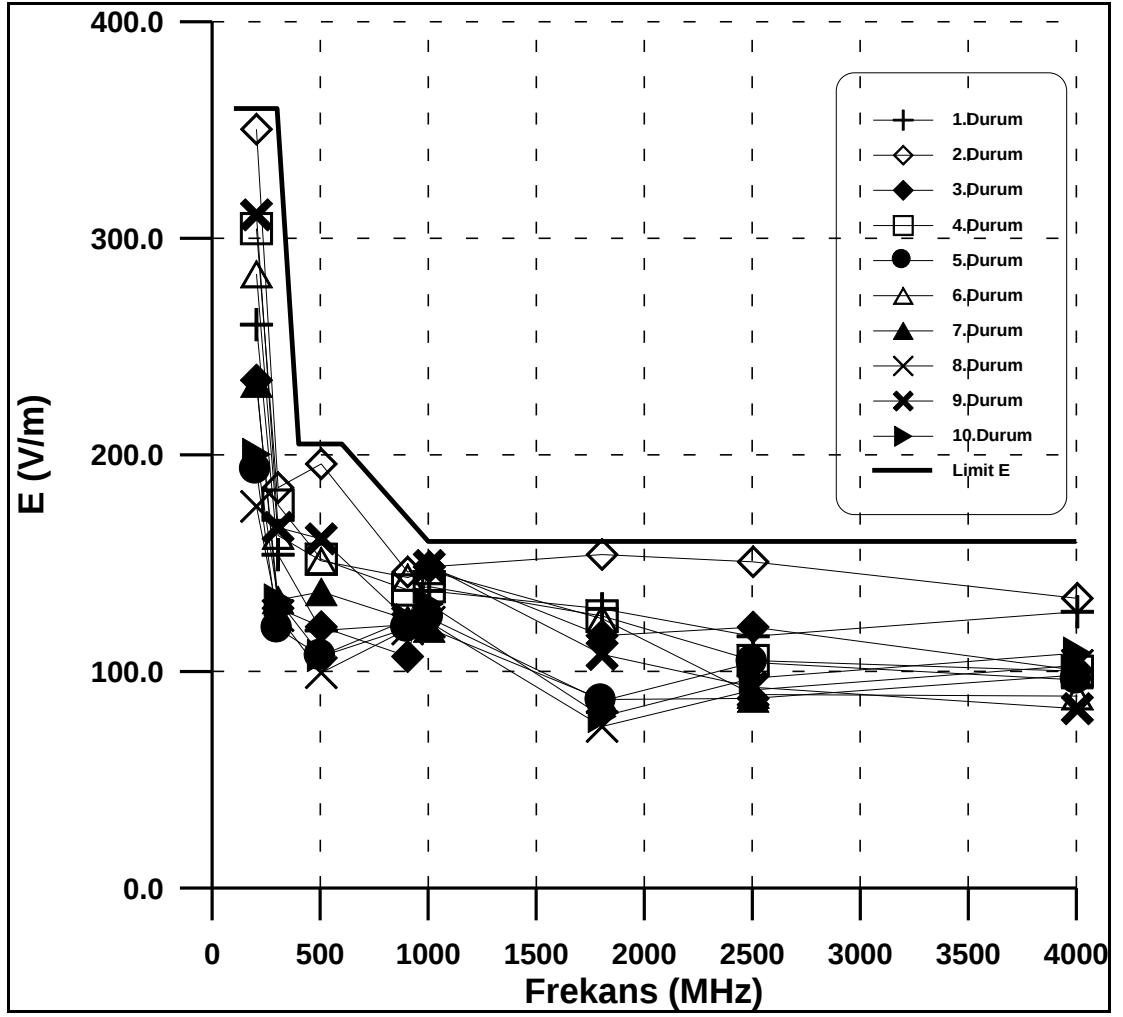


Şekil 3.11 Satandardlarda her hangi bir 10'lık doku için belirtilen sınıra (**2.0 W/kg küp şeklindeki herhangi 10gr'lık doku**) karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri ve Limit E

Şekil 3.12 ve 3.13'de herhangi bir 1gr'lık doku ve tüm vücut için satandardlarda belirtilen sınırlara (**0.08 W/kg tüm vücut için, 1.6 W/kg küp şeklindeki herhangi 1gr'lık doku**) karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri ve Limit E her bir durum için frekansla değişimleri verilmiştir.



Şekil 3.12 Satandardlarda tüm vücut için belirtilen sınırlara (**0.08 W/kg tüm vücut için**) karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri ve Limit E, 1 gr'lık Maksimum Sar değerlerine göre



Şekil 3.13 Satandardlarda her hangi bir 1gr'lık doku için belirtilen sınıra (**1.6 W/kg küp şeklindeki herhangi 1gr'lık doku**) karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri ve Limit E.

