



**TİPİK TÜRK EVİ VE İŞ YERLERİNDE DÜŞÜK FREKANSLI ELEKTROMANYETİK
ALAN KAYNAKLARI İÇİN ELEKTROMANYETİK RİSK ANALİZİ**

***ELECTROMAGNETIC RISK ANALYSIS FOR LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC
FIELD SOURCES IN TYPICAL TURKISH HOMES AND WORKPLACES***

Eda YAVUZ DİRİK^{*1}  Kayhan ATEŞ^{2,3}  Şükrü ÖZEN³ 

1 Kastamonu Valiliği, Kastamonu, Türkiye

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

3 Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

ABSTRACT

The widespread usage of electronic devices in daily life has led to studies on the electromagnetic fields (EMF) caused by these devices and their possible effects. In this study, EMF levels created in the vicinity of various household appliances and electrical devices used in workplaces were determined and measurements were carried out for the low frequency region. Additionally, EMF dosimetry analyzes were performed for children, females, and males. In this context, induced electric fields and current densities in the child and adult human body by the effect of external magnetic fields in the frequency range of 50 Hz-100 kHz were calculated using the ellipsoidal models. The results were obtained according to the realistic values by normalizing the magnetic field intensity to 1 μ T. Furthermore, electromagnetic risk analyzes were carried out depending on the interaction of the external magnetic field with the body models. According to the measurements, the maximum electric field value was measured at 3 cm away from the washing machine and was determined to be 7.52 V/m. The minimum electric field value was measured at 1 m away from the electric razor and dishwasher and was detected to be 0.07 V/m. In magnetic field measurements, the maximum value was recorded as 9.81 μ T from an electric vacuum cleaner at 3 cm, while the minimum value was measured as 0.023 μ T at 1 m from smart watch and tablet devices. According to the results of the calculated induced current density in the body tissue, the maximum value was observed when the magnetic field was perpendicular to the face domain. The results were evaluated according to international standards. In addition, recommendations were declared to reduce electromagnetic exposure in houses and workplaces in daily life.

Keywords: Electromagnetic Field Exposure; Model Analysis; Electromagnetic Dosimetry; Measurement and Simulation

ÖZET

Günlük hayatta yaygınlaşan elektronik cihaz kullanımı, bu cihazların neden olduğu elektromanyetik alanlara (EMA) ve olası etkilerine dönük çalışmalara neden olmuştur. Bu çalışmada, ev ve iş yerlerinde kullanılan çeşitli elektrikli cihazların yakın çevresinde oluşturdukları EMA seviyeleri belirlenerek düşük frekans bölgesi için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çocuk, kadın ve erkekler için EMA dozimetri analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, 50 Hz-100 kHz frekans aralığında dış kaynaklı manyetik alanların etkisiyle çocuk ile yetişkin insan vücudunda indüklenen elektrik alanlar ve akım yoğunlukları, eliptik modeller sayesinde hesaplanmıştır. Sonuçlar, manyetik alan şiddeti 1 μ T değerine normalize edilerek gerçek değerler ışığında elde edilmiştir. Ayrıca, dış kaynaklı manyetik alanın vücut modelleri ile etkileşim şekline bağlı olarak elektromanyetik risk analizleri yapılmıştır. Ölçümlere göre, en yüksek elektrik alan değeri çamaşır makinesinden 3 cm uzaklıkta ölçülmüş ve 7,52 V/m olarak belirlenmiştir. En düşük elektrik alan değeri ise elektrikli tıraş makinesinden ve bulaşık makinesinden 1 m uzaklıkta ölçülmüş ve 0,07 V/m olarak tespit edilmiştir. Manyetik alan ölçümlerinde ise en yüksek değer, 3 cm uzaklıktaki bir elektrikli süpürge 9,81 μ T olarak kaydedilirken, en düşük değer akıllı saat ve tablet cihazlarından 1 m uzaklıkta 0,023 μ T olarak ölçülmüştür. Vücut dokusunda hesaplanan indüklenen akım yoğunluğu sonuçlarına göre en yüksek değer, manyetik alanın yüz hizasına dik gelmesiyle gözlenmiştir. Sonuçlar, uluslararası standartlara göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, günlük hayatta ev ve iş yerlerinde elektromanyetik maruziyeti azaltmak için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Alan Maruziyeti; Elektromanyetik Dozimetri; Model Analizi; Ölçüm ve Simülasyon

*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
30.10.2023	17.11.2023	19.12.2023	27.12.2023

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yaşam alanlarımızı elektrikli cihazlar çevrelemiştir. Günümüzde evlerde ve iş yerlerinde cihaz yoğunluğu çok arttığından, kapalı ortamlarda bu cihazlardan kaynaklı elektromanyetik alan maruziyeti de ciddi seviyelere ulaşmıştır. Çoğu yeşil bina derecelendirme sisteminde iç mekân çevre kalitesi, binada yaşayanlar için daha iyi ve sağlıklı bir çevre sağlamak için puanlama kategorilerinden biri olarak kabul edilmiştir. Ortamın elektromanyetik alan seviyesi, sağlıklı bir çevreyi oluşturan parametrelerden birisidir. İyonize olmayan elektromanyetik alan maruziyetindeki küçük bir artış, sağlık tehlikelerine neden olabileceğinden büyük öneme sahiptir.

Zamanla değişen elektromanyetik alanların insan vücudu ile etkileşimi, elektrik yükünün hareketine ve dokudaki elektrik dipollerinin tekrar yönlenmesine yol açar. Bu durum, vücudun elektriksel iletkenlik ve dielektrik geçirgenlik özelliklerine bağlıdır. Elektrik iletkenliği ve dielektrik geçirgenlik, vücut dokusunun türüne göre değişir ve ayrıca uygulanan alanın frekansına da bağlıdır. Dış kaynaklı alanların vücuda maruziyeti ile elektrik alan indüklenir. Vücut üzerinde indüklenen yükler; vücudun maruz kaldığı koşullara bağlı olarak indüklenen akımlara dönüşür. İndüklenen alanların büyüklüğü, manyetik alanın değişim hızı, manyetik akı yoğunluğu, döngünün yarıçapı ve dokunun elektriksel iletkenliği ile orantılıdır. Söz konusu bu etkileri engellemek için uluslararası kuruluşlar tarafından maruziyet limit değerleri yayımlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da tanınan ve uluslararası bir komisyon olan ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu) tarafından yayımlanmış önceki standartlarda, indüklenen akım yoğunluğu incelenmekteydi. Günümüzde anatomik modellerin gelişmesi ve dokuların elektriksel özellikleriyle beraber modellenmesi mümkün hale geldiği için vücutta indüklenen akım yoğunluğu yerine indüklenen elektrik alan ifadesi de ele alınabilmektedir. ICNIRP tarafından 50 Hz çalışma frekansında merkezi sinir sisteminde indüklenen elektrik alanın genel halk referans seviyesi 20 mV m^{-1} iken çalışanlar için 100 mV m^{-1} 'dir [1]. ICNIRP'nin yayınladığı 50 Hz frekansındaki elektrik alan ve manyetik alan maruziyet değerleri ise genel halk için sırasıyla 5 kV m^{-1} ile $200 \text{ } \mu\text{T}$ iken çalışanlar için sırasıyla 10 kV m^{-1} ve $1000 \text{ } \mu\text{T}$ 'dir.

