



**GÜNLÜK YAŞAM ALANLARINDAKİ YÜKSEK FREKANSLI ELEKTROMANYETİK ALANLARIN İNCELENMESİ VE MARUZİYET ANALİZİ**

**INVESTIGATION OF HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN DAILY LIVING AREAS AND EXPOSURE ANALYSIS**

**Eda YAVUZ DİRİK<sup>\*1</sup>** **Kayhan ATEŞ<sup>2,4</sup>** **Niyazi İL<sup>3</sup>** **Şükrü ÖZEN<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Kastamonu Valiliği, Kastamonu, Türkiye

<sup>2</sup> Telecommunications and Remote Sensing Laboratory, Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Pavia, Pavia, Italy

<sup>3</sup> TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Antalya Şubesi, Antalya, Türkiye

<sup>4</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

**ABSTRACT**

As the use of electronic devices increases nowadays, studies on electromagnetic fields (EMF) and their potential effects have gained momentum. In this study, the electromagnetic environment has been investigated concerning the high-frequency region for daily living areas. Accordingly, the specific absorption rates (SAR) induced in biological tissues by electrical devices used in homes and offices were determined at different distances, and measurements were carried out for high-frequency fields. Electromagnetic simulations were performed using the CST Studio Suite program, which operates based on the finite integration technique (FIT). Exposure analysis was conducted using an anatomical voxel family with realistic electrical properties. As a result of the calculations, the highest SAR value was obtained as 0.198 W/kg in the eye bulb and lens of the child model. According to the measurement results, the highest electric field value was measured as 13.55 V/m in the microwave oven. Results were evaluated in light of international standards, and possible precautions to protect against these fields were proposed.

**Keywords:** Electromagnetic Dosimetry, Electromagnetic Field Exposure, Measurement and Simulation, Model Analysis, Specific Absorption Rate (SAR)

**ÖZET**

Günümüzde giderek artan elektronik cihazların kullanımına paralel olarak, elektromanyetik alanlara (EMA) ve bunların potansiyel etkilerine dair yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada elektromanyetik çevre, günlük yaşam alanları için yüksek frekans bölgesine göre incelenmiştir. Bu doğrultuda, ev ve ofislerde kullanılan elektrikli cihazların farklı mesafelerde biyolojik dokularda indüklediği özgül soğurma oranları (ÖSO) belirlenmiş ve yüksek frekanslı alanlar için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik benzetimler, sonlu integrasyon tekniği (SİT) temelli çalışan CST Studio Suite programıyla yapılmıştır. Maruziyet analizi ise gerçekçi elektriksel özelliklerle anatomik vöksel ailesi kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda en yüksek ÖSO değeri çocuk (7 yaş, kadın) modelindeki göz ampülü ve göz lensinde 0,198 W/kg olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre en yüksek elektrik alan değeri, 13,55 V/m ile mikrodalga fırında ölçülmüştür. Sonuçlar, uluslararası standartlar ışığında değerlendirilmiştir ve söz konusu alanlardan korunmak için olası önlemler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Elektromanyetik Alan Maruziyeti, Elektromanyetik Dozimetri, Model Analizi, Özgül Soğurma Oranı (ÖSO), Ölçüm ve Benzetim

\*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: edda\_yavvuz@hotmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
15.05.2024	27.06.2024	27.06.2024	30.06.2024

## 1. GİRİŞ

Günlük hayatta elektrik enerjisinin kullanımının artması, bireysel ve çevresel kaynaklardan yayılan elektromanyetik alanların oluşmasına ve etkilerinin incelenmesine sebep olmaktadır [1, 2]. Söz konusu alanlara kontrolsüz bir şekilde maruziyet, araştırmacılar tarafından ele alınan konulardan birisidir [3]. Özellikle Covid-19 pandemisinden sonra hücrel haberleşme frekanslarında çalışan cihazların çocuklar ve gençler tarafından kullanımı artmıştır [4]. Bu yüzden geçmiş yıllarda gerçekleştirilen elektromanyetik maruziyet çalışmalarının güncellenmesi ve yeni nesil sistemler için tekrar ele alınması büyük öneme sahiptir.

Elektromanyetik alanların literatürde farklı kullanım alanları olmasına rağmen istenmeyen etkilerinden korunmak için uluslararası standartlar yayınlanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün de (DSÖ) belirttiği Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) ve Elektrik ve Elektronik Mühendisler Enstitüsü'nün (IEEE) uluslararası standartları bulunmaktadır [5, 6]. Uluslararası standartlar, insanları aşırı maruziyetten korumak için sınır değerleri belirlemekte ve bu sınırların gerekçelerini sunmaktadır. Yüksek frekans bölgesi için bu standartlarda, dokuda indüklenen özgül soğurma oranı (ÖSO) limit değerleri belirtilmektedir. Genel halkın maruziyeti için ÖSO sınırı hem ICNIRP hem de IEEE tarafından 2 W/kg olarak belirlenmiştir. Maruziyet limitlerinin belirlenmesinde kaynak frekansı ve etkileşim senaryosu (bölgesel veya tüm vücut maruziyeti) önemlidir. IEEE, ortalama doku modelindeki ÖSO'nun hesaplanmasına yönelik bir rehber sunmaktadır ve bölgesel maruziyet için 10 gr dokudaki ÖSO'yu incelemektedir.