Tablo 10,11 ve 12'de küp şeklindeki her hangi 10gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlik değerleri verilmiştir.

Tablo 3.10 1.,2. ve 3. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 10gr’lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	1.Durum		2.Durum		3.Durum	
Frekans (MHz)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)
200	58.264	260.566	78.45	350.83	52.525	234.899
300	34.504	154.305	41.44	185.32	28.991	129.653
500	26.679	119.310	43.89	196.28	27.078	121.095
900	27.281	122.005	32.73	146.39	23.995	107.307
1000	30.777	137.640	33.26	148.72	33.256	148.725
1800	28.926	129.360	34.52	154.39	26.145	116.923
2500	26.082	116.641	33.78	151.09	27.038	120.916
4000	28.628	128.028	30.00	134.18	22.562	100.901

Tablo 3.11 4.,5. ve 6. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 10gr’lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	4.Durum		5.Durum		6.Durum	
Frekans (MHz)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)
200	68.18	304.90	43.26	193.46	63.49	283.92
300	39.63	177.25	26.87	120.16	36.49	163.19
500	34.05	152.26	24.02	107.43	33.88	151.52
900	30.87	138.05	26.93	120.44	32.16	143.83
1000	31.21	139.59	27.98	125.14	32.84	146.86
1800	28.18	126.04	19.41	86.83	27.90	124.76
2500	23.58	105.46	23.39	104.59	20.08	89.78
4000	22.48	100.54	21.58	96.51	19.92	89.07

Tablo 3.12 7.,8.,9 ve 10. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 10gr’lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	7.Durum		8.Durum		9.Durum		10.Durum	
Frekans (MHz)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	1600 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)
200	52.20	233.44	39.51	176.68	69.60	311.26	44.87	200.64
300	29.84	133.45	28.22	126.20	37.32	166.90	29.84	133.45
500	30.67	137.15	22.33	99.87	36.15	161.68	24.09	107.75
900	27.81	124.36	26.84	120.04	27.81	124.36	27.81	124.36
1000	26.91	120.33	27.55	123.22	33.39	149.32	29.41	131.51
1800	19.55	87.45	16.78	75.03	24.21	108.29	17.81	79.64
2500	19.68	88.03	20.54	91.85	20.83	93.16	21.77	97.34
4000	22.10	98.85	23.07	103.19	18.61	83.24	24.36	108.93

Tablo 13,14 ve 15’de k p şeklindeki her hangi 1gr’lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı d  en SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri verilmiştir.

Tablo 3.13 1.,2.,3 ve 4. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 1gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	1.Durum		2.Durum		3.Durum		4.Durum	
Frekans (MHz)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	20000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	20000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)
200	67.94	339.71	93.40	467.00	69.35	346.74	87.59	437.95
300	39.80	198.98	49.45	247.24	38.33	191.63	47.55	237.77
500	34.14	170.71	46.07	230.33	36.39	181.97	41.25	206.24
900	40.71	203.57	39.79	198.97	37.56	187.78	37.18	185.88
1000	42.31	211.56	40.96	204.82	40.96	204.82	39.35	196.76
1800	40.55	202.75	39.02	195.11	39.57	197.87	38.11	190.53
2500	42.00	210.00	40.85	204.27	37.65	188.27	33.44	167.18
4000	43.50	217.49	42.52	212.59	40.00	199.98	35.02	175.12

Tablo 3.14 5.,6.,7 ve 8. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 1gr'lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	5.Durum		6.Durum		7.Durum		8.Durum	
Frekans (MHz)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)
200	55.94	250.17	89.80	401.60	70.68	316.07	59.12	264.39
300	32.61	145.82	48.36	216.27	42.36	189.45	35.54	158.94
500	33.73	150.84	41.11	183.85	37.68	168.53	36.52	163.31
900	37.60	168.17	40.04	179.07	38.52	172.27	34.30	153.40
1000	40.01	178.91	40.71	182.05	36.05	161.22	37.35	167.03
1800	34.74	155.36	34.75	155.40	37.79	168.99	34.73	155.33
2500	36.29	162.30	33.15	148.26	37.49	167.65	32.94	147.30
4000	42.70	190.95	34.07	152.38	33.36	149.21	33.70	150.73

Tablo 3.15 9. ve 10. Durumlar; küp şeklindeki her hangi 1 gr’lık doku ve tüm vücut için belirtilen sınırlara karşı düşen SAR değerlerini oluşturacak elektrik alan genlikleri