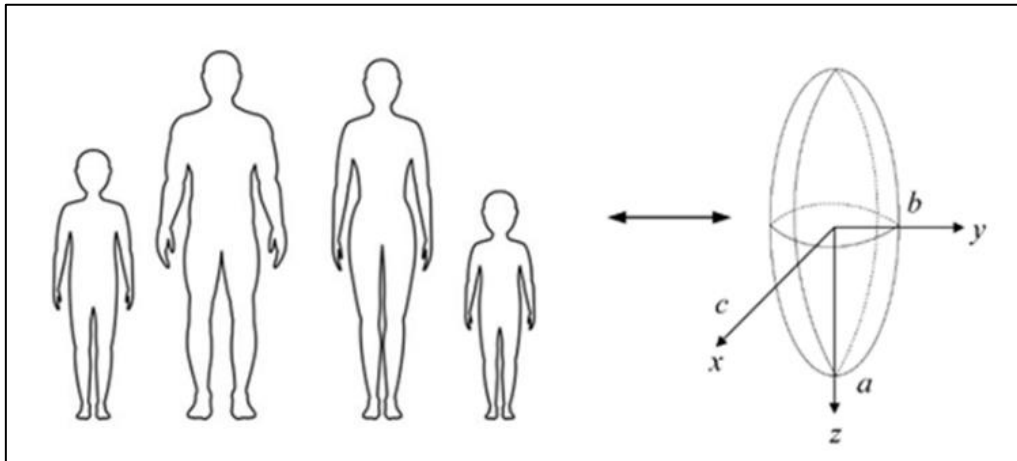
Çok düşük frekanstaki elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri, 1979 yılında Wertheimer ve Leeper'in çocukluk dönemi kanseri ile çok düşük frekanstaki manyetik alan maruziyeti arasındaki ilişkiyi gösterdikten sonra araştırmacılar tarafından daha detaylı bir şekilde incelenmektedir [2]. El-Marakby tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, evdeki elektrikli cihazların sebep olduğu elektromanyetik maruziyet değerlendirilmiştir [3]. Ev ortamındaki elektromanyetik alan seviyelerinin enerji iletim hatlarına uzaklığa, evdeki elektrikli cihazların sayısı ve türüne, ev elektrik tesisatının konfigürasyonuna gibi birçok faktöre bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda ev ortamında en yaygın olarak kullanılan 13 farklı elektrikli cihaz seçilerek 3 cm ve 100 cm için ölçümler gerçekleştirilmiştir. En yüksek manyetik alan seviyeleri, elektrikli süpürge makinesinden $154,6\text{-}198,3 \text{ mG}$ aralığında ve saç kurutma makinesinden $129,9\text{-}183,1 \text{ mG}$ aralığında ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre elektromanyetik alan seviyelerinin beklendiği üzere mesafeye azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında elektromanyetik alan riskini azaltmak için bir dizi önlem önerilmiştir. Yayımlanan başka bir araştırmada, İspanya'daki çocukların düşük frekanstaki elektromanyetik alanlara maruziyeti karakterize edilmiştir [4]. Çalışma kapsamında 104 evde, 26 okul ile oyun alanlarında ve 105 parkta ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ev ortamında 24 saatlik zamanda ortalama en yüksek manyetik alan şiddeti değeri $0,15 \text{ } \mu\text{T}$ ölçülmüştür. Düşük frekanstaki elektrik alan ölçüm sonuçlarının iç mekanlarda 1 ile 15 V/m arasında değişmekteyken dış mekanlarda ise $0,3$ ile $1,1 \text{ V/m}$ arasında değiştiği gözlenmiştir. En yüksek elektrik alan değeri, bir okul bahçesinde $55,5 \text{ V/m}$ olduğu belirtilmiştir. Almanya merkezli yapılan bir çalışmada ise yerleşim yerlerine yakın yüksek gerilim hatlarından yayılan çok düşük frekanslı manyetik alanın testis kanseri ile ilişkisi incelenmiştir [5]. Çalışma, 1995 ile 1997 yılları arasında tanı konulan, 15 ila 69 yaşları arasındaki 145 yeni vaka ve yaşları 5 yıllık gruplar halinde eşlenmiş 313 kontrol grubunu içermektedir. Hasta kişiler olarak Hamburg Kanseri Kayıt Merkezi tarafından kaydedilmiş testis kanseri vakalarının adresleri saptanmıştır. Kontrol grubu olarak da Hamburg'daki zorunlu yerleşim yerleri kaydından rastgele kişiler seçilmiştir. Analizler, iki ayrı model referans alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk modelde (Model A) maruziyet, mesafe ile tanımlanmışken ikinci modelde ise (Model B), ikamet süresi ile en yakındaki yüksek gerilim hattına mesafe dikkate alınmıştır. Bu modellerde düşük ve yüksek