Yüksek frekanslı elektromanyetik maruziyet ve etkileriyle ilgili olarak literatürde son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Güneş vd. tarafından 2021 yılında yapılan çalışma, elektromanyetik radyasyonun farklı frekanslardaki (900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz) genotoksik etkilerini *Drosophila melanogaster* üzerinde incelemektedir [7]. Araştırma, cep telefonları ve baz istasyonları gibi cihazlar tarafından yayılan radyasyonun çevre ve insan sağlığı üzerindeki ciddi endişeleri belirtmektedir. *Drosophila melanogaster*, genetik toksikoloji çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir model organizmadır, çünkü genomu insan hastalıklarında tanımlanan genlere oldukça benzerdir. Çalışma boyunca, *Drosophila* larvaları günlük iki, dört ve altı saatlik maruziyet sürelerinde iki gün boyunca elektromanyetik alanlara maruz bırakılmıştır ve bunun sonucunda genel klon parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, 1800 MHz'de altı saatlik uygulama dışında mutant klon sayısının negatif kontrol grubuna göre istatistiksel olarak arttığı gözlemlenmiştir. 2019 yılında Özen ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada ise, elektromanyetik dalgaların endüstriyel mikrodalga kaynaklarından yayılan etkileri incelenmiştir [8]. Araştırma, elektromanyetik dalgaların dokularda oluşturduğu ÖSO değerlerini analiz etmektedir. Çalışmada, çok katmanlı doku modeli kullanılarak 915 MHz ve 2450 MHz frekansları için elektrik alanın doku içindeki değişimi incelenmiştir. Analitik çözümlerden elde edilen verilere göre, deri dokusuna nüfuz eden elektrik alanın 2450 MHz frekansında daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. Pennes biyofizik denklemi kullanılarak dokuda meydana gelen sıcaklık artışının hesaplanması da araştırmanın odak noktalarından birisidir. Özellikle deri dokusunda indüklenen güç yoğunluğu ve ÖSO üzerinde detaylı analizler yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, endüstriyel mikrodalga kaynaklarına maruz kalan çalışanların elektromanyetik risklerinin değerlendirilmesinde önemlidir. Elektromanyetik dalgalara maruziyetin insan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkilere karşı korunma önlemleri geliştirmek için yapılan bu tür analizler, endüstriyel güvenlik standartlarının belirlenmesinde ve çalışanların sağlığının korunmasında kritik bir rol oynamaktadır. 2019'da yapılan diğer bir çalışma, kablosuz haberleşme sistemlerinin insan vücut modelleri üzerindeki etkilerini araştırmaktadır [9]. Çalışma, özellikle metalik ortopedik implantların vücutta bulunduğu durumda elektromanyetik alanlara maruziyetin nasıl değiştiğini incelemektedir. Buna göre, insan vücudunun elektriksel özellikleri dikkate alınarak bir model oluşturulmuş ve dokuda indüklenen ÖSO incelenmiştir. Benzetimler sırasında 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekansları için ICNIRP tarafından belirlenen elektromanyetik ışıma limitleri göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, implantlı kolda ÖSO değerlerinin 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında implantlı olmayan modele göre arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, frekansın azalmasıyla ÖSO farkının da azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, metalik ortopedik implantların elektromanyetik alanlara maruziyet üzerindeki etkilerini anlamak açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir. 2022 yılında Abdul-AI ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, elektromanyetik alanların biyolojik

ortamdaki davranışı ele alınmıştır [10]. Bunun yanında, 1978 ile 2021 yılları arasında ÖSO'yu değerlendirmede kullanılan en yaygın teknikler de frekans spektrumu, bant genişliği ve ÖSO değerleri bakımından özetlenmiştir. Elektromanyetik alanların, indüklenen akımlar ve dielektrik kayıplardan kaynaklanan ısı üretimi sonucunda biyolojik ortamla etkileşimi açıklanmıştır. Makalede, modelleme ve ölçümler bakımından daha önce yayınlanmış araştırmaların detaylı incelemesi ve çeşitli güvenlik standartlarına dayanarak elektromanyetik maruziyet tehlikeleri ele alınmıştır. 2018 yılında yapılan farklı bir araştırmada ise, kablosuz vücut alanı ağı uygulamaları için ISM bandının 5,8 GHz frekansında çalışan bir yama anten, farklı senaryolardaki kafa modellerinde oluşturduğu dozimetrik etkileri açısından incelenmiştir [11]. Tasarlanan anten, küresel şekilli insan kafası fantomunda 0,206 W/kg ile en yüksek ÖSO'ya sebep olmuşken, kübik şekilli insan kafası fantomunda ise 0,166 W/Kg ile en düşük ÖSO indüklemiştir. Kübik fantomlu senaryoda 6,46 dBi, küresel fantomlu senaryoda ise 6,2 dBi kazanç elde edilmiştir. 2017 yılında yapılan farklı bir çalışmada, insan kafa modelinin GSM-850 frekans bandında cep telefonu kullanımına göre dozimetri analizi araştırılmıştır [12]. Biyolojik dokular tarafından soğrulan enerji miktarını gösteren ÖSO, doku özellikleri ve frekans gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Yapılan çalışma, gerçekçi doku özelliklerine sahip çok katmanlı bir küre kafa modelini ele alan sonlu elemanlar yöntemine dayalı benzetimler içermektedir. Sonuçlara göre deri ve beyin omurilik sıvısında en yüksek ÖSO hesaplanmıştır. Ayrıca kafa modelinde belirgin bir sıcaklık artışı da gözlemlenmiştir. Çalışma, özellikle kafadaki hassas bölgelerde indüklenen elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmanın önemini vurgulamaktadır.

