



## Farklı Mesafe ve Açılarda RF Yayılımına Maruz Kalan İnsan Kafasındaki Sıcaklık ve Özgül Soğurma Oranı Dağılımı

### Temperature and Specific Absorption Rate Distribution in the Human Head Exposed to RF Propagation at Different Distances and Angles

Fulya ÇALLIALP KUNTER\*<sup>1</sup>, Funda CIRIK ACIKAYA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34722 İSTANBUL;TURKEY

Başvuru/Received: 20/04/2017

Kabul/Accepted: 10/06/2017

Son Versiyon/Final Version: 15/06/2017

#### Öz

Bu makale, insan kafası içerisinde elde edilen özgül soğurma oranı (ÖSO) ve cep telefonlarındaki elektrik alan maruziyetinin sebep olduğu ısı etkileri sunmaktadır. 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında yayılım yapan cep telefonları mikrostrip patch anten ile modellenmiş ve çıkış güçleri olabilecek en kötü durum senaryosuna göre seçilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı COMSOL Multiphysics yazılım programı yardımıyla, kafa modelindeki ÖSO ve sıcaklık dağılımları üzerinde, sadece anten ile kafa modeli arasındaki mesafenin etkisi değil, aynı zamanda kafaya göre antenin açısının etkisi de incelenmiştir. Çalışmada gösterilmiştir ki, antenin kafaya göre mesafe ve açısının, kafadaki ÖSO değerleri ve sıcaklık artışında önemli bir etkisi vardır. Benzetim sonucunda, ÖSO değerlerinin 900 MHz’de güvenlik sınır değerlerinin altında iken 1800 MHz’de antenin kafadan olan uzaklığı 0,2 cm olduğunda sınır değerlerinin altında olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, kafadaki sıcaklık artışının diğer yapılan çalışmalarla oldukça uyumlu olduğu not edilmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

“Biyotermik Denklem, Elektromanyetik Alan Maruziyeti, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Özgül Soğurma Oranı”

#### Abstract

This paper presents specific absorption rate (SAR) obtained inside a human head and the thermal effects due to exposure to a cellular phone. The cellular phone radiating at 900 MHz and 1800 MHz frequencies was modeled by microstrip patch antenna and its output power was chosen according to the worst-case scenario. By the aid of finite element method (FEM) based COMSOL Multiphysics software program, not only the effect of distance between the antenna and the head model but also the effect of antenna’s angle relative to the head on SAR and the temperature distribution in the head model were investigated. It was shown in the study that the distance and the angle of the antenna to the head had significant importance on the SAR values and the temperature increase in the head. As a result of the simulation, it was found that SAR values at 900 MHz were under the safety limit values whereas at 1800 MHz were under the limits when the distance between the antenna and the head was 0.2 cm. Furthermore, it was noted that the temperature increase on the head was in good agreement with the other studies.

#### Key Words

“Bioheat Equation, Electromagnetic Field Exposure, Finite Element Method, Specific Absorption Rate.”

## 1. GİRİŞ

Günümüzde yaşadığımız konutlarda ve iş yerlerinde, modern haberleşme araçlarını oldukça sık kullanıyoruz. Mikrodalga frekanslarında çalışan telsiz bağlantılı haberleşme sistemleri, farklı çoklu medya içeriklerini iletmek üzere hızlıca geliştirilmeye devam etmektedir. Bütün bu donanımların ortak özellikleri iyonize olmayan ışınım kaynakları olmasıdır. İlerleyen teknoloji ile birlikte, bu kaynakların insan sağlığına olan etkisinin getireceği riskler de gündemi oldukça meşgul etmektedir.

İnsanlardan uzakta konumlandırılan baz istasyonlara kıyasla, cep telefonları insan vücuduna en yakın kullanılan elektromanyetik (EM) ışınım kaynaklarıdır. Özellikle genç nüfus arasında bu kadar yoğun kullanım, sağlık etkilerine ilgiyi arttırmaktadır. Bu nedenle ICNIRP (International Commite on Non- Ionising Radiation Protection) Uluslararası İyonlaştırılmayan Radyasyon Koruma Komitesi, WHO (World Health Organization) Dünya Sağlık Örgütü, IRPA (International Radiation Protection Association) Uluslararası Radyasyondan Koruma Kurulu başta olmak üzere birçok ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşlar, insan vücudunda EM ışımadan kaynaklı oluşabilecek ısı artışının sağlığa zararlı etkilere yol açmayacağı sınır değerleri yayınlamışlardır.