maruziyet arasında ayırım yapılmıştır. 40 yaşından küçük ve büyük erkeklerde sonuçları değerlendirmek üzere ayrı analizler yapılmıştır. Hamburg'daki 100 m'lik bir koridor içinde yüksek gerilim hatlarına maruz kalma sıklığı, vakalarda %6,9 ve kontrol grubunda %5,8 olarak elde edilmiştir (%95 Güven aralığı = 0,56-2,80). Daha genç erkekler her iki modelde de hafif artmış riskler göstermiştir. Sonuçlara göre yüksek gerilim hatlarına maruz kalmanın testis kanseri için büyük bir risk faktörüdür. Ateş ve arkadaşları tarafından yapılmış bir çalışmada, ev ortamında kullanılan elektronik cihazların yaydığı elektromanyetik alanlar ölçülmüştür [6]. Bu bağlamda, ev aletlerinin elektromanyetik ışıma karakteristikleri FCC Part-15 Sınıf-A standardına göre değerlendirilmiştir. Ölçümler, yansız odada 3 metre uzaklık için gerçekleştirilmiştir. İncelemeler sonucunda saç kurutma makinesinin ve elektrikli süpürge'nin beklenenden fazla elektromanyetik ışıma yaptığı gözlenmiştir. Elektrikli su ısıtıcı, ütü, vantilatör ve ampulün ise standartları sağladığı belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise homojen eliptik modeller sayesinde 100 Hz ile 100 kHz arasındaki elektrik ve manyetik alanların vücut dokusunda yarattığı etkiler incelenmiştir [7]. Yetişkin ve çocuk modellerinde, dışarıdan uygulanan $1 \mu\text{T}$ manyetik alana benzer düzeyde elektrik alan indüklemek için 25 ila 2000 V/m arasında dış kaynaklı elektrik alan seviyesinin gerektiği gözlenmiştir. Konutlarda elektrik ve manyetik alan bileşenleri ile ilgili veriler, genellikle manyetik alan bileşeninin yetişkinlerde ve çocuklarda elektrik alana göre dokuda daha fazla elektrik alan ve akım indükleyebileceğini göstermektedir. Yapılan başka bir çalışmada ise, uygulanan 50 Hz frekansındaki elektrik ve manyetik alanlardan kaynaklı dokuda oluşan akım yoğunluğu hesaplanmıştır [8]. Vücut pozisyonu, anatomisi, yaş ve gebelik etkilerini incelemek için 25 farklı voksel modeli kullanılmıştır. Farklı pozisyonlar ve voksel modelleriyle yapılan hesaplamalar, dış kaynaklı elektrik alanlar için $0,32 \text{ mA/m}^2$ 'ye ve manyetik alanlar için 7 mA/m^2 'ye kadar değişen maksimum akım yoğunluklarına ulaşılmıştır.

Literatüre bakıldığında, düşük frekans bölgesinde mesleki ve genel halk maruziyetini içeren farklı çalışmalar bulunmaktadır [9-13]. Gelişen teknoloji ile ev ve işyerlerinde artan cihaz yoğunluğuna bağlı olarak, düşük frekans bölgesi EMA kaynaklarını birlikte ele alan ve bu kaynaklara maruziyet için EM risk analizini içeren bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, ev ve iş yerlerinde kullanılan çeşitli elektrikli cihazların yakın çevresinde oluşturdukları EMA seviyeleri belirlenerek düşük frekans bölgesi için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı insan modelleri için EMA dozimetri analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 50 Hz ile 100 kHz frekans bölgesinde, dış kaynak tarafından yayılan manyetik alanların etkisiyle çocuk (yaş gruplarına göre) ve yetişkin insan vücuduna indüklenen elektrik alan ve akım yoğunlukları hesaplanmıştır. Manyetik alan şiddeti $1 \mu\text{T}$ 'ye normalize edilmiştir ve farklı boyutlardaki insan vücutları için eliptik modeller kullanılmıştır. Dış kaynaklı manyetik alanın vücut modelleri ile etkileşim şekline bağlı olarak risk analizleri yapılmıştır. Bunun sonucunda günlük hayatta ev ve iş yerlerinde elektromanyetik maruziyet riskini düşürmek için önerilerde bulunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

İnsan vücudu için temel bir eliptik model analizi, Şekil 1'de sunulmuştur. Burada, 2a uzunluğu insan boyunu, 2b kalçadan kalçaya genişliği ve 2c ise gövde ile kalça arasındaki uzunluğu belirtir [14].



Şekil 1. Eliptik model analizi.

Tablo 1, çeşitli anatomik eliptik model parametrelerini belirtir [14]. Doku modelinin farklı frekanslardaki dielektrik özellikleri ise Tablo 2’de sunulmuştur [14].

Tablo 1. İncelenen insan modellerinin eliptik model parametreleri.

Model	a (m)	b (m)	c (m)
Ortalama erkek	0,875	0,195	0,098
Ortalama kadın	0,805	0,2	0,091
Ortalama endomorfik (şişman) adam	0,88	0,225	0,17
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	0,88	0,16	0,08
Küçük kadın	0,725	0,18	0,079
Büyük kadın	0,865	0,215	0,114
10 yaşında çocuk	0,69	0,143	0,078
5 yaşında çocuk	0,56	0,12	0,069
1 yaşında çocuk	0,37	0,095	0,068

Tablo 2. Doku modelinin farklı frekanslardaki dielektrik özellikleri.

Frekans	Dielektrik Sabit (ϵ_r)	İletkenlik (S/m)
50 Hz	1×10^6	0,1
100 Hz	7×10^5	0,15
1 kHz	1×10^5	0,15
10 kHz	3×10^4	0,2
100 kHz	1×10^4	0,3

Bir eliptik modelde E_0 (V/m) genliğindeki dış kaynaklı elektrik alan tarafından indüklenen elektrik alanın genliği, Denklem (1)’de verildiği şekilde hesaplanır [15].

$$E = \frac{j\omega\epsilon_0 E_0}{\sigma^* A} \quad (1)$$

Burada, ω açısal frekans (rad/sn), ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m), A ise eliptik modelle ilgili bir katsayıdır. $\sigma^* = \sigma + j\omega\epsilon_r\epsilon_0$ (S/m) kompleks elektriksel iletkenliktir. Dış kaynaklı elektrik alan gövdeye dik geldiğinde indüklenen elektrik alan maksimum olarak hesaplanır [15]. Dokuda indüklenen elektrik alan tarafından oluşan akım yoğunluğu ise Denklem (2)’deki gibi belirtilir:

$$J = \sigma E \quad (2)$$

Burada, J akım yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{m}^2$); σ , insan modelinin elektriksel iletkenliği (S/m); E ise elektrik alanıdır (V/m). Biyolojik dokuda çok düşük frekans bölgesindeki manyetik alan tarafından oluşan ikincil alanlar, literatürde de belirtildiği gibi ihmal edilebilir [16].

3. ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Elektrik ve manyetik alan ölçümleri ICNIRP’nin belirlemiş olduğu 6 dakikalık maruziyet süresi referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Ev ve işyerindeki elektromanyetik alan seviyeleri ve manyetik alan değerleri 3 cm, 30 cm ve 1 m olmak üzere farklı mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan HIOKI 3470 Magnetic Field Hitester ve Narda Broadband Field Meter NBM-550 marka cihazlar sayesinde ölçümler yapılmıştır [17, 18]. Ölçüm sonuçları, Tablo 3’te ortalama değer olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Ev ve işyerinde kullanılan farklı cihazların uzaklığa bağlı olarak manyetik alan şiddetleri (**B**, μT) ve elektrik alan seviyeleri (**E**, V/m) ölçüm sonuçları.

Elektrikli Cihaz	3 cm Uzaklıkta		30 cm Uzaklıkta		1 m Uzaklıkta	
	B	E	B	E	B	E
Boş Ortam	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Saç Kurutma Makinesi	2,17	0,92	0,13	0,36	0,037	0,32
Elektrikli Tıraş Makinesi	0,23	0,12	0,068	0,1	0,061	0,07
Elektrik Süpürgesi	9,81	0,67	0,243	0,2	0,091	0,16
Floresan Lamba	0,48	0,72	0,16	0,22	0,081	0,12
Su Isıtıcı	0,093	0,42	0,039	0,2	0,03	0,12
Akıllı Saat	0,048	0,11	0,024	0,09	0,023	0,07
Fırın	2,198	0,15	0,403	0,14	0,106	0,14
Çamaşır Makinesi	0,06	7,52	0,043	0,2	0,036	0,14
Ütü	2,74	1,52	0,48	0,14	0,38	0,12
Bulaşık Makinesi	0,186	0,5	0,138	0,12	0,089	0,07
Masaüstü Bilgisayar	0,04	0,86	0,028	0,35	0,025	0,17
Tablet	0,027	1,32	0,024	0,32	0,023	0,12
Buzdolabı	0,077	0,32	0,065	0,12	0,056	0,1
Klima	0,2	0,9	0,05	0,73	0,03	0,6
Dizüstü Bilgisayar	0,05	0,73	0,03	0,35	0,026	0,28
Televizyon	0,22	0,33	0,04	0,18	0,29	0,1

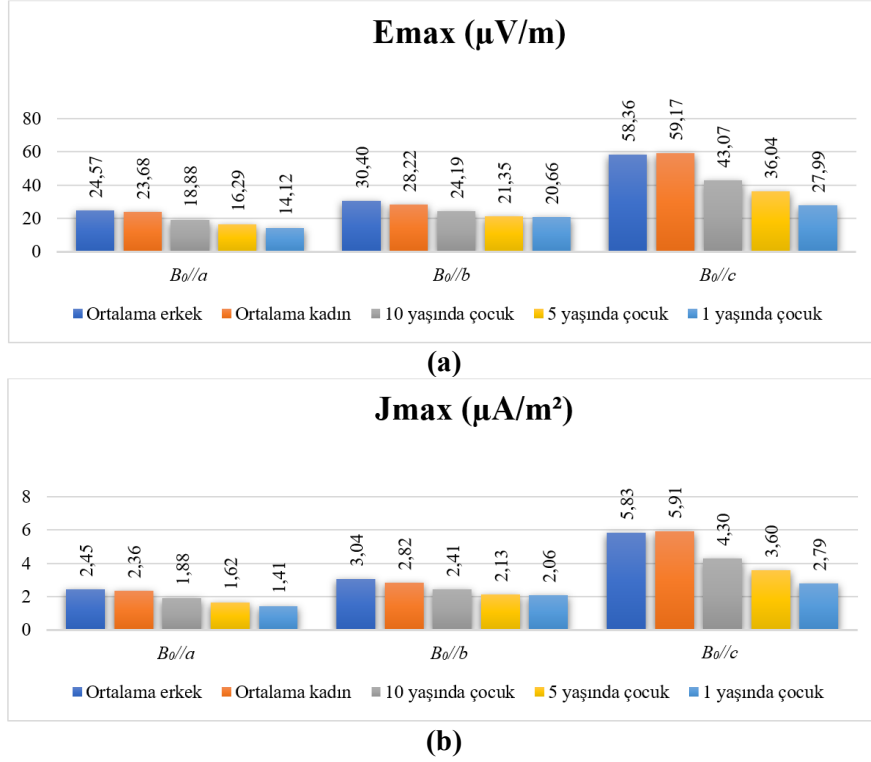
Ölçüm sonuçlarına göre çamaşır makinesi, 3 cm uzaklıkta 7,52 V/m ile en yüksek elektrik alan değerine sahipken elektrikli tıraş makinesi ve bulaşık makinesi ise 0,07 V/m ile 1 m uzaklıkta en düşük elektrik alan değerlerine sahiptir. Manyetik alan ölçüm sonuçlarında en yüksek değer, 3 cm uzaklıkta elektrik süpürgesinden 9,81 μT olarak elde edilmiştir. En düşük olarak akıllı saat ve tableten 1 m uzaklıkta 0,023 μT olarak ölçülmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

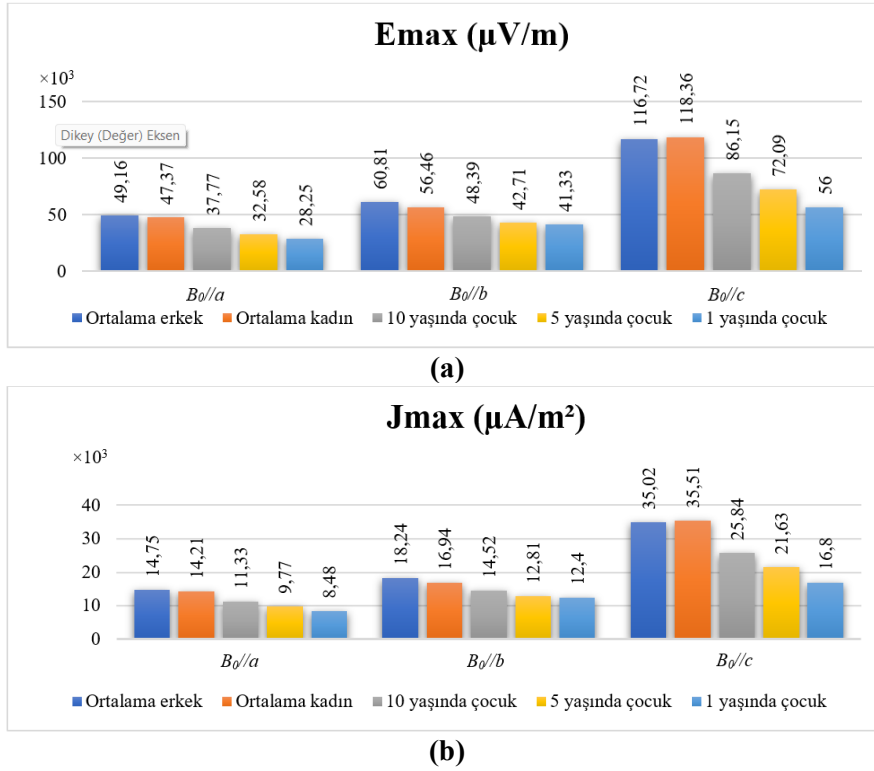
4.1. Analitik Model Analizleri

Literatürde, dokuda indüklenen alan seviyeleri ve akım yoğunluğu için farklı çalışmalar bulunmaktadır [19-22]. Bu çalışma kapsamında 1 μT genliğindeki normalize kaynak manyetik alan şiddetine maruz bırakılan eliptik modellerin analitik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. 50 Hz ve 100 kHz frekanslarında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen indüklenen elektrik alan ve akım yoğunluğu sonuçları, Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.