Literatüre bakıldığında, elektromanyetik alanlara maruziyet ile ilgili farklı frekans bölgelerinde çalışmalar bulunmaktadır [13-19]. Ancak, gelişen teknoloji ile ev ve işyerlerinde artan cihaz yoğunluğuna bağlı yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alan (EMA) kaynaklarını inceleyen ve bu kaynaklara maruz kalan kadın, çocuk, hamileler ve çalışanlara ilişkin elektromanyetik (EM) risk analizini birlikte ele alan kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların Covid-19 pandemisi sonrası dönem için yeni nesil teknolojik cihazların elektromanyetik risk analizi açısından güncellenmesi önemlidir. Bu çalışmada; günlük yaşam alanlarımızı çevreleyen çeşitli elektronik cihazların ve bunların yakın çevresinde oluşturdukları EMA seviyeleri belirlenerek yüksek frekans bölgesi için güncel veriler birlikte ele alınmış; çocuk, kadın, hamile ve çalışanlar için EMA dozimetri analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı anatomik modellerde indüklenen ÖSO; yaş gruplarına, doku özelliklerine, etkileşim durumundaki cihazın çalışma frekansına ve uzaklık gibi parametrelere bağlı olarak analiz edilerek sunulmuştur. Çalışma şu şekilde planlanmıştır: Öncelikle bu çalışmanın temel aldığı yöntem ve teorik bilgi açıklanmıştır. Ardından, elde edilen deneysel ölçüm sonuçları ve elektromanyetik dozimetri benzetimleri belirtilmiştir. Son olarak, uluslararası standartlar ışığında ölçüm ve benzetim sonuçları değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Elektromanyetik Dalgaların Biyolojik Dokularla Etkileşimi ve Elektromanyetik Benzetim Modeli

Elektronik cihazların kullanımı sırasında, biyolojik dokular EMA'nın bir kısmını emer. Bu emilen enerji nedeniyle dokuda indüklenen elektrik alan ve ÖSO, Maxwell denklemleri yardımıyla belirlenebilir. Bu çalışmada, farklı cihazlar tarafından yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alanlara maruz kalan vokal ailesi üyelerinin 10 gr ortalama dokularındaki ÖSO dağılımı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için CST Studio Suite yazılımı altındaki zaman düzlemi çözücüsü kullanılmıştır. CST Studio Suite altındaki zaman düzlemi çözücüsü, Maxwell denklemlerinin integral formunu kullanan sonlu integrasyon tekniğine (SİT) göre benzetimleri gerçekleştirmektedir [20, 21]. Çalışmadaki problem uzayı, CST Studio Suite programında "open-add space" olarak adlandırılan sınır koşulları için tanımlanmıştır [22]. Benzetimlerde, vokal tabanlı gerçekçi anatomik modeller kullanılmıştır.

EMA'nın doku tarafından soğurulması, EMA parametrelerine ek olarak dokuların dielektrik özelliklerine de bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan dokuların dielektrik özellikleri literatürden alınmıştır [23].

Biyolojik dokuyla yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar etkileşime girdiğinde, dalga enerjisi doku tarafından emilir [24]. Bu emilim süreci, ÖSO olarak adlandırılan bir parametre ile karakterize edilir.

ÖSO, elektromanyetik dalga enerjisinin birim kütleye düşen miktarını ifade eder ve aşağıdaki denklemlerle tanımlanır:

$$\text{ÖSO} = \frac{\sigma}{\rho} |\mathbf{E}|^2 \quad (1)$$

denklemden  $|\mathbf{E}|$  dokuda indüklenen elektrik alanının büyüklüğünü (V/m),  $\sigma$  dokunun elektriksel iletkenliğini (S/m) ve  $\rho$  ise dokunun kütle yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) ifade eder.

Doku içindeki elektrik alanının genliğinin yüzeydeki asıl değerinin %37'sine (yaklaşık olarak  $1/e$ ) düştüğü noktaya "deri kalınlığı" denir [22]. Bu kalınlık, elektromanyetik dalganın dokudaki davranışı açısından önemlidir ve aşağıdaki şekilde incelenir:

$$\delta = \left( \frac{67.52}{f} \right) \left[ \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} - \epsilon' \right]^{-1/2} \quad (2)$$

bu denklemden  $f$ , frekansın MHz cinsinden değeridir.  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  ise sırasıyla karmaşık dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısımlarıdır.

İncelenecek elektromanyetik maruziyet modeli için, literatürde belirtildiği üzere [25, 26] aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır: Problem senaryosu üç boyutlu olarak modellenmiştir ve biyolojik dokular doğrudan elektromanyetik dalgalar tarafından etkilenmiştir. Ayrıca, dokuların dielektrik özellikleri homojen olarak kabul edilmiştir. Bu varsayımlar, elektromanyetik maruziyet modelinin oluşturulması ve sonuçların elde edilmesinde kullanılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Elektromanyetik Alan Ölçümleri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen elektrik alan ölçümleri ICNIRP'nin belirlemiş olduğu 6 dakikalık maruziyet senaryosu referans alınarak 3 cm, 30 cm ve 1 m olmak üzere farklı mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Narda Broadband Field Meter NBM-550 marka cihaz ve uygun prob ile yapılmıştır.

Söz konusu ölçüm sonuçları, Tablo 1'de ortalama değer olarak sunulmuştur. Boş ortamın elektrik alan değeri 0,02 V/m olarak kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları arasından en yüksek elektrik alan değeri 3 cm uzaklıkta mikro dalga fırın cihazından 13,55 V/m, en düşük elektrik alan değeri ise 1 m uzaklıkta cep telefonundan 0,05 V/m olarak kaydedilmiştir. Tablet ve cep telefonunda sırasıyla 3 cm için 1,32 V/m ve 0,12 V/m ölçülmüştür. Aynı cihazların 30 cm için ölçüm sonuçları sırasıyla 0,32 V/m ve 0,35 V/m'dir. Modemin yaymış olduğu elektrik alan ise 3 cm uzaklıkta 1,6 V/m, 30 cm uzaklıkta 0,48 V/m ve 1 m uzaklıkta ise 0,28 V/m'dir.

**Tablo 1.** Yüksek frekansta ışıma yapan cihazların çeşitli uzaklıklardaki elektrik alan ölçüm sonuçları (V/m)

Elektrikli Cihaz	3 cm Uzaklık	30 cm Uzaklık	1 m Uzaklık
Boş Ortam	0,02	0,02	0,02
Mikrodalga Fırın	13,55	11,73	2,24
Masaüstü Bilgisayar	0,86	0,35	0,17
Tablet	1,32	0,32	0,12
Modem	1,6	0,48	0,28
Cep Telefonu	0,12	0,07	0,05
Laptop	0,73	0,35	0,28

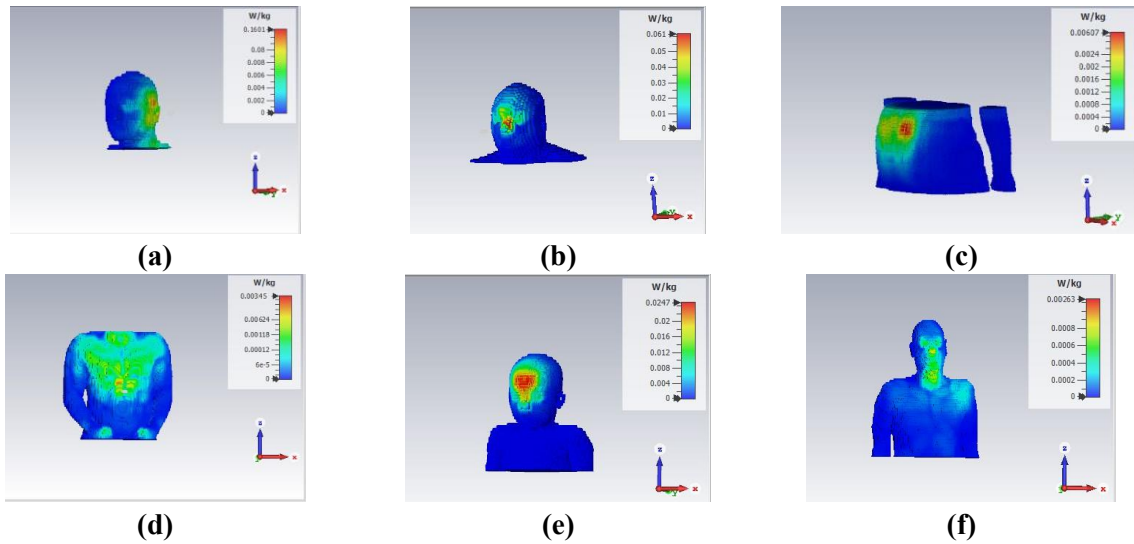
#### 3.2. Yüksek Frekans Bölgesi EMA Maruziyet Analizleri

Maruziyet analizleri kapsamında gerçekleştirilen iyonize olmayan dozimetri benzetimleri, CST Studio Suite ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı cinsiyet ve yaşlardaki anatomik voksel modellerde elektromanyetik kaynakların dokuda indüklediği elektrik alan ve ÖSO hesaplanmıştır. Anatomik model olarak CST Studio Suite kütüphanesindeki çocuk, hamile kadın, yetişkin kadın, yetişkin erkek ve fetüs

modelleri incelenmiştir [20]. Modellerdeki biyolojik dokuların dielektrik özellikleri ise, daha önceki bölümlerde açıklandığı şekilde literatürdeki gerçekçi değerlere göre referans alınmıştır. Elektromanyetik kaynak olarak 0,5 W güç ile beslenen ve cep telefonu için 1800 MHz, tablet için 2400 MHz ve mikrodalga fırın için 2450 MHz'de ışıma yapan elektromanyetik dalga kaynakları kullanılmıştır ve anatomik modellere belirli uzaklıklarda konumlandırılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler esnasında elektromanyetik kaynakların anatomik voksellerden uzaklığı, günlük hayattaki cihazların kullanımına göre ele alınmıştır.

Benzetimler sonucunda, 10 gr ortalama doku için ÖSO dağılımları elde edilmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1.a'da kadın (40 yaş) modelinden 1 cm uzaklıkta 1800 MHz'de ışıma yapan kaynak sonucu oluşan ÖSO dağılımı gösterilmiştir. Burada, en yüksek olarak 0,16 W/kg hesaplanmıştır. Şekil 1.b'de ise ortalama erkek yetişkin modelinin yüz bölgesinden 3 cm uzaklıktaki 1800 MHz'deki ÖSO dağılımı sunulmuştur ve en yüksek değer olarak yüz bölgesinin orta kısmında yaklaşık 0,06 W/kg elde edilmiştir. Şekil 1.c'de ise kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) modelinden 30 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı sunulmuştur. Burada, 2400 MHz'deki en yüksek ÖSO 6 mW/kg olarak elde edilmiştir. Şekil 1.d'de 2400 MHz'deki ÖSO dağılımı erkek (38 yaş, şişman) modeli için 30 cm uzaklıkta en fazla 0,03 mW/kg olarak gözlenmiştir. Şekil 1.e'de gösterildiği üzere çocuk (7 yaş, kadın) modelinden 3 cm uzaklıkta ÖSO dağılımı yaklaşık 0,02 W/kg olarak hesaplanmıştır. Şekil 1.f'de erkek (38 yaş) modelinden 1 m uzaklıkta ÖSO dağılımı, 2450 MHz için en fazla 3 mW/kg olarak elde edilmiştir.