Telsiz haberleşmede kullanılan frekans aralığında biyolojik dokular, kayıplı dielektrik olarak düşünülebilir. Özgül soğurma oranı (ÖSO), biyolojik dokuların dielektrik özelliklerini ve indüklenen elektrik alanla ilgili bilgileri içerdiğinden, insan vücudundaki elektromanyetik alan (EMA) etkileşimini ölçen en önemli değişken olarak bilinir ve güvenlik yönetmelikleri de sınır değerlerini ÖSO ile verirler. Konuşma sırasında, cep telefonlarındaki ışınım, en çok insan kafasını etkilemektedir. Konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalarda, radyo vericilerinin insan kafasındaki ÖSO ve sıcaklık değişimleri deneysel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. 1978 yılında, çok yüksek frekansta çalışan taşınabilir radyo vericilerini helix anten ile modelleyerek, kafadaki sıcaklık dağılımları 0.010C duyarlılığa sahip sayısal termometre ile ölçülmüştür (Balzano vd.). Cleveland vd., ultra yüksek frekansta çalışan taşınabilir radyo vericilerine maruz kalan insan kafasındaki alanı, izotropik elektrik alan probu ile ölçüp ÖSO değerlerini matematiksel hesaplamalarla buldular. Teknoloji ilerlemeye başladıkça, analog cep telefonlarındaki radyo frekans vericilerine maruz kalan insan kafasındaki ÖSO değerleri ölçülmeye başlandı. Anderson vd., üç farklı cep telefonuna maruz kalan insan kafasındaki elektrik alan dağılımlarını, modelin içine yerleştirilebilen elektrik alan probu ile ölçmüştür. Çalışmada, farklı telefon modelleri ve farklı anten konumları için göz ve beyindeki ÖSO değerleri, ölçümleri alınan elektrik alan değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. 2014'te Atılğan vd., 900 MHz, 1800 MHz, 2450 MHz frekansları için ÖSO değerleri, elektrik alan değerleri sıcaklık artış miktarlarını hesaplamış, elektrik alanın nüfus eden deri kalınlıkları incelenmiştir. 2450 MHz için beklenen sıcaklık artışı gözlemlenememiş, çocuklar için farklı sonuçlar elde edilebileceğinden sınır değerlerinin çocuklar için ayrıca belirtilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, biyolojik dokulardaki EM dalga benzetimlerini yapabilmek ve gerçekçi doku modelleri için hesaplamalı sayısal teknikler kullanılmaya başlanmıştır. Çok sayıda sayısal yöntem olmakla birlikte, biyolojik doku çalışmalarında, kolaylığı ve etkin olmasından dolayı en çok kullanılan zaman düzleminde sonlu farklar (ZDSF) yöntemidir. Dimbylow vd., çalışmasında sırasıyla 600 MHz'den 3 GHz'e kadar frekans aralığı için beyin, kemik/yağ, kas, deri, kan, hava, göz dokusu, lens ve sklera bölümlerini katmanlarını içeren gerçekçi bir anatomik insan kafa modeliyle, yetişkin ve yeni doğan bebeklerin kafasındaki ÖSO değerlerini ZDSF yöntemiyle hesaplamışlar, 1993'te 900 MHz ve 1900MHz'deki ışınımın etkilerini yarım dalgaboylu dipol anten kullanarak, 1994'te ise 900 MHz ve 1800 MHz için çeyrek dalgaboylu monopol anten ile aynı çalışmayı tekrarlamışlardır. Bu çalışmalarda, telsiz haberleşme cihazları ile insan kafası arasındaki etkileşimin, anten tipi, dokunun elektriksel sabit değerleri, kafa modelinin geometrisi, cihazın konumu gibi çeşitli maruziyet durumlarına bağlı olduklarını göstermişlerdir.

1994 yılında, 835 MHz çalışma frekanslı cep telefonlarının sebep olduğu EM alan ışınımına maruz kalan insan kafasının homojen olmayan modeli için, ZDSF yöntemiyle akım ve ÖSO dağılımları hesaplanmıştır (Chen vd.). Cep telefonu dipol anten ile modellenen çalışmada, kafa modeli ise homojen olmayan dielektrik sabit ve iletkenlik ile 57 263 blok hücre ile modellenmiştir. Antenin kafadan 2 cm uzaklıkta konumlandırıldığı zaman güvenli bölge içerisinde olduğu görülmüştür. 1996 yılında ise aynı sayısal yöntem kullanılarak ve daha gerçekçi bir insan kafası modeli ve gerçekçi bir anten modeli ile çalışma tekrarlanmıştır. ¼ dalgaboylu monopol anten ve ½ dalgaboylu dipol anten kullanılarak ÖSO dağılımları arasındaki fark incelenmiş ve antenin kafadan uzaklıklarına göre benzetimleri yapılmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır (Watanabe vd.). 1999'da Wang vd., 900 MHz ve 1.5 GHz frekanslarında taşınabilir telefonlarını, dielektrik kaplı metal kutunun üzerine yerleştirilmiş çeyrek dalgaboylu monopol anten olarak modelleyerek, biyofiziksel denklemi ZDSF yöntemiyle çözerek kafadaki sıcaklık artışını ve ÖSO hesaplamalarını yapmıştır.

2000 yılında Hui vd., EM ışınımına maruz kalan insan kafa modelinde ZDSF yöntemini kullanarak ÖSO karakteristiğinin benzetimlerini farklı frekanslar için gerçekleştirdiler. Çalışmada; kafa modeli, homojen ve heterojen insan beyni ve göz yuvarlağı olmak üzere iki bölümde incelenerek ÖSO dağılımları verilmiştir. Nikita vd. ise 2000 yılında küresel katmanlı kafa modeli ile sonlu uzunluktaki bir dipol anten arasındaki etkileşimi incelemek amacıyla yardımcı kaynaklar methodu (MAS-method of auxiliary sources) ile Green fonksiyonu methodunun birleştirilmesini temel alan bir çalışma yayınlamıştır. ZDSF kod tabanlı SEMCAD adlı yazılım kullanılarak da kafadaki ÖSO dağılımı Ahma vd. tarafından hesaplanmıştır.

Lee vd., 2002 yılında 835 MHz ve 1765 MHz frekanslarında, Adel vd. 2010 yılında 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında, ÖSO karakteristiğinde kafa boyutunun etkilerini incelemiş ve daha büyük kafa boyutlarında daha düşük ÖSO değerleri tesbit

etmişlerdir. 2010'da, ZDSF yöntemiyle, farklı tip anten modellerinin (monopol, helix, patch ve PIFA antenleri) her birinin davranışını, kafadan olan uzaklıkla (0 – 20 mm) ilişkisi incelenmiştir (Rashed vd.).

ZDSF yöntemi, kolaylığı nedeniyle çok tercih edilmesine rağmen, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) diğer yöntemlere kıyasla elektrik ve manyetik alanların hesaplanmasında daha karmaşık geometri ve sınır koşullarında daha yakın yaklaşımlar sağlar. 2002 yılında SEY kullanılarak kafa modeli tek ve üç tabakalı olmak üzere modellenerek ÖSO değerleri hesaplanmıştır (Şeker vd.). Morega vd. 2010 yılında SEY kod tabanlı COMSOL yazılımı kullanılarak ÖSO'yu değerlendirmiş, kafadan olan uzaklık ve telefonun konumları değiştirilerek benzetimlerini yapmış ve kendi yaptıkları deneysel çalışmalarla sonuçları karşılaştırmıştır. Aynı yazılım kullanılarak; 2012'de Çitkaya vd. ve 2013'te Abdulrazzaq vd. 900 MHz ve 180 MHz frekanslarında uzaklığın etkisi dikkate alarak ÖSO'yu incelemiş ve sınır değerleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmaların sonucunda, kaynakla kafa arasındaki mesafe arttıkça ÖSO değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Nagarjuna vd. 2014'te monopol ve patch anten ile telefonu modelleyerek cep telefonuna maruz kalan insan kafasını laboratuvar ortamında ve SEY ile hesaplayarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Pšenáková vd. 2015'te 2.4 GHz frekansında radyo frekans yayınının insan kafasında yarattığı elektrik alan dağılımının modellemesini ve benzetimlerini yaptılar. 2016 yılında Raimondas vd., COMSOL yazılımıyla, 900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz mobil frekansları için cep telefonlarını 2W, 1W, 0.8 W, 0.25 W, 0.125W güçte yayımlayan yarım dalga boylu dipol antenlerle modelleyerek elektrik alan değerlerini ölçmüştür ve sonuç olarak en yüksek elektrik alan değerlerinin yüksek güç, daha büyük ÖSO değerleri ve düşük frekanslı cep telefonlarıyla ilişkilendirildiğini göstermişlerdir.

Goel vd. 2014 yılında SEY ile 900 MHz ve 1800 MHz için anten – kafa uzaklık ilişkisi incelemiştir. Stankovic vd. ise kafadaki cep telefonunun sebep olduğu elektrik alan dağılımı ve ÖSO değerlerini, SEY' i kullanarak iki farklı insan kafası modeli üzerinde hesapladılar. Birinci modelde, insan kafasındaki biyolojik dokuların EM parametreleri, verilen dokunun karakteristiğini tahmin eden hacimsel interpolasyon fonksiyonu ile modellenmiştir. İkinci modelde ise, deri, yağ dokusu, kaslar, iskelet ve beyin gibi insan kafasının parçaları katman olarak modellenmiştir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, farklı kafa modelleri, boyutları ve anten tipleri incelenmiştir. Yazarın cep telefonlarının göz üzerindeki etkilerini incelediği üç boyutlu ve axisimetrik çalışmalarıyla beraber kafa üzerindeki çalışmaları da burada sunulmuştur (Stankovic vd., Kunter vd.). Bu makalenin amacı, kafadaki ÖSO ve sıcaklık değişimlerinin, günlük hayatımızda kullandığımız cep telefonlarının kafaya olan mesafe ve tutuş açısı ile nasıl değiştiğini irdelemektir. Bu çalışmada, ZDSF yönteminden daha doğru sonuçlar veren, düzgün olmayan sınır değerleri için de uygulanabilen, üç ve çok boyutlu problemlerde üçgenlerle kısıtlanmayan eğri yüzeyleri de tahmin edebilen SEY kullanılmıştır. Çalışma frekansları 900 MHz ve 1800 MHz olan cep telefonları mikrostrip patch anten ile modellenerek ve SEY kod tabanlı COMSOL yazılım programı ile insan kafasının içindeki ÖSO ve sıcaklık değişimlerinin benzetimleri yapılmıştır. Benzetimlerde kullanılan doku parametrelerinin ve sayısal değerlerinin, karşılaştırma yapılacak çalışmalarla aynı seçilmesine özen gösterilmiştir.

## 2. TEORİK BİLGİ

Biyolojik doku EM dalga ışınımına maruz kaldığında, dalga dokuya nüfuz eder ve dalga enerjisinin bir kısmı dokunun içinde soğrulur. İçerideki enerjiyle birlikte sıcaklık artar ve sonuç olarak ısısal enerji yayılır. Bu ısısal artış etkisinin ölçüsü, ÖSO, birim ağırlık başına EM enerjinin soğrulma oranı olarak tanımlanır (W/kg). ÖSO, Denklem 1'de verildiği gibi, insan vücudundaki elektrik alan şiddeti E (V/m), biyolojik dokunun elektriksel iletkenliği  $\sigma$  (S/m) ve kütle yoğunluğu  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) ile hesaplanır.

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

ÖSO'nun hesaplanması sadece, EM enerjinin dokuya girme derinliği 1 cm veya daha fazla olduğu 100 kHz ve 6-10 GHz frekans aralıkları için anlamlıdır (Hirata vd.).

Biyolojik doku tarafından yutulan enerji termal enerjiye dönüşür ve bu dönüşüm dokularda sıcaklık artışına sebep olur. Biyolojik dokulardaki ısı transferinin ve sıcaklık oluşumunun analizini yapmak kullanılan biyolojik ısı transfer denklemi aşağıdaki gibidir (Bernardi vd.).

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \nabla(k \nabla T) + \rho C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (2)$$

Burada,  $\rho$  doku yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),  $k$  ısı iletkenlik katsayısı (W/m.K),  $C_b$  özgül ısı kapasitesi (J/kg.K),  $Q_{met}$  metabolizmik ısı (W/m<sup>3</sup>),  $Q_{ext}$  dışarıdan gelen ısı (W/m<sup>3</sup>),  $\omega_b$  kan akım oranı (1/s),  $Q_{ext}$  dışarıdan gelen ısı (W/m<sup>3</sup>) terimi soğrulan EM güce eşittir.

Biyolojik dokuların karakteristiklerini tanımlayabilmek için gerçek dokulara yakın modeller yaratmak önemlidir. Gerçek biyolojik dokular homojen ve doğrusal değildir. İnsan vücudu çok çeşitli organlardan oluşmuş olsa da, her bir organ veya doku, modelleme işlemlerinde, maruz kalınan frekans değerlerine göre homojen ve doğrusal olan uygun EM parametreleriyle tanımlanabilir. 900 MHz ve 1800 MHz frekans değerleri için kafadaki kan dokusu ve beyin için parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** İnsan kafa dokularının EM özellikleri.

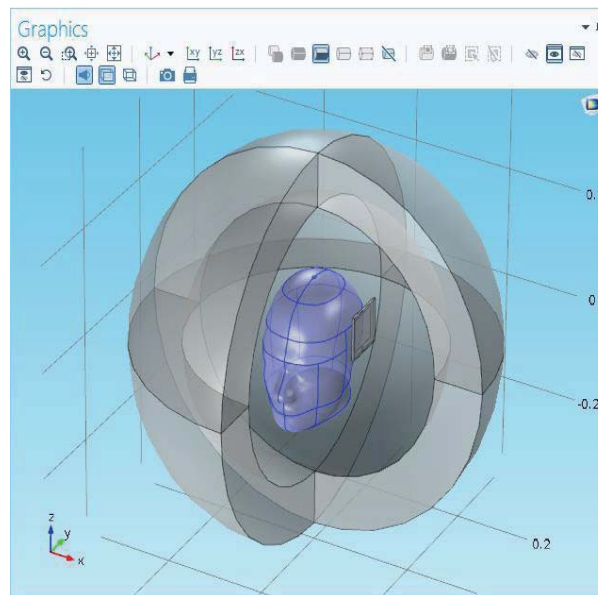
Parametre	900 MHz	1800 MHz
Beyin dokusunun geçirgenliği	52,72	50,08
Beyin dokusunun iletkenliği [S/m]	0,94	1,39
Beyin dokusunun yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]	1030	1030
Kanın ısı kapasitesi [J/(kg*K)]	3639	3639
Kanın yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	1000

Yapılan çalışmalarda elde edilen bulgulara göre (Nikita vd.) vücut dokusunda bir derece sıcaklık artışının meydana gelebilmesi için kilogram doku başına 4 W EM güç yutulumu gereklidir. ICNIRP temel sınır değer olarak 24 saat yaşanan, insanların bulunduğu yerler için 0.08 W/kg ÖSO değeri, günün belirli saatlerinde bulunulan iş yerleri gibi yerler için ise 0.4 W/kg ÖSO değeri olarak düzenlenmiştir (ICNIRP Guidelines). Elektrik alan cinsinden sınır değerler ise, 900 MHz ve 1800 MHz GSM sistemleri için sırasıyla, 42 V/m ve 59 V/m (güç yoğunluğu olarak 4.5 W/m<sup>2</sup> ve 9 W/m<sup>2</sup>) olarak belirlenmiştir (ICNIRP Guidelines).

### 3. İNSAN KAFASININ VE ANTENİN SAYISAL MODELİ

Standartlarda verilen ÖSO sınır değerleri, radyo frekansına maruz kalan özgül insan benzeri bir model (SAM, Specific Anthropomorphic Mannequin) kullanılarak verilmiştir (Faruque vd., Al-Mously vd., Beard vd.). Geometrisi ve doku özellikleriyle, maruziyet değerlendirmelerinde yetişkin kafa modeli olarak korunumlu bir yaklaşım sağlar. SAM, 20 yaş üzeri Amerikan askerlerinin yüzde 90'ı baz alınarak yapılmıştır. Kafa homojen bir iç yapısına sahiptir ve içine, gerçek insan kafa sıvısıyla aynı fiziksel özellikte sıvı konularak modellenebilmektedir.

SEY tabanlı COMSOL yazılımında oldukça önemli olan doğru bir geometrinin seçilmesi oldukça önemli olmasından dolayı, bu çalışmada, IEEE, ICNIRP ve WHO'nun yayınladığı sınır değerlerinde kullanılan Şekil 1'de de gösterilen SAM kafa modeli kullanılmıştır (ICNIRP Guidelines, IEEE Standard, WHO Fact Sheet). Sonuçların literatür ve standartlarla karşılaştırılabilmesi için doku dielektrik parametreleri de standartlarda verildiği gibi kullanılmıştır.

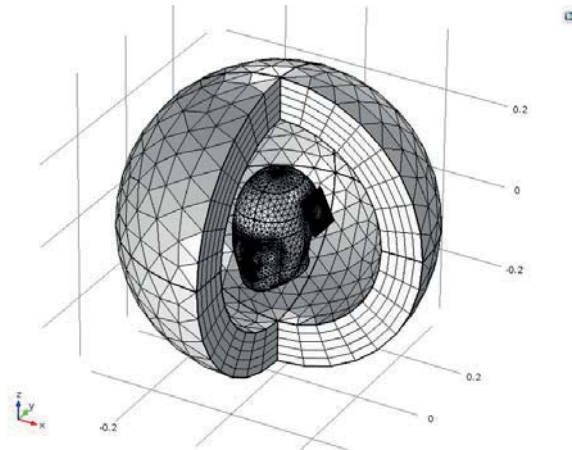


### Şekil 1. SAM ve anten modeli.

Serbest uzayda yarım dalgaboylu dipol veya metal kutunun üzerine yerleştirilmiş çeyrek dalgaboylu monopol gibi basitleştirilmiş telefon antenleri, literatürde oldukça sık kullanılmıştır. Bu antenler günümüzde cep telefonlarında kullanılmadığı için insan kafasındaki etkilerini tartışmak uygun olmayacaktır. Günümüzde daha çok PIFA, helix, ve patch antenler kullanılmaktadır. Mikrostrip patch antenler, ucuz olmaları, boyut olara küçük ve hafif olmaları, düşük güç kapasiteli, geliştirilmiş sistem güvenilirliği, büyük ölçekli üretimi olmasından dolayı önemli avantajları vardır. Bu avantajlarından dolayı çalışmamızda, cep telefonu modeli olarak mikrostrip patch anten seçilmiştir.

900 MHz ve 1800 MHz GSM frekanslarında gerçekleştirilen benzetimlerde, antenin çıkış güçleri, IEEE C95.3 standartında en kötü durum için belirtilen 1 W olarak alınmıştır (IEEE Standard). Çalışmada, elle tutularak konuşulan cep telefonlarının kafaya olan mesafe ve tutuş açısı ile ÖSO ve sıcaklık değişimlerine etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Her bir benzetim, mikrostrip patch anteni farklı uzaklık ve farklı açılarda yerleştirilerek tekrar edilmiştir. Benzetim sonuçlarında insan kafa dokusunda EM dalga maruziyeti sonucu oluşan sıcaklık değişimlerini ve ÖSO GSM frekansları için elde edilmiş, literatürdeki benzer çalışmalar ve uluslararası sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Benzetimi yapılan Şekil 1’ de verilen kafa ve anten modelinin SEY örüntüsü Şekil 2’ deki gibi oluşturulmuş, benzetim örüntülü model üzerinde yapılmıştır. Mikrostrip patch anteninin tasarımı yapılarak kafanın sol tarafına minimum uzaklıkta yerleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, SAM kafa modeli 19 alt alandan, anten ise 20 alt ana bölümden oluşurken kafayı çevreleyen hava da hesaba katılarak tekli veya çoklu soğurmalarla göre o da alt ana bölümlerden oluşturulmuştur.