Hesaplanan indüklenmiş maksimum elektrik alan ve akım yoğunlukları, sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmuştur. Manyetik alan, modelin uzun eksenine paralel olarak uygulandığında vücutta indüklenen alan, diğer konfigürasyonlara göre daha düşüktür. En fazla indüklenen alan, vücudun yan eksenine aynı hizada olduğu senaryoda elde edilmiştir. İndüklenen alanın genliği vücut şekli, boyutu, frekans ve vücudun alana göre konumlanmasına bağlı olarak değişmektedir. Frekansın harmonik bileşenlerinin analiz sonuçları, frekansa arttıkça artmıştır.



Şekil 2. (a) 50 Hz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum elektrik alan sonuçları; **(b)** 50 Hz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum akım yoğunluğu sonuçları.



Şekil 3. (a) 100 kHz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum elektrik alan sonuçları; **(b)** 100 kHz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum akım yoğunluğu sonuçları.

Tablo 4. Farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum elektrik alan sonuçları.

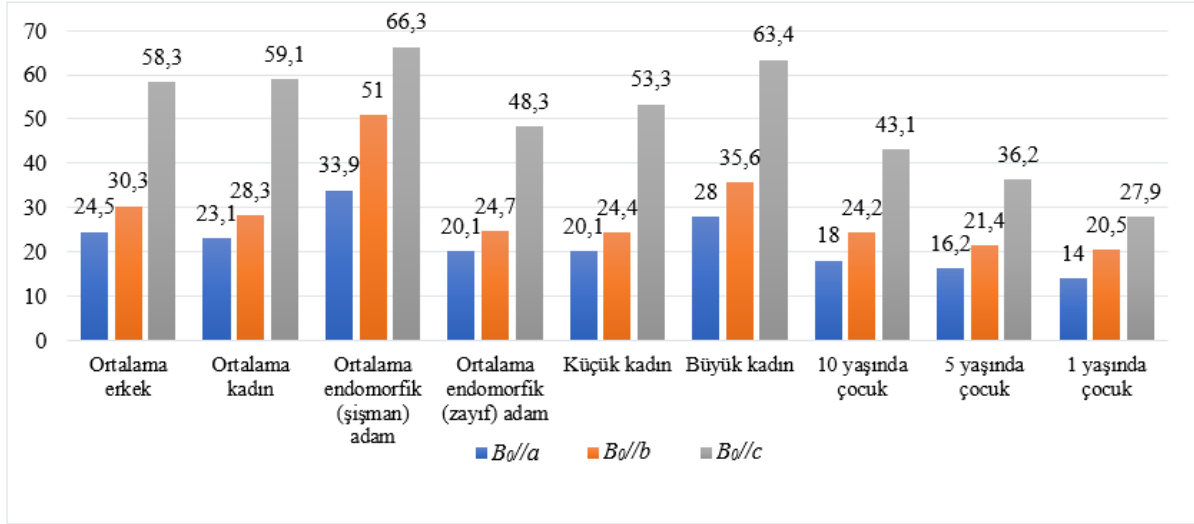
Model	E _{max} (µV/m)														
	B ₀ /la					B ₀ /lb					B ₀ /lc				
	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
Ortalama erkek	24,6	49,2	491,6	4915,9	49159,8	30,4	60,8	608,1	6081,2	60812,4	58,4	116,7	1167,2	11672,5	116724,3
Ortalama kadın	23,7	47,4	473,7	4737	47370,2	28,2	56,5	564,6	5645,6	56455,6	59,2	118,4	1183,6	11835,8	118357,9
Ortalama endomorfik (şişman) adam	34	68	680	6799,7	67997,1	51,5	103	1029,7	10297	102971,3	66,3	132,7	1327	13269,7	132696,9
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	20,1	40,2	402,1	4021,2	40212,4	24,9	49,9	498,5	4985,3	49853,5	48,7	97,3	973,1	9731,4	97314
Küçük kadın	20,8	41,6	416,2	4162	41620,1	24,5	49,1	490,5	4905,5	49054,7	53,3	106,5	1065,3	10653,1	106530,7
Büyük kadın	28	55,9	559,1	5591	55909,5	35,2	70,4	704,1	7040,5	70405,4	63,6	127,2	1272,3	12722,8	127228,4
10 yaşında çocuk	18,9	37,8	377,7	3777,1	37771,1	24,2	48,4	483,9	4839	48390,5	43,1	86,1	861,5	8614,9	86149,3
5 yaşında çocuk	16,3	32,6	325,8	3258,2	32581,7	21,4	42,7	427,1	4270,6	42705,6	36	72,1	720,9	7208,8	72088,1
1 yaşında çocuk	14,1	28,3	282,5	2825,1	28251,1	20,7	41,3	413,3	4133	41329,7	28	56	560	5600	55998,6

Tablo 5. Farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum akım yoğunluğu sonuçları.

Model	J _{max} (µA/m ²)														
	B ₀ //a				B ₀ //b				B ₀ //c						
	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz			
Ortalama erkek	2,5	7,4	73,7	983,2	14747,7	3	9,12	91,2	1216,2	18243,7	5,8	17,5	175,1	2334,5	35017,5
Ortalama kadın	2,4	7,10	71,1	947,4	14211,1	2,8	8,5	84,7	1129,1	16936,7	5,9	17,8	177,5	2367,2	35507,4
Ortalama endomorfik (şişman) adam	3,39	10,2	102	1359,9	20399,1	5,1	15,4	154,5	2059,4	30891,4	6,6	19,9	199,0	2653,9	39809
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	2	6	60,3	804,2	12063,7	2,5	7,5	74,8	997,1	14956	4,9	14,6	146	1946,3	29194,2
Küçük kadın	2,1	6,2	62,4	832,4	12486	2,5	7,4	73,6	981,1	14716,4	5,3	16	159,8	2130,6	31959,2
Büyük kadın	2,8	8,4	83,9	1118,2	16772,9	3,5	10,6	105,6	1408,1	21121,6	6,4	19,1	190,8	2544,6	38168,5
10 yaşında çocuk	1,9	5,7	56,7	755,4	11331,3	2,4	7,3	72,6	967,8	14517,1	4,3	12,9	129,2	1723	25844,8
5 yaşında çocuk	1,6	4,9	48,9	651,6	9774,5	2,13	6,4	64,1	854,1	12811,7	3,6	10,8	108,1	1441,8	21626,4
1 yaşında çocuk	1,4	4,2	42,4	565	8475,3	2,06	6,2	62	826,6	12398,9	2,8	8,4	84	1120	16799,6

4.2. Sayısal Simülasyon Sonuçları

50 Hz frekansında $1 \mu\text{T}$ 'ye normalize edilmiş manyetik alan şiddetine maruziyet sonucu vücutta indüklenen maksimum elektrik alan seviyesi, sonlu integrasyon yöntemi (SİT) tabanlı çalışan CST Studio Suite ile hesaplanmıştır. SİT, Maxwell denklemlerinin integral formlarına göre çözüm yapan bir yöntemdir. Problem uzayı zaman düzleminde sonlu farklar metoduna benzer şekilde ayrıklaştırılmaktadır. Ardından, uygun sınır koşullarına göre genel çözüme ulaşılmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulan eliptik model parametrelerine göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te simülasyon sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4. Farklı eliptik modellerde indüklenen maksimum elektrik alanların simülasyon sonuçları.

Gövde modelinin boyutu, şekli, manyetik alanın yönü ve frekans, indüklenen elektrik alan ve akım yoğunluğu için ana parametrelerdir. Manyetik alan modelin uzun eksenine paralel uygulandığında (B_0/a), dokuda indüklenen elektrik alan diğer konfigürasyonlardan daha az hesaplanmıştır.

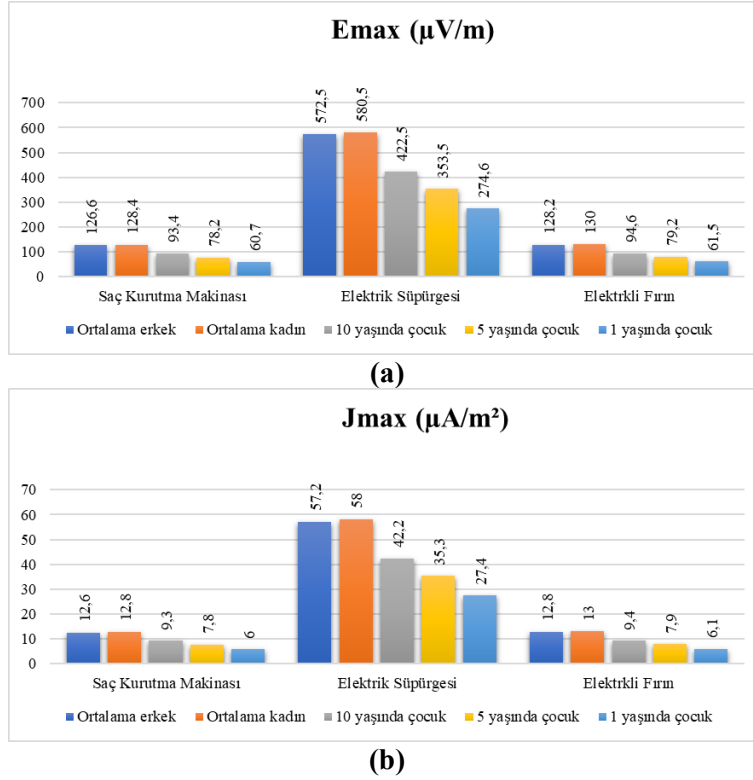
4.3. Sonuçların Karşılaştırılması

Bu çalışma sayesinde, ev ve iş yerlerinde kullanılan cihazların elektromanyetik çevreye etkileri incelenmiştir. Ayrıca şebeke frekansında ve 100 kHz'e kadar oluşturduğu manyetik alanların farklı vücut modellerinde indüklediği elektrik alanları ve akım yoğunlukları hesaplanmıştır. En yüksek alan seviyesi, vücudun yan ekseninin uzunluğuna göre elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde indüklenen alan seviyesi; vücudun şekline, boyutuna, maruz kalma sıklığına, vücudun alan kaynağına göre yönelimine ve frekansa bağlı olarak değişmektedir.

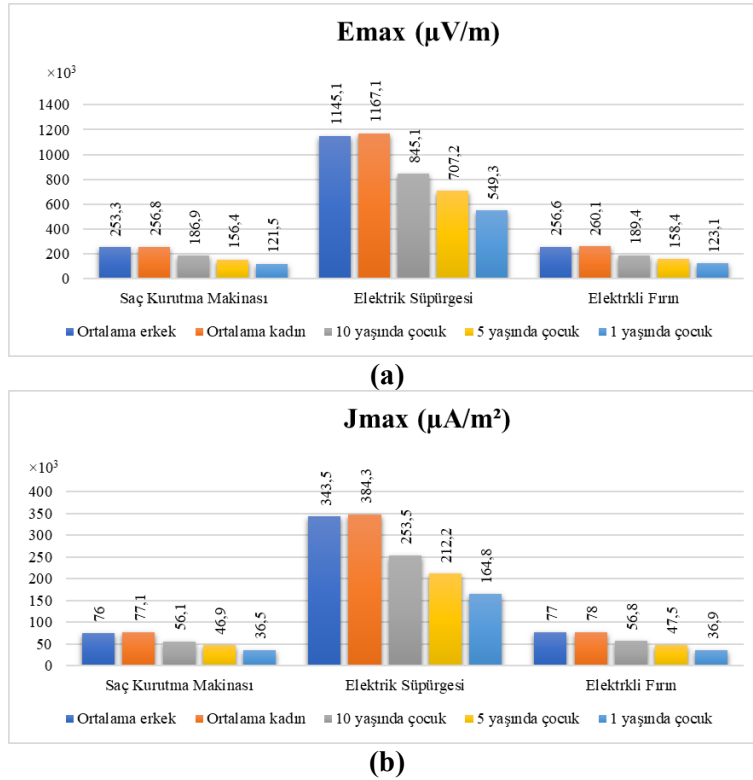
Simülasyonlar ile analitik sonuçlar incelendiğinde, birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Tablo 6'da 50 Hz frekansında aynı senaryolara göre elde edilen analitik sonuçlar ile simülasyon sonuçları, hata payları gözetilerek sunulmuştur. Ayrıca, gerçekleştirilen ölçümler sonucunda farklı yaş ve cinsiyetlerdeki kişilerin çeşitli elektrikli cihazların kullanımı esnasında maruz kaldığı manyetik alandan dolayı vücutlarında indüklenerek elektrik alan ile akım yoğunluğu değerleri de hesaplanmıştır ve Şekil 5 ile Şekil 6'da belirtilmiştir.