Gelen dalga yönü ve Polarizasyon	9.Durum		10.Durum	
Frekans (MHz)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	80 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)	2000 mW/kg için Elektrik Alan (V/m)
200	95.15	425.51	70.99	317.50
300	50.53	225.96	42.36	189.45
500	43.00	192.30	39.49	176.59
900	38.52	172.27	38.52	172.27
1000	42.27	189.05	39.25	175.53
1800	42.04	188.03	39.34	175.95
2500	32.35	144.70	33.99	152.02
4000	41.26	184.50	40.54	181.28

SONUÇLAR

Elektromagnetik alanlara maruz kalmanın sonucu olarak insan vücudundaki özgül soğurma oranının (SAR) bilinmesi insanlara zararlı etkilerin değerlendirilmesinde temel bir öneme sahiptir. Bu sebeple SAR hesabında kullanılan insan vücudunu ve onun anatomik özelliklerini ayrıntılarıyla modelleyen çok sayıda metot geliştirilmiştir. Elektromagnetik dalgalar için Maxwell denklemleri diferansiyel ve integral formunda çözülerek elektrik ve manyetik alanlar ve bunlardan faydalanarak SAR hesaplanır. Frekansa ve söz konusu vücut bölgesine göre, üç boyutlu geometrik şekil ve di elektrik özelliklere sahip, hemen hemen kesin, alt bölümler belirlenebilir.

Biyolojik dokularda belirlenen SAR değeri fiziksel değişimin sonucunda elde edilen bir büyüktür. Yani dokularda meydana gelebilecek kimyasal değişimler göz önüne alınmamaktadır. Bu yüzden, dokularda soğurulan elektromagnetik enerjinin meydana getirdiği fiziksel değişim ölçütünün limitlerde belirtilen sınır değerlerinin altında olması, onun tamamen zararsız olduğu anlamına gelmemelidir.

İnsan kafasından 1gr ve 10gr'lık doku bölgelerinden elde edilen maksimum SAR değerleri karşılaştırıldığı zaman; lokal doku bölgelerine indikçe SAR değerinin arttığı belirtilebilir. Yani, 1gr'lık dokular için elde edilen maksimum SAR değeri 10 gr'lık doku bölgelerinden elde edilen SAR değerlerinden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu da SAR'ın tanımı ile bire bir örtüşmektedir.

Tüm vücut için belirtilen sınır değeri olan 0.08W/kg sınır değeri göz önüne alındığında 1gr ve 10gr'lık doku bölgeleri için elde edilen maksimum SAR değerlerinin küçümsenemeyecek değerler olduğu sonucuna varırız.

Gelecek çalışmalarda tüm vücut için hesaplamalar yapılabilir. Isıl denklemler ile ısı dağılımı bulunmaya çalışılabilir. Birden çok elektromagnetik kaynağın ve modülasyonlu elektromagnetik işaretlerin etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **TS-ENV 50166-2**, 1996. İnsanların Elektromagnetik Alanlara Maruz Kalması-Yüksek Frekanslar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [2] **Paker, S., Yağcı, B., Pontioğlu, A.**, 2000. GSM Baz İstasyonlarının Elektromagnetik Alan Etkileri, *Kurs Notları*, İstanbul
- [3] **Yee, K.S.**, 1966. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations, *IEEE Trans. Antenna and Prop.*, Vol. 14, No.3, 302-307.
- [4] **Kunz, K.S., Luebbers, R.J.**,1993. Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, CRC Press, London.
- [5] **ICNIRP Guidelines**, 1998. ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic an Electromagnetic Fields (up to 300 GHz),*Health Physics*, Vol.74,No.4, 494-522.
- [6] **Akleman, F.** , 1998. Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi ve Yutucu Sınır Koşulları,*Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **İnce, S.**, 2001. FDTD Yöntemiyle İnsan Kafası Modelinde Elektromagnetik Etkilerin Belirlenmesi,*Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Sevgi, L.**, 1999. Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [9] **Başegmez, H.E.**, 2000. FDTD ve MoM Sayısal Yöntemleriyle Bazı Dizi Antenlerin Tasarımı,*Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Lin, C.J.**, 2001. Specific Absorption Rates Induced in Head Tissues by Microwave Radiation from Cell Phones, *Microwave Magazine*, 3, 22-25

- [11] **ANSI/IEEE C95.1-1992**, Standard for Human Exposure to Radio Frequency Fields Provides Guidelines for Maximum Permissible Exposure Limits.

ÖZGEÇMİŞ

Selçuk YILDIRIM 21 Mart 1977 tarihinde Zonguldak Ereğli’de doğmuştur. 1991 Zonguldak Ereğli Nimet İlköğretim okulunu, 1994 yılında Zonguldak Ereğli Lisesi’ni bitirmiştir. 1994 yılında Doğu Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği burslu olarak kazanmış ve 1999 yılında aynı bölümden mezun olmuştur. 1999 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Anabilim dalı Biyomedikal Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.