Anatomik modellerin farklı frekanslardaki konuma bağlı ÖSO değerleri Tablo 2'de verilmiştir. ÖSO; yaş gruplarına, doku özelliklerine, etkileşim durumundaki cihazın çalışma frekansına ve konuma göre değişkenlik göstermiştir. Ayrıca ÖSO değerlerinin ICNIRP'nin belirlemiş olduğu sınır değerlerin altında olduğu görülmüştür. Aynı modelde ve ilgilenilen bölgede uzaklıklar sabit tutulduğunda frekans arttıkça ÖSO değeri için doğrusal bir yorum yapılamamıştır. Çocuk (7 yaş, kadın) modelinin göz bölgesinde kaynakla model arası uzaklık 30 cm iken frekans arttıkça ÖSO değerinin arttığı belirlenmiştir. Kulak bölgesinde ise aynı senaryoda azalma gözlenmiştir. Farklı modellerin aynı bölgelerinde indüklenen ÖSO, aynı frekans ve elektromanyetik kaynak uzaklığı için değişkenlik göstermektedir. En yüksek ÖSO, bebek (8 haftalık, kadın) modelinden 1 cm uzaklıkta 1800 MHz frekansta kulak bölgesinde 0,182 W/kg olarak elde edilmiştir. En düşük ÖSO ise 2400 MHz'de ortalama erkek yetişkin modelinin kulak bölgesinde 1 m uzaklıkta 0,0012 W/kg olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 1.** (a) 1800 MHz frekansında kadın (40 yaş) modelinden 1 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; (b) 1800 MHz frekansında ortalama erkek yetişkin modelinden 3 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; (c) 2400 MHz frekansında kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) modelinden 30 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; (d) 2400 MHz frekansında erkek (38 yaş, şişman) modelinden 30 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; (e) 2450 MHz frekansında çocuk (7 yaş, kadın) modelinden 3 cm uzaklıktaki ÖSO dağılımı; (f) 2450 MHz frekansında erkek (38 yaş) modelinden 1 m uzaklıktaki ÖSO dağılımı



**Tablo 2.** Model-konum ilişkisine göre farklı frekanslardaki ÖSO değerleri (W/kg)

Model-Konum	1800 MHz			2400 MHz			2450 MHz	
	1 cm	3 cm	30 cm	3 cm	30 cm	1 m	30 cm	1 m
Bebek (8 haftalık, kadın) - Kulak	0,182	-	-	-	0,0558	-	-	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - Kulak	0,174	-	-	-	0,0495	0,00213	0,00502	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - El	-	-	-	-	0,0214	-	-	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - Göz	-	-	0,0075	0,113	0,0131	0,00159	0,0247	-
Çocuk (7 yaş, kadın) - Kalp	0,168	0,065	-	-	-	-	0,0232	0,003
Kadın (40 yaş) - Kulak	0,16	-	-	-	-	-	-	-
Kadın (26 yaş, şişman) - Kalp	-	-	-	-	0,00426	-	-	-
Kadın (26 yaş, şişman) - Gövde	-	-	0,004	-	-	0,00137	-	-
Erkek (38 yaş) - Göz	-	0,051	-	-	-	0,00198	-	0,0026
Erkek (38 yaş, şişman) - Kalp	-	-	0,0035	-	-	-	-	-
Kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) - Gövde	-	-	-	-	0,00607	-	0,00877	-
Kadın (43 yaş, zayıf) - Göz	-	0,062	-	0,072	-	0,00199	-	0,0028
Ortalama Erkek Yetişkin - Kulak	0,159	0,042	0,005	0,069	0,00871	0,0012	-	-
Ortalama Erkek Yetişkin - Göz	-	0,061	0,006	0,0652	0,00607	-	-	-
Ortalama Erkek Yetişkin - Kalp	-	0,041	0,003	-	0,00455	0,0014	-	0,0022

Tablo 3'te, ortalama erkek yetişkin ve çocuk (7 yaş, kadın) modellerinin kafa bölgesinde 1800 MHz ve 2400 MHz frekanslarında farklı uzaklıklardaki ve dokulardaki ÖSO benzetim sonuçları sunulmuştur. Burada, yetişkin erkek model ile çocuk (7 yaş, kadın) modelindeki aynı doku ve frekanslarda ÖSO dağılımı karşılaştırılmıştır. Her modelde ve ilgilenilen dokuda, elektromanyetik kaynaktan uzaklaştıkça ÖSO değerinin düştüğü gözlenmiştir. Frekansa bağlı doğrusal bir yorum yapılamamıştır. En yüksek ÖSO, yetişkin erkek modelindeki beyincik dokusunda 2400 MHz frekansında 1 cm kaynak uzaklığında elde edilmiştir ve yaklaşık 0,977 W/kg olarak hesaplanmıştır. En düşük ÖSO ise yine aynı model ve dokuda kaynaktan 30 cm uzaklıkta 1800 MHz'de 2,5 mW/kg olarak hesaplanmıştır. Sonuçların ICNIRP'nin belirlemiş olduğu sınır değerlerinin altında olduğu görülmüştür.