Tablo 6. 50 Hz çalışma frekansındaki manyetik alanın farklı eliptik modeller için gövdeye z-ekseni yönünde dik gelmesiyle ($B_0//a$), gövdeye y-ekseni yönünde dik gelmesiyle ($B_0//b$) ve gövdeye x-ekseni yönünde dik gelmesiyle ($B_0//c$) indükleyeceği maksimum elektrik alanının analitik sonuçları ile SİT tabanlı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

Model	E _{max} (µV/m)											
	$B_0//a$			$B_0//b$			$B_0//c$					
	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı
Ortalama erkek	24,579	24,5	% 0,32	30,406	30,3	% 0,34	58,362	58,3	% 0,10	58,362	58,3	% 0,10
Ortalama kadın	23,685	23,1	% 2,46	28,227	28,3	% 0,25	59,178	59,1	% 0,13	59,178	59,1	% 0,13
Ortalama endomorfik (şişman) adam	33,998	33,9	% 0,28	51,485	51,0	% 0,94	66,348	66,3	% 0,07	66,348	66,3	% 0,07
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	20,106	20,1	% 0,02	24,926	24,7	% 0,90	48,656	48,3	% 0,73	48,656	48,3	% 0,73
Küçük kadın	20,810	20,1	% 3,4	24,527	24,4	% 0,51	53,265	53,3	% 0,06	53,265	53,3	% 0,06
Büyük kadın	27,954	28,0	% 0,16	35,202	35,6	% 1,13	63,614	63,4	% 0,33	63,614	63,4	% 0,33
10 yaşında çocuk	18,885	18,0	% 4,68	24,195	24,2	% 0,02	43,074	43,1	% 0,06	43,074	43,1	% 0,06
5 yaşında çocuk	16,290	16,2	% 0,55	21,352	21,4	% 0,22	36,044	36,2	% 0,43	36,044	36,2	% 0,43
1 yaşında çocuk	14,125	14,0	% 0,88	20,664	20,5	% 0,79	27,99	27,9	% 0,32	27,99	27,9	% 0,32



Şekil 5. 50 Hz frekansındaki ölçüm sonuçlarına göre gövdeye x -ekseni yönünde dik gelen (B_0/c) manyetik alanın farklı eliptik modellerde indüklediği (a) maksimum elektrik alan seviyesi; (b) maksimum akım yoğunluğu.



Şekil 6. 100 kHz frekansındaki ölçüm sonuçlarına göre gövdeye x -ekseni yönünde dik gelen (B_0/c) manyetik alanın farklı eliptik modellerde indüklediği (a) maksimum elektrik alan seviyesi; (b) maksimum akım yoğunluğu.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, günlük hayatta ev ve işyerinde kullanılan cihazların yaydığı düşük frekans bölgesindeki elektromanyetik alanların dozimetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, 50 Hz ile 100 kHz arasında yapılmıştır. Buna göre, yaygın olarak kullanılan cihazlardan kaynaklanan elektrik ve manyetik alanların düşük frekans bölgesinde analitik ve nümerik model simülasyonları ve iyonize olmayan dozimetri değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, günlük hayatta kullanılan cihazların yaydığı alan seviyeleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre, en yüksek elektrik alan değeri 3 cm uzaklıktaki çamaşır makinesinden 7,52 V/m genliğinde, en düşük elektrik alan değeri ise 1 m uzaklıktaki elektrikli tıraş makinesinden ve bulaşık makinesinden 0,07 V/m olarak ölçülmüştür. Manyetik alan şiddeti ölçümlerine göre en yüksek değer, 3 cm uzaklıktaki elektrik süpürgesinden 9,81 μ T olarak elde edilmiştir. En düşük değer ise 1 m uzaklıktaki akıllı saat ve tablet cihazlarından 0,023 μ T olarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçları, ICNIRP'nin yayınladığı genel halk ve mesleki maruziyet limit değerlerinin altındadır.

Elektromanyetik çevrede manyetik alanın üç bileşeniyle de karşılaşılabilir ve o çevrede bulunan tüm canlıları etkileyebilir. Bu çalışma kapsamında farklı eliptik modellerde 50 Hz ile 100 kHz frekans aralığında hesaplanan dokuda indüklenen elektrik alan şiddeti, kaynak manyetik alanın yönüne ve modelin boyutuna göre değişmektedir. Kaynak manyetik alan, modelin uzun eksenine göre $(B_0//a)$ uygulandığında, vücutta indüklenen alan seviyelerinin ve akım yoğunluklarının diğer konfigürasyonlardan $(B_0//b)$ ve $(B_0//c)$ daha az olduğu hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, vücut eksenine yüz hizasından dik gelen manyetik alan $(B_0//c)$ daha fazla akım yoğunluğu indüklemiştir. 1 μ T'ye normalize edilen kaynak manyetik alanın etkisiyle dokuda indüklenen elektrik alan, analitik ve nümerik olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen frekans bandı sayesinde günlük hayatta elektrik şebekesinden kaynaklı 50 Hz frekansındaki alanların ve farklı frekanslarda çalışan anahtarlama elemanlarının sebep olduğu maruziyet modellenmiştir. Burada yapılan hesaplamalar normalize değerler olmasına rağmen ICNIRP'nin yayınladığı maruziyet limitlerinin altındadır. ICNIRP kılavuzu incelendiğinde belirtilen sınır değerlerinin sağlık etkileri için kesinlik arz etmediği, konuyla ilgili daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışma kapsamında hesaplanan sonuçlara göre dokuda indüklenen en yüksek akım yoğunluğu, manyetik alanın yüz hizasına dik gelmesiyle gözlenmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalarda, elektromanyetik alanların etkilerini azaltmak için öneriler bulunmaktadır [3]. Elde edilen bulgulara göre, günlük hayatta elektrikle çalışan cihazların kullanımı ile konutlardaki elektrik tesisatı projelendirilmesine ilişkin önlemler alınabilir. Ev ve ofis ortamlarında kullanılmayan cihazların fişlerinin prizden çekilmesi önerilebilir. Çocuklarda maruziyet sürelerini azaltmak için elektrikli cihaz kullanımlarını olabildiğince sınırlandırmak bir çözüm olarak sunulabilir. Ev ortamında çocukların ve yetişkinlerin yatak odaları, elektrik hatlarına ve yaydıkları manyetik alanlara göre düzenlenebilir. Ofis ortamlarında ise yüksek alan kaynakları olarak belirtilen cihazlar için elektromanyetik ekranlama yöntemi sunulabilir. Ofis masalarının konumları, çalışanların maruz kaldıkları alan seviyeleri ve maruziyet eksenlerine göre yeniden düzenlenebilir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre uzaklık arttıkça elektromanyetik alan seviyeleri azalmaktadır. Buna göre hem ev hem de ofis ortamında kullanılmayan cihazlardan olabildiğince uzaklaşmak, diğer bir çözüm olarak sunulabilir.

Elektromanyetik alanlara maruziyet, elektriğin kullanımının artmasından dolayı günümüzde incelenmesi gereken konulardan birisi olarak belirtilebilir. Araştırmacılar, bu disiplinle ilgili çalışmalarını yoğun bir şekilde devam ettirmektedir. Gelecek çalışmalarda, konuyla ilgili gerçekçi anatomik modeller üzerinde simülasyonlar yapılabilir. Ayrıca çözüm önlemlerinin etkilerini ele almak için teorik ve deneysel incelemeler gerçekleştirilebilir. İlerleyen çalışmalarımız, yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alanların insan vücudu modeli üzerindeki dozimetrik analizleri ve uluslararası standartlara göre değerlendirilmesini de içermektedir.

REFERANSLAR

- [1] ICNIRP, Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz To 100 kHz), *Health Phys.* 99 (6), 818-836, 2010.
- [2] N. Wertheimer and E. Leeper, Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer, *Am. J. Epidemiol.* 109 (3), 273-284, 1979.
- [3] F.A. El-Marakby. Personal Exposure to Electromagnetic Fields Emitted from Household Electrical Appliances in Alexandria. *Journal of High Institute of Public Health.* 42 (2), 224-234, 2012.
- [4] M. Gallastegi, A. Jiménez-Zabala, L. Santa-Marina, J.J. Aurrekoetxea, M. Ayerdi, J. Ibarluzea, A. Huss, Exposure To Extremely Low And Intermediate-Frequency Magnetic And Electric Fields Among Children From The INMA-Gipuzkoa Cohort, *Environmental Research*, 157, 190-197, 2017.
- [5] C. Baumgardt-Elms, M. Schumann, W. Ahrens, K. Broman, A. Stang, I. Jahn and K.H. Jockel. Residential Exposure to Overhead High-Voltage Lines and the Risk of Testicular Cancer: Results of a Population-Based Case-Control Study in Hamburg (Germany). *Int Arch Occ Env Hea.* 78 (1), 20-26, 2005.
- [6] K. Ateş, Ş. Özen and H.F. Carlak, Elektrikli Ev Aletlerinin Elektromanyetik (EM) Işıma Karakteristiklerinin İncelenmesi ve EM Girişim analizi, 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016). 2016.
- [7] W.T. Kaune, J.L. Gutmann and R. Kavet, Comparison of Coupling of Humans to Electric and Magnetic Fields With Frequencies Between 100 Hz and 100 kHz, *Bioelectromagnetics.* 18, 67-76, 1997.
- [8] P.J. Dimbylow and R. Findlay, The Effects of Body Posture, Anatomy, Age and Pregnancy on the Calculation of Induced Current Densities at 50 Hz. *Radiat Prot Dosim.* 139 (4), 532-538, 2010.
- [9] S. Ozen, Evaluation and Measurement of Magnetic Field Exposure at a Typical High-Voltage Substation and Its Power Lines. *Radiat. Prot. Dosim* 128 (2), 198-205, 2008.
- [10] 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.
- [11] K. Ates, H.F. Carlak and Sukru Ozen, Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation Using an Electromagnetic Shielding Technique, *Int. J. Occup. Saf. Ergo.* 28 (3), 1672-1682, 2022.
- [12] S. Helhel and S. Ozen, Assessment of Occupational Exposure to Magnetic Fields in High-Voltage Substations (154/34.5 kV), *Radiat. Prot. Dosim.* 128 (4), 464-470, 2008.
- [13] M.S. Linet, E.E. Hatch, R.A. Kleinerman, L.L. Robinson, W.T. Kaune, D.R. Friedman, R.K. Severson, C.M. Haines, C.T. Hartsock, S. Niwa vd. Residential Exposure to Magnetic Fields and Acute Lymphoblastic Leuke-Mia in Children. *New Eng. J. Med.* 337 (1), 1-7, 1997.
- [14] C.H. Durney, H. Mussoudi and M.F. Iskender, *Radio Frequency Radiation Dosimetry Handbook Fourth Ed.* Brooks Air Force Base, TX: United State Air Force, School of Aerospace Medicine, Report USAFSAMTR-85-73, 1986.
- [15] S. Ozen, Low-Frequency Transient Electric and Magnetic Fields Coupling to Child Body. *Radiat. Prot. Dosim.* 128 (1), 62-67, 2007.
- [16] E. Yavuz Dirik, İş Yerleri ve Yaşam Alanlarında Bulunan Cihazların Elektromanyetik Alan Seviyelerinin Belirlenmesi ve Elektromanyetik Risk Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 2022.

-
- [17] M. Bedeloğlu, N. İl, K. Ateş, Ş. Özen, Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components. *Radiat. Prot. Dosim.* 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] H.F. Carlak, Ş. Özen and S. Bilgin, Low-Frequency Exposure Analysis Using Electric and Magnetic Field Measurements and Predictions in the Proximity of Power Transmission Lines in Urban Areas, *Turk. J. Electr. Eng. Co.* 25 (5), 3994-4005, 2017.
- [20] H. Massoudi, C.H. Durney and C.C. Johnson, Long-Wavelength Analysis of Plane Wave Irradiation of an Ellipsoidal Model of Man, *IEEE Transact. Microwave Theory Tech.* MTT-25 (1), 41-52, 1977.
- [21] F.X. Hart, Numerical and Analytical Methods to Determine the Current Density Distributions Produced in Human and Rat Models by Electric and Magnetic Fields, *Bioelectromagnetics.* 13 (S1), 27-42, 1992.
- [22] R.W.P. King, A Review of Analytically Determined Electric Fields and Currents Induced in the Human Body When Exposed to 50–60-Hz Electromagnetic Fields, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 52 (5), 1186-1192, 2004.