



Sıçan Modelinin GSM-2100 Frekans Bandında Elektromanyetik Dozimetri Analizi

Electromagnetic Dosimetry Analysis of a Rat Model at the GSM-2100 Frequency Band

Kayhan ATEŞ ve Şükrü ÖZEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Akdeniz Üniversitesi

Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi, Konyaaltı / Antalya, 07058, Türkiye
kayhanates@akdeniz.edu.tr, sukruozen@akdeniz.edu.tr

Özetçe— Herhangi bir dokuya etkiyen elektromanyetik alanın davranışı, elektromanyetik dozimetri ile açıklanabilir. Dış kaynaklı elektromanyetik alanların biyolojik dokuya beklenmeyen maruziyeti sonucu, olumsuz etkiler gözlenmektedir. Yapılan bu çalışmada sıçanların elektromanyetik dozimetri değerlendirmesi, sonlu integrasyon tekniğini (SİT) temel alan özgül emilim oranı simülasyonları sayesinde gerçekleştirilmiştir. Harici elektromanyetik kaynak olarak 2100 MHz frekansında ışına yapan bir monopol anten tasarlanmıştır. Anten, sıçan modelinin en yakın noktasından 4 cm ve 14 cm uzağa yerleştirilmiş ve model için vücut geneli toplam SAR, sırasıyla 0.22 W/kg ile 0.039 W/kg olarak hesaplanmıştır. Kafa ve vücut modellerindeki indüklenmiş SAR, her dokunun elektriksel özellikleri nedeniyle değişmiştir. Ayrıca, antenin sıçan modeli ile arasındaki mesafe arttıkça indüklenen SAR azalmıştır. Sonuçlar, 1 gr ortalama dokudaki SAR değerinin 10 gr ortalama dokudaki değerden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler — elektromanyetik dozimetri; özgül emilim oranı; biyoelektromanyetik.

Abstract— Behavior of the electromagnetic field acting on any tissue can be explained by electromagnetic dosimetry. As a result of unexpected exposure of external electromagnetic fields to biological tissue, adverse effects are observed. In this study, electromagnetic dosimetry evaluation of rats has been performed with finite integration technique (FIT) based specific absorption rate (SAR) simulations. A monopole antenna radiating at 2100 MHz has been designed as external electromagnetic source. The antenna has been located at 4 cm and 14 cm away from the nearest point of the rat model and whole body total SAR for model has been calculated as 0.22 W/kg and 0.039 W/kg, respectively. Induced SAR at the head and body models have been varied due to the electrical properties of each tissue. Also, as the distance between the antenna and the rat model has increased, the induced SAR has decreased. Results showed that the 1 gr average tissue SAR results was higher than the 10 gr average tissue SAR results.

Keywords — electromagnetic dosimetry; specific absorption rate (SAR); bioelectromagnetics.

I. GİRİŞ

Elektriğin gelişmesi ve kullanımının yaygınlaşması sayesinde, araştırmacıları hem canlı dokusunda hem de elektrikle çalışan cihazlarda oluşacak olası etkilere karşı motive etmektedir [1-3]. Bu nedenle birçok gelişmiş ülke, elektrik çarpması, elektromanyetik girişim (EMG), elektromanyetik dozimetri vb. gibi söz konusu tehlikeler için güvenlik limitleri uygulamaktadır [4, 5]. Özellikle elektromanyetik alanların biyolojik dokularla etkileşiminde, kaynak dalganın frekansı ile kurbanın elektriksel özellikleri büyük öneme sahiptir [6]. Bu duruma bağlı olarak, elektromanyetik alanların olası etkileri incelenmektedir.

Elektrikli cihazlar tarafından yayılan elektromanyetik güç yoğunluğu, biyolojik dokular tarafından soğurulur. Bu sayede dokunun çalışma mekanizması, zamanla değişir. Elektromanyetik dozimetri, bu biyofiziksel süreçleri açıklayan fenomendir. Kısaca dozimetri ise doz kavramının incelenmesi olarak tanımlanabilir. Doz ise, ilgilenilen ölçütün doğrudan değişikliklere sebep olmamasına rağmen biyolojik dokudaki aktiviteyle ilişkili olması durumudur. Dozimetri, makrodozimetri ve mikrodozimetri olmak üzere iki başlıkta incelenir. Makrodozimetride belirli doku, organ veya bütün vücudun ortalama maruz kalması değerlendirilirken mikrodozimetride hücresel veya hücre altı seviyedeki maruziyet incelenir [7]. Temel olarak elektromanyetik dozimetri; frekansa, maruziyet süresine, biyolojik dokuların elektriksel özelliklerine, elektromanyetik güç yoğunluğuna ve doku ile elektromanyetik dalganın etkileşim moduna (güçlü veya zayıf eksen) bağlıdır [8]. Dozimetriyi değerlendirmek için, sayısal teknikler ve deneysel gözlemler uygulanmaktadır [9, 10]. Bu şekilde araştırmacılar, biyolojik dokuları analiz edebilirler.