Tablo 4, fetüs modelindeki farklı dokularda indüklenen 2400 MHz'deki ÖSO benzetim sonuçlarını göstermektedir. Burada, Şekil 1.c'de belirtilen hamile modelin fetüse farklı uzaklıklarda tablet kullandığı senaryoya göre benzetimler gerçekleştirilmiştir. Dokuda indüklenen ÖSO uzaklığa, dokuların elektriksel iletkenliğine ve doku tarafından soğurulan EMA'nın frekansında bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. En yüksek ÖSO değeri, uzuv-bacak bölgesinde 0,0375 W/kg olarak hesaplanmıştır. En düşük olarak 1 m uzaklıkta göz modelinde yaklaşık 0,021 mW/kg olarak elde edilmiştir. Tablo 4'te belirtilen değerlerin, ICNIRP'nin belirlemiş olduğu limitlerin altında olduğu görülmüştür. Hamile kadınların karın bölgesinin yüksek su içermesi nedeniyle, fetüs dokularının da dielektrik özellikleri

yetişkinlere göre değişkenlik göstermektedir [27]. Bu kapsamda fetüslerde yetişkinlere kıyasla aynı dokularda farklı ÖSO hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** Ortalama erkek yetişkin ve çocuk (7 yaş, kadın) modelinde farklı frekanslardaki dokuların uzaklığa göre ÖSO benzetim sonuçları (W/kg)

Maruziyet Modeli		Kan	Beyin	Göz Ampülü	Göz Lensi	Beyincik	Deri	
Ortalama Erkek Yetişkin	1 cm	1800 MHz	0,148	0,151	0,158	0,157	0,078	0,155
		2400 MHz	0,155	0,167	0,171	0,171	0,977	0,168
	3 cm	1800 MHz	0,0574	0,0581	0,0617	0,0619	0,0348	0,0585
		2400 MHz	0,0401	0,0407	0,069	0,069	0,0183	0,0421
	30 cm	1800 MHz	0,00488	0,00495	0,00512	0,00517	0,00251	0,00503
		2400 MHz	0,00554	0,00648	0,00870	0,0869	0,00416	0,00815
Çocuk (7 yaş, kadın)	1 cm	1800 MHz	0,165	0,171	0,172	0,174	0,098	0,171
		2400 MHz	0,169	0,176	0,198	0,198	0,12	0,187
	3 cm	1800 MHz	0,0581	0,0593	0,0664	0,0666	0,0367	0,0611
		2400 MHz	0,081	0,085	0,113	0,114	0,0503	0,092
	30 cm	1800 MHz	0,00496	0,0051	0,00744	0,00745	0,00301	0,00535
		2400 MHz	0,0391	0,0399	0,0502	0,0502	0,0216	0,0409

**Tablo 4.** Fetüs modelindeki farklı dokuların 2400 MHz’de uzaklığa göre ÖSO benzetimleri (W/kg)

Doku	3 cm	30 cm	1 m
Kafatası	0,0294	0,00120	0,00041
Deri	0,035	0,00135	0,00055
Gövde	0,0289	0,00117	0,00039
Uzuv-Kol	0,036	0,00135	0,00053
Uzuv-Bacak	0,0375	0,00140	0,00056
Beyin	0,0225	0,00097	0,000035
Göz	0,0157	0,00081	0,000021
Akciğer	0,0331	0,00130	0,00049
Kalp	0,0299	0,00129	0,00043
Karaciğer	0,0232	0,00102	0,000038

Tablo 5, 3 cm uzaklıktaki farklı cihazlardan yayılan EMA'nın farklı modellerin kafa bölgesinde indüklediği elektrik alan ( $|E|$ ) ve ÖSO'yu belirtmektedir. Aynı zamanda benzetimler sonucu elde edilen ÖSO ile ölçümler sonucu kaydedilen elektrik alanın ilişkilendirilmesi sonucunda deneysel ÖSO tahmini yapılmıştır. Eşitlik 1'de belirtildiği üzere ÖSO, elektrik alanın genliğinin karesi ile orantılıdır. Tabloda belirtilen her modelin beyin bölgesinde indüklenen elektrik alan ile ölçümler sonucu elde edilen elektrik alan, kareleriyle doğru orantılı bir şekilde ÖSO ile ilişkilendirilmiştir. Buna göre en yüksek ÖSO ilişkisi, 32,7 mW/kg için çocuk (7 yaş, kadın) modelinin mikrodalga fırına maruziyeti sonucu oluşması öngörülmektedir. Ayrıca, en düşük olarak ortalama erkek yetişkin modelinin ilişkisi elde edilmiştir ve 0,77  $\mu$ W/kg olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Çeşitli cihazların yaydığı EMA'nın farklı modellerin kafa bölgesinde indüklediği  $|E|$ , ÖSO ve gerçek ölçümlerle olan doğru orantılı ilişkileri

Maruziyet Modeli		Çocuk (7 yaş, kadın)	Kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile)	Ortalama Erkek Yetişkin
Cep Telefonu (1800 MHz)	$ E $ (V/m) (Benzetim)	12,37	21,2	27,86
	ÖSO (mW/kg) (Benzetim)	75,5	62,2	41,7
	$ E $ (V/m) (Ölçüm)	0,12	0,12	0,12
	ÖSO (mW/kg) (İlişki)	0,000711	0,00199	0,00077
Tablet (2400 MHz)	$ E $ (V/m) (Benzetim)	23,45	34,51	39,8
	ÖSO (mW/kg) (Benzetim)	113	72	69
	$ E $ (V/m) (Ölçüm)	1,32	1,32	1,32
	ÖSO (mW/kg) (İlişki)	0,358	0,1053	0,0759
Mikrodalga Fırın (2450 MHz)	$ E $ (V/m) (Benzetim)	25,81	37,03	44,05
	ÖSO (mW/kg) (Benzetim)	119	74	71
	$ E $ (V/m) (Ölçüm)	13,55	13,55	13,55
	ÖSO (mW/kg) (İlişki)	32,7	9,9	6,71



#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, günlük yaşam alanlarında bulunan cihazların sebep olduğu yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alanlar incelenmiştir ve maruziyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çeşitli frekanslarda EMA yayan cihazların elektrik alan ölçümleri yapılmıştır. Elektromanyetik dozimetri analizleri için voksel tabanlı anatomik modeller yardımıyla ÖSO değerleri hesaplanmıştır. İncelemelerde 1800 MHz'de ışıma yapan kaynağın cep telefonuna, 2400 MHz'de çalışan kaynağın tablete ve 2450 MHz'de çalışan kaynağın da mikrodalga fırına karşılık geldiği kabul edilmiştir.

Ölçüm sonuçlarına göre en yüksek elektrik alan, mikrodalga fırın tarafından yayılmaktadır. Tüm cihazlarda beklendiği üzere uzaklık arttıkça alan seviyesi doğrusal olmayan bir şekilde azalmıştır. Ölçüm sonuçları, uluslararası standartların yayınladığı limitlerin altında elde edilmiştir.

Yüksek frekans bölgesindeki ÖSO benzetim sonuçları, olası senaryolar baz alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilerin karşılaştırılması ile ÖSO'nun yaş gruplarına, doku özelliklerine, etkileşim durumundaki cihazın çalışma frekansına, uzaklığa bağlı konumuna göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanında ÖSO'nun uzaklık ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Benzetimler sırasında dokuda indüklenen elektrik alan, Tablo 5'te verilmiştir. Benzetimler sonucu elde edilen ÖSO'dan yararlanarak, 3 cm uzaklıkta ölçümü gerçekleştirilen cihazların elektrik alan değerlerinin kareleri sayesinde yeni ÖSO değerleri elde edilmiştir. Bu sayede, gerçek değerler ile benzetim sonuçları ilişkilendirilmiştir. Hesaplamalarda çocuk (7 yaş, kadın), hamile kadın (43 yaş, 24 haftalık hamile) ve ortalama erkek yetişkin modeli ele alınmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki 3 cm uzaklıkta ölçülen elektrik alana göre elde edilen ÖSO değerleri, ICNIRP'nin halk maruziyeti ve mesleki maruziyet için belirlemiş olduğu limitlerin altındadır.

Sonuçlara göre, elektromanyetik çevreden çocukların yetişkinlere kıyasla daha fazla etkilenebilecekleri gözlemlenmiştir. Bu durum, çocukların vücut yapılarının küçük olması ile açıklanabilir. Elde edilen veriler ışığında çocukların kafataslarının yetişkinlere göre daha ince olması nedeniyle EMA'nın çocukların beyin bölgesine daha kolay ulaştığı gözlemlenmiştir. Çocuk dokularındaki yüksek su içeriği sayesinde dielektrik özelliklerinin yetişkinlere kıyasla yüksek olması, ÖSO'yu arttıran bir sebep olmakla birlikte EMA'dan dolayı doku modelinin rezonansa girmesi de aynı şekilde ÖSO'yu arttırmaktadır.

Günlük yaşam alanlarındaki elektromanyetik çevrenin ilerleyen zamanlarda farklı cihazlardan kaynaklı olarak daha fazla yoğunlaşacağı kabul edilmektedir. Elektronik cihazlardan yayılan alanların etkilerini en düşük düzeyde tutmak için bireylerin kendi imkanları doğrultusunda alabilecekleri önlemler son derece önemlidir. Bunlardan bazıları, kablosuz internet özelliği olan dizüstü bilgisayar kullanıldığında veya açık tutulduğunda, söz konusu cihaz bir anten görevi görerek etraftaki tüm EMA'yı toplar. Kablosuz internet kullanılmadığında bilgisayarların ilgili özelliği kapatılabilir. Cep telefonu ile konuşmayı olabildiğince kısa tutmak ve konuşurken belirli aralıklarla telefonun konumunu değiştirmek önerilebilir. Mikrodalga fırın çalışırken olabildiğince uzak mesafede durmaya dikkat edilmelidir. İlerleyen çalışmalarda, biyolojik dokuya farklı açılarda gelen EMA'nın etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır.

#### 5. REFERANSLAR

- [1] K. Ates, S. Ozen, and H.F. Carlak, Finite Element Method Based Simulations of the Magnetic Fields Around the Overhead Transmission Line and Its Dosimetric Analysis, 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). 642-645, 2019.
- [2] Ş. Özen, E. Uskun and O. Çerezci, Üniversite Öğrencileri Arasında Cep Telefonu Kullanımı ve Elektromanyetik Kirlilik Üzerine Bir Çalışma, Sakarya University Journal of Science. 6 (2), 153-159, 2002.
- [3] E. Katirci, E. Kirimlioglu, A.O. Oflamaz, E. Hidisoglu, A. Cernomorcenço, P. Yargıçoğlu, S. Ozen and N. Demir, Expression Levels of TAM Receptors and Ligands in the Testes of Rats Exposed to Short and Middle-Term 2100 MHz Radiofrequency Radiation. Bioelectromagnetics. 45 (5), 235-248, 2024.

- 
- [4] B.M. Girela-Serrano, A.D.V. Spiers, L. Rutong, S. Gangadia, M. B. Toledano and M. Di Simplicio, Impact of Mobile Phones and Wireless Devices Use on Children And Adolescents' Mental Health: A Systematic Review, *European Child & Adolescent Psychiatry*, 33, 1621-1651, 2024.
- [5] ICNIRP, Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz To 100 kHz), *Health Phys.* 99 (6), 818-836, 2010.
- [6] IEEE C95.1-2019 Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz, 2019.
- [7] M. Gunes, K. Ates, B. Yalcin, S. Akkurt, S. Ozen and B. Kaya, An Evaluation of the Genotoxic Effects of Electromagnetic Radiation at 90 MHz, 1800 MHz, and 2100 MHz Frequencies with a SMART Assay in *Drosophila melanogaster*, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 40 (2), 254-263, 2021.
- [8] Ş. Özen, T. Aydoğmuş, H.F. Carlak and K. Ateş, Endüstriyel Mikrodalga Kaynaklara Maruz Kalan Çalışanlar İçin Elektromanyetik Risk Analizi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 7 (3), 467-472, 2019.
- [9] L. N. Özdinc Polat, Ş. Özen, K. Ateş and H. İ. Keskin, Investigation of the Exposure to Electromagnetic Fields in the Body with Metallic Orthopedic Implant. 2019 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO'19). 434-437, 2019.
- [10] M. Abdul-Al, A. S.I. Amar, I. Elfegani, R. Littlehales, N.O. Parchin, Y. Al-Yasir, C.H. See, D. Zhou, Z.Z. Abidin, M. Alibakhshikenari vd. Wireless Electromagnetic Radiation Assessment Based on the Specific Absorption Rate (SAR): A Review Case Study, *Electronics*. 11, 511, 2022.
- [11] A. R. O. Mumin, R. Alias, J. Abdullah, S. H. Dahlan and J. Ali, Assessment of Electromagnetic Absorption towards Human Head Using Specific Absorption Rate, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 7 (4), 657-664, 2018.
- [12] K. Ates and H. F. Carlak, Dosimetry Analysis of the Human Head Model due to Mobile Phone Usage at GSM-850 Frequency Band, 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET), Antalya, Türkiye, 2017.
- [13] K. Ateş, C. Yeter ve Ş. Özen, WLAN Uygulamaları için 4x4 MIMO Antenin Elektromanyetik Dozimetri Karakteristiğinin İncelenmesi, *TIPTEKNO'20, Çevrimiçi*, 19-20 Kasım 2020.
- [14] S. Helhel, S. Ozen, I.B. Basyigit, O. Kurnaz, Y.E. Yoruk, M. Bitirgan and Z. Colak, Radiated Susceptibility of Medical Equipment in Health Care Units: 2G and 3G Mobile Phones as an Interferer, *Microwave and Optical Technology Letters*. 53 (11), 2657-2661, 2011.
- [15] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: a Simulation Study, 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). 2016.
- [16] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation Using an Electromagnetic Shielding Technique, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 28 (3), 1672-1682, 2022.
- [17] M. Bedeloğlu, N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components, *Radiation Protection Dosimetry*. 194 (1), 57-64, 2021.
- [18] M. Erol, K. Ateş and Ş. Özen, Elektrikli Araçlarda Kablosuz Güç Transferi Sistemi Tasarımı ve Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Değerlendirilmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (1), 605-618, 2023.

- 
- [19] E. Yavuz Dirik, K. Ateş and Ş. Özen Tipik Türk Evi ve İş Yerlerinde Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Kaynakları İçin Elektromanyetik Risk Analizi, Akdeniz Mühendislik Dergisi. 1 (1), 1-14, 2023.
- [20] CST Studio Suite, <https://www.cst.com/>, 2019 [accessed 12 May 2024].
- [21] Ç. Gökçek-Saraç, G. Akçay, S. Karakurt, K. Ateş and Ş.Özen, Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 40 (1), 179-190, 2021.
- [22] N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Electromagnetic Field Exposure to Human Head Model with Various Metal Objects at Sub-6 GHz Frequencies, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 42 (3), 114-122, 2023.
- [23] D. Andreuccetti, R. Fossi and C. Petrucci, An internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop>, 1996 [accessed 12 May 2024].
- [24] A. Vander Vorst, A. Rosen and Y. Kotsuka. *RF/Microwave Interaction with Biological Tissues*. John Wiley & Sons, 2006.
- [25] D. Bhargava, P. Rattanadecho and T. Wessapan, The Effect of Metal Objects on the SAR and Temperature Increase in the Human Head Exposed to Dipole Antenna (Numerical Analysis), *Case Studies in Thermal Engineering*. 22, 100789, 2020.
- [26] T. Wessapan and P. Rattanadecho, Temperature Induced in Human Organs due to Near-Field and Far-Field Electromagnetic Exposure Effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 119, 65-76, 2018.
- [27] E. Yavuz Dirik, İş Yerleri ve Yaşam Alanlarında Bulunan Cihazların Elektromanyetik Alan Seviyelerinin Belirlenmesi ve Elektromanyetik Risk Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 2022.