Şekil 2. SAM ve anten modelinin SEY örüntüsü.

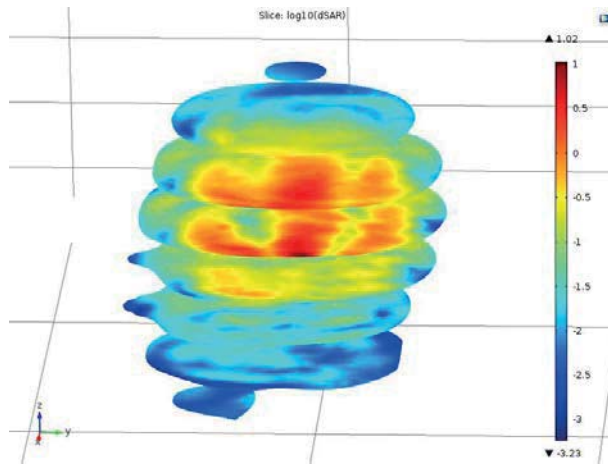
## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geometrilerin hazırlanması, parametrelerin yazılıma girilmesi, sınırların ve alt ana bölümlerin belirlenmesiyle modelleme adımları sonlu elemanlar tabanlı yazılımda tamamlandıktan sonra benzetimlere başlanmıştır.

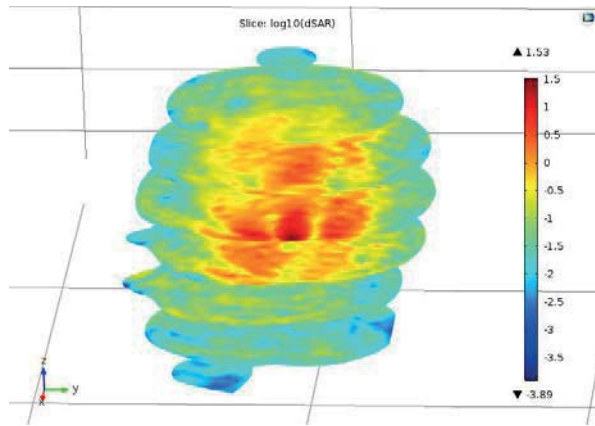
### 4.1. ÖSO Benzetimleri

Benzetimlerin ilk aşaması, 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında EM alana maruz kalan insan kafa modelindeki ÖSO dağılımıdır. Şekil 3 ve Şekil 4’te sırasıyla 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında en kötü durum için 1 W anten gücü kullanılarak ve antenin kafadan 0.5 cm mesafe ve sıfır derece açı ile tutulduğu varsayılarak benzetimlerin sonuçları verilmiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4’te bar ile gösterilen renkler en düşük değerden en yüksek değere göre logaritmik ÖSO değerlerini gösteriyor olup, kafa dilimli model üzerinde renklerle değerleri belirtilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre anten ile kafanın arasındaki mesafe 0.5 cm ve 00 tutuş açısı ile 900 MHz’de en yüksek logaritmik ÖSO değeri 1.02 W/kg; 1800 MHz’de 1.53 W/kg’ dir. Önceki raporlarla uyum içinde olan sonuçlara göre dokudaki en yüksek ÖSO değerinin antenin modele en yakın olduğu bölgede, kafa yüzeyinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 900 MHz’de kafada oluşan yerel ÖSO’nun log-ölçekte dilimli gösterimi.



Şekil 4. 1800 MHz’de kafada oluşan yerel ÖSO’nun log-ölçekte dilimli gösterimi.

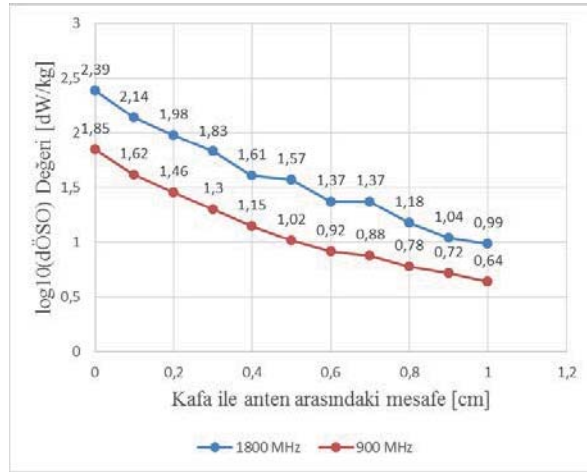
ÖSO benzetimleri, 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında antenin kafaya olan mesafesi 0 cm - 1cm aralığında değişirken, Şekil 5 ve Şekil 6’da sırasıyla 0 derece ve 10 derece tutuş açıları için verilmiştir. Benzetimlerden görüleceği gibi 1800 MHz’de 900 MHz’e göre daha fazla güç soğrulmaktadır. Benzetim sonuçları literatürde yapılan diğer çalışmalarla uyum içerisinde olup mesafe ile ÖSO değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Her iki frekans için en yüksek değerler, beklenildiği gibi antenin kafaya en yakın olduğu kafa yüzeyinde oluşmuştur. Benzetimlerde, ÖSO değerinin açı ile de ters orantılı olduğunu, açı arttıkça değerlerin azaldığı tespit edilmiştir.

#### 4.2. Sıcaklık etkisi

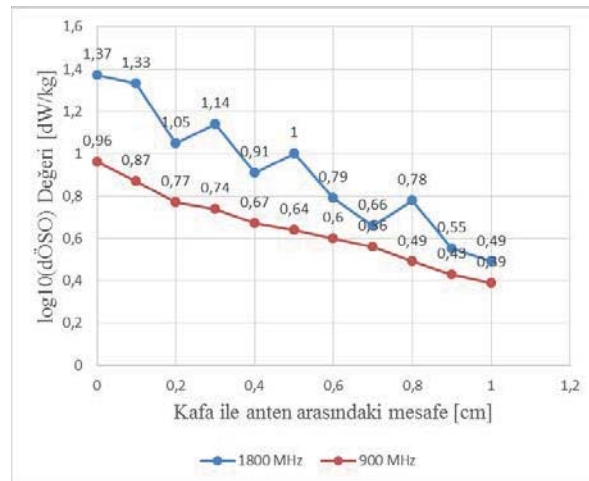
Cep telefonundan insan kafasına doğru olan elektrik alanın dağılımı aynı zamanda dielektrik ısınmadır. Bunun nedeni, elektrik alanın, insan kafasındaki farklı doku ve organlardan güç yoğunluğuyla orantılı uzaklığa nüfuz edebilme olasılığının olmasıdır (Stankovic vd.). Cep telefonundaki elektromanyetik yayınının kafa yüzeyinde Şekil 7 ve Şekil 8’de görüldüğü gibi sıcaklık artışını etkiler.

Radyo frekansındaki maruziyete bağlı kafadaki sıcaklık artışı, ÖSO’nun benzetim sonuçları başlangıç değerleri olarak kullanılarak biyosis denkleminin çözülmesiyle elde edilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8’de sırasıyla anten ile kafa arasındaki mesafe 0.5 cm, açı sıfır iken 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarında kafanın içindeki sıcaklık değişimlerinin benzetimleri verilmiştir.

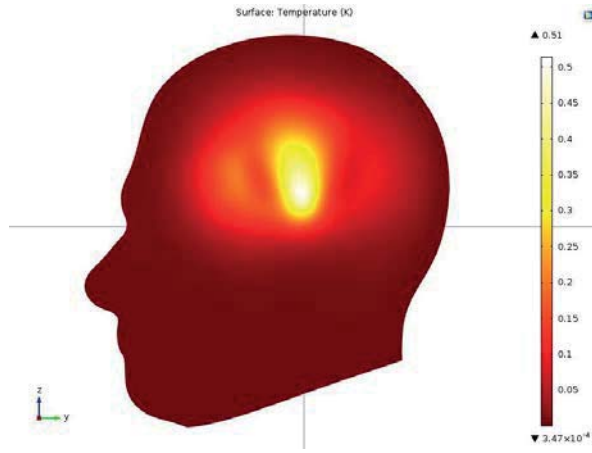
Benzetim sonuçlarından da açıkça görüleceği gibi sol tarafa yerleştirilen cep telefonu modelinin kafada oluşturduğu sıcaklık değişimleri kafaya en yakın olan konumda en yüksek değerlere sabittir.



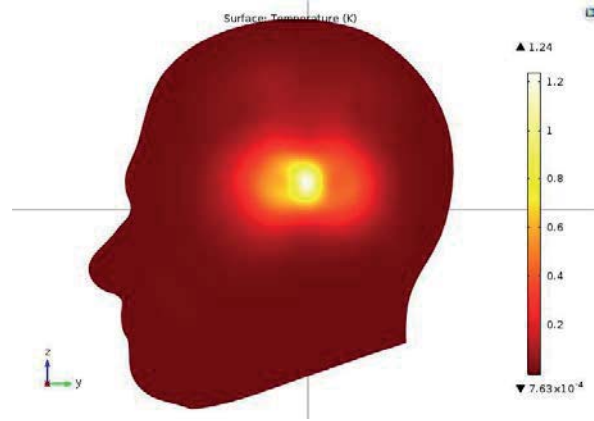
Şekil 5. 0 derecede değişen mesafeye göre ÖSO değerleri.



Şekil 6. 10 derecede değişen mesafeye göre ÖSO değerleri



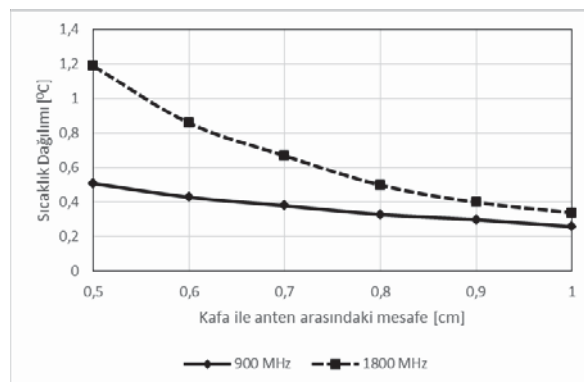
Şekil 7. 900 MHz'de kafada oluşan sıcaklık dağılımı.



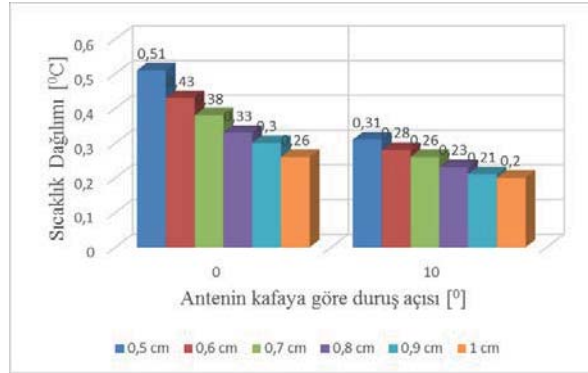
Şekil 8. 1800 MHz'de kafada oluşan sıcaklık dağılımı.

Kafa ile anten arasındaki mesafe 0.5 cm ile 1 cm arasında 1 mm aralıklarla değiştirilerek 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarındaki sıcaklık dağılımlarının benzetim sonucu Şekil 9' da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, sıcaklık, cep telefonundan yayılan elektromanyetik kaynağındaki uzaklık ile birlikte azalmaktadır. Anten kafadan 0.5 cm uzaklıkta iken 0 derece tutuş açısı ile kafa yüzeyinde oluşan en yüksek sıcaklık değeri sırasıyla 900 MHz için 0,510 C, 1800 MHz için 1.190 C; 1 cm uzaklıkta iken sıcaklık değerleri sırasıyla 0,260 C ve 0,340 C' ye düşmektedir.

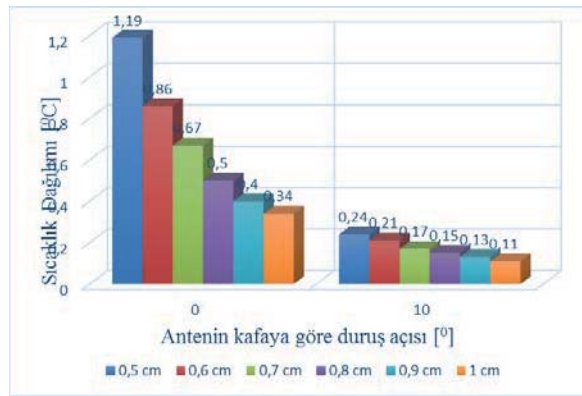
Frekansların açı ve uzaklık ile ilişkilerini irdelemek için sırasıyla 900 MHz ve 1800 MHz için Şekil 10 ve Şekil 11'de, sıcaklık dağılımlarının 0 derece ve 10 derece anten pozisyonlarında uzaklıkla değişimleri verilmiştir. Şekil 12'de ayrıca insan kafasındaki sıcaklık dağılımının üç boyutlu benzetimi gösterilmektedir.



Şekil 9. 900 MHz ve 1800 MHz frekansları için insan kafasındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 10. 900 MHz'de 00 ve 100 açılar için mesafeye göre sıcaklık dağılımı.

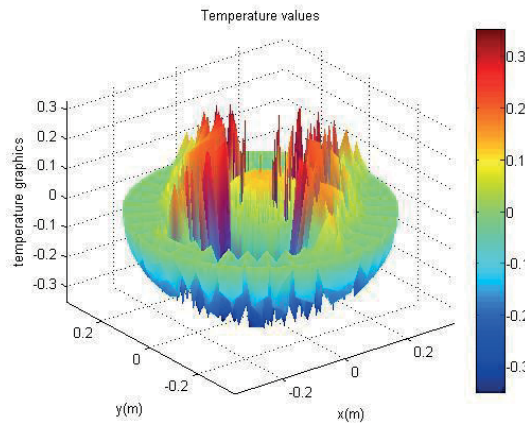


Şekil 11. 1800 MHz'de 00 ve 100 açılar için mesafeye göre sıcaklık dağılımı.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı, cep telefonlarının insan kafasında sebep olduğu sıcaklık artışı ve ÖSO dağılımları, farklı mesafe ve tutuş açılarına göre değerlendirilerek raporlamaktır. Bunu gerçekleyebilmek için cep telefonu, mikrostrip patch anten ile, insan kafası da çeşitli dokuların düzgün dağılımlı dielektrik özelliklerine sahip SAM adı verilen ile sayısal küre modeli ile örneklendirilmiştir.

900 MHz ve 1800 MHz'de yayınım yapan mikrostrip antenin kafadan olan uzaklığı 5 mm ile 10 mm, tutuş pozisyonu 00 ile 100 arasında değişirken ÖSO hesaplamaları yapılmıştır. Ortaya çıkan sıcaklık artışı, biyosı denkleminin sonlu elemanlar çözümü ile tahmin edilmiştir. Farklı mesafe ve açılarla tekrarları yapılan benzetim sonuçlarının diğer çalışmalarla uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



### Şekil 12. Maruz kalan insan kafasının üç boyutlu sıcaklık dağılımı.

IEEE'nin 3 kHz – 300 GHz frekans aralıklarındaki maruziyetinde belirlemiş olduğu dokunun 10 gramı için güvenlik seviyesi 2 W/kg olarak verilmiştir (IEEE Standard). Anten ve kafa arasındaki mesafe 0 – 1 cm iken kafada indüklenen maksimum ÖSO değerleri 1800 MHz için 2.39 – 0.99 W/kg, 900 MHz için 1.85 – 0.64 W/kg aralığında bulunmuştur. Yüksek çıkan ÖSO değerlerinin sebebinin olası en kötü durum için anten güçlerinin 1 W olarak alınması olduğunu not ederek, 1800 MHz için güvenlik değerinin altında kalan 1,98 W/kg ÖSO değerinin anten kafadan 0,2 cm uzaklıkta iken olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan benzetimlerde açıkça görüldüğü gibi maksimum ÖSO değerleri kafanın yüzeyinde oluşmaktadır.

Cep telefonlarından yayılan elektromanyetik alanın kafada yaratmış olduğu sıcaklık dağılımları benzetimlerinde, antenin kafadan uzaklaştığı zaman sıcaklık değerlerinin her iki frekansta da düştüğü görülmüştür. Benzetim sonuçlarında sadece uzaklık değil aynı zamanda antenin tutuş açısının da önemli olduğu kanıtlanmıştır. Anten ile kafanın arasındaki mesafe 0,5 cm iken, 900 MHz frekansı için antenin kafayla yaptığı açı 0 derecede iken 0,510 C 10 derecede iken 0,310 C'de, 1800 MHz'de ise sırasıyla 1,190 C ve 0,240 C olarak tesbit edilmiştir. Makalenin son çalışmasında, kafa içerisinde oluşan sıcaklık değerleri 900 MHz'de 2 cm ve 0 derece ile tekrarlandığında maximum sıcaklık değerinin 0,170 C'ye kadar düştüğü tesbit edilerek uzaklığın önemi bir kez daha gösterilmiştir.

Sonuçlar göstermektedirki, maksimum soğrulan enerji kafanın yüzeyinde oluşur, açı arttıkça elektromanyetik alanın kafaya nüfuz etmesi azalır ve yayınım kaynağından uzaklaştıkça ÖSO ve sıcaklık değerleri azalmaktadır. İleriki çalışma, homojen olmayan insan kafa modellerini kullanarak kafa içindeki dokuların etkileşimlerini incelemek olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, FEN-A-120514-0157 proje kodu ile Marmara Üniversitesi araştırma fonundan desteklenmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

Abdulrazzaq, S.A., Aziz, J.S., “SAR Simulation in Human Head Exposed to RF Signals and Safety Precautions”, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 3 (9), 334-340, 2013.

Adel, Z. El Dein, Amr, A., Specific Absorption Rate (SAR) Induced in Human Heads of Various Sizes When Using a Mobile Phone, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010, Londra- İngiltere, 30 Haziran – 2 Temmuz, 2010.

Ae-kyoung, L., Hyung-do, C., Hyung-soo L., Jeong-ki, P., “Human Head Size and SAR Characteristics for Handset Exposure”, *ETRI Journal*, 24 (2), 2002.

Ahmad, L., Ibrani, M., Hamiti, E., Computation of SAR Distribution in a Human Exposed to Mobile Phone Electromagnetic Fields, Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS Proceedings, Xi'an-Çin, 1580–1582, 22-26 Mart 2010.

Anderson, V., Joyner, K.H., “Specific Absorption Rate Levels Measured in a Phantom Head Exposed to Radio Frequency Transmissions from Analog Hand-held Mobile Phones”, *Bioelectromagnetics*, 16, 60-69, 1995.

Atılğan, E., Karadana, Y., Çömlekçi, S., “Wi- Fi Haberleşmede İnsan Kafası Modelinde SAR Değerinin Hesaplanması ve Ölçüm Çalışması”, *Süleyman Demirel University Journal of Technical Sciences*, 4 (1), 13-18, 2014.

Balzano, Q., Garay, O., Steel, F.R., “Heating of Biological Tissue in the Induction Field of VHF Portable Radio Transmitters”, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, VT-27, 51-56, 1978.

Buckus, R., Strukcinskiene, B., Raistenskis, J., Stukas, R., “Modelling and Assessment of the Electric Field Strength Caused by Mobile Phone to the Human Head”, *Vojnosanit Pregled Journal*, 73 (6), 538-543, 2016.

Chen, H., Wang, H., “Current and SAR Induced in a Human Head Model by the Electromagnetic Fields ICradiated from a cellular Phone”, *IEEE Transaction on Microwave Theory Technology*, 42 (12), 2249 – 2254, 1994.

Citkaya, A.Y., Seker, S.S., FEM modeling of SAR distribution and temperature increase in human brain from RF exposure, International Journal of Communication System 2012, 25, 1450–1464, 2012.

Cleveland, R.F., Athey, T.W., “Specific Absorption Rate (SAR) in Models of the Human Head Exposed to Hand-held UHF Portable Radios”, *Bioelectromagnetics*, IO, 173-186, 1989.

- Dimbylow, P.J., Gandhi, O.P., "Finite Difference Time Domain Calculations of SAR in a Realistic Heterogeneous Model of the Head for Plane-wave Exposure from 600 MHz to 3GHz", *Physics in Medicine and Biology*, 36 (8), 1075-1089, 1991.
- Dimbylow P.J., "FDTD Calculations of the SAR for a Dipole Closely Coupled to the Head at 900 MHz and 1.9 GHz", *Physics in Medicine and Biology*, 38, 361-368, 1993.
- Dimbylow P.J., "SAR Calculations in an Anatomically Realistic Model of the Head for Mobile Communication Transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz", *Physics in Medicine and Biology*, 39, 1537- 1553, 1994.
- Goel, A., Richa A., "Evaluating the Effect of Distance on Specific Absorption Rate Values inside a Human Head Model", *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 12 (1), 186-189, 2014.
- Hirata, A., Fujiwara, O., "The Correlation Between Mass-Averaged SAR and Temperature Elevation in the Human Head Model Exposed to RF Near-Fields from 1 to 6 GHz", *Physics in Medicine and Biology*, 54, 7227-7238, 2009.
- Hui, H., Shu, L., Fanqing, Z., "Characteristic of the SAR Distribution in Homogeneous Phantom Exposed to Electromagnetic Field Radiated Hand- Held Portable Telephones", IEEE 5th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2000, Beijing – Çin, 664 – 667, 15-18 Ağustos 2000.
- ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, 74, 494-522, 1998.
- IEEE, IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 khz to 300 GHz, IEEE Standard C95.1, 2005.
- Kunter, F.Ç., Şeker, S.S., "3D Web-Splines Solution to Human Eye Heat Distribution Using Bioheat Equation", *Engineering Analysis in Boundary Elements*, 35, 639-646, 2011.
- Kunter, F.Ç., Şeker, S.S., "Radially Symmetric Weighted Extended B-spline Model", *Applied Mathematics in Computation*, 217, 10305-10316, 2011.
- Morega, M., Marinescu, A., Mobile phone SAR analysis through experimental and numerical simulation, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010.
- Nagarjuna, M.C., Shailaja, K., "Three- Dimensional Modeling for Heat Transfer in the Human Brain, While Subjected to Mobile Phone Radiation, *IJREAT International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 2 (3), 2320 – 8791, 2014.
- Nikita, K.S., Stamatakos, G.S., Uzunoglu, N.K., Karafotias, A., "Analysis of the Interaction Between a Layered Spherical Human Head Model and a Finite Length Dipole, *IEEE Transaction on Microwave Theory Technology*, 48 (11), 2003-2012, 2000.
- Psenakova, Z., Smondrk, M., Benova, M., Modelling and Simulation of the Electric Field Strength Distribution in a Human Head Model by 2,4 GHz Radio Frequency Radiation, 23rd Annual Conference Proceedings, Prag-Çek Cumhuriyeti, 50- 60, 2015.
- Rashed, M., Faruque, I., Islam, M.T., Misran, N., "SAR Analysis in Human Head Tissues for Different Types of Antennas, *World Applied Sciences Journal* 11, 1089-1096, 2010.
- Stanković V., Jovanovic, D., Krstić, D., Cvetković, N., Electric Field Distribution and SAR in Human Head From Mobile Phones, The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, May 7-9, Bucharest, Romania, 2015.
- Şeker, S.S., Demirbilek, B.O., Morgül, A., SAR Assessment in a Human Head Model Exposed to Radiation from Mobile Phone Using FEM, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2002, Mineapolis-Amerika, 851- 855, 19-23 Ağustos, 2002.
- Wang, J, Fujiwara, O., "FDTD Computation of Temperature Rise in the Human Head for Portable Telephones", *IEEE Transaction on Microwave Theory Technology*, 47 (8), 1528–1534, 1999.
- Watanabe, S., Taki, M., Nojima, T., Fujiwara, O., "Characteristics of the SAR Distributions in a Head Exposed to Electromagnetic Fields Radiated by a Hand-held Portable Radio", *IEEE Transaction on Microwave Theory Technology*, 44 (10), 1874 – 1883, 1996.

WHO, World Health Organizations Fact Sheet No.193, “Electromagnetic Fields and Public Health, Mobile Telephones and Their Base Stations”, 2000.