Günümüzde özgül emilim oranı (specific absorption rate, SAR), hücresel haberleşme frekanslarında dozimetri analizi için önemli bir parametredir. Bu nedenle, SAR'ı değerlendirmek için birçok çalışma yapılmaktadır [11-13]. Çeşitli çalışmalar sonucunda, dokuda SAR indüklenmesinin etkilerinden birisi

olarak sıcaklık artışı gözlenmektedir [14]. Bu etkilerden kaçınmak için, gerek sistemlerin tasarımında gerekse kullanıcılara yönelik birçok uygulama yapılmaktadır. Uluslararası kuruluşlar, genel halk sağlığı için SAR değerleri limitlerini belirlemiştir ve Tablo 1'de gösterilmiştir. Söz konusu değerler, 10 gr doku için yayınlanmıştır.

TABLO I. ULUSLARARASI KURULUŞLAR TARAFINDAN YAYINLANAN 2100 MHZ FREKANSI İÇİN SAR LİMİT DEĞERLERİ (W/KG) [15, 16]

Vücut Bölgesi	ICNIRP	IEEE
Kafa	2	2
Uzuv	4	4

Ayrıca, Federal İletişim Komisyonu'na (Federal Communications Commission, FCC) göre, insan kafasında indüklenen SAR değeri 1 gr doku için 1.6 W/kg'dır [17].

Bu çalışmada, sıçan modelindeki SAR değerleri GSM-2100 frekans bandına göre incelenmiştir. Elektromanyetik ışın kaynağı olarak monopollü anten tasarlanmıştır ve sıçan modelinden farklı uzaklıklara konumlandırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler, sonlu integrasyon tekniğine dayalı elektromanyetik simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümleri, özgül emilim oranı açıklanmıştır. Ardından, simülasyonlarda kullanılan bilgisayar tabanlı sıçan modelinin değerlendirilmesi ve elektriksel özellikleri belirtilmiştir. Son olarak simülasyon senaryosu ifade edilmiştir ve dozimetri simülasyonları değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Özgül emilim oranı (SAR)

SAR, herhangi bir biyolojik dokuda soğurulmuş elektromanyetik enerjiyi tanımlamak için kullanılır. Biyolojik dokunun elektriksel özellikleri ve çalışma frekansı SAR'ın temel parametreleri olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, dokuya girişim yapan elektromanyetik dalganın polarizasyonu ve genliği, etki altında bulunan biyolojik dokuların davranışı için önemlidir.

Ayrıca, eşdeğer doku modellemesi ve nümerik hesaplamalarla da incelenebilmektedir. SAR, (1)'de gösterilen formüller yardımıyla eşdeğer doku yöntemi sayesinde hesaplanır. Bu yöntemde ilgilenilen doku, fantom adı verilen elektriksel olarak eşdeğer sıvı ile modellenir. Fantom sınırları,

ilgili dokunun gerçekçi dielektrik sabiti ve elektriksel iletkenlik değerlerine göre hazırlanır.

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

$$SAR = C \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

Burada, ρ biyolojik dokunun yoğunluğunu temsil eder (kg/m^3). Q_{ext} harici elektromanyetik güç yoğunluğudur ve birimi W/m^3 'tür. $|E|$, dış kaynak tarafından oluşan ve dokuda gözlenen elektrik alanının genliğini göstermektedir (V/m). ϵ_0 , boşluğun dielektrik sabitidir ve değeri $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 'ye eşittir. σ ve ϵ'' , sırasıyla, dokunun elektriksel iletkenliğini (S/m) ve karmaşık dielektrik sabitinin sanal kısmını ifade eder. ω açısal frekanstır ($\omega=2\pi f$, f çalışma frekansı (Hz)) ve birimi radyandır. C , ilgilenilen dokunun ısı kapasitesidir ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$). t , maruziyet süresi (s) ve T ise sıcaklıktır (K). Dokuda gözlenen elektrik alan ile SAR arasındaki ilişki, (3)'de belirtildiği gibidir.

$$|E| = \sqrt{\frac{SAR \cdot \rho}{\sigma}} \quad (3)$$

Matematiksel benzetim yönteminde SAR hesaplamak için belirtilen formülleri temel alan analitik veya nümerik işlemler gerçekleştirilmektedir. Dokuda gözlenen elektrik alan, dokunun elektriksel iletkenliği ve yoğunluğu bilirse SAR, (1) ile hesaplanabilir.

Günümüzde, ileri teknolojiye sahip SAR algılayıcıları sayesinde de SAR seviyeleri belirlenmektedir. Denklem (2)'de zamana bağlı dokudaki sıcaklık değişimi gözlenip bu yöntemle SAR hesabı yapılabilir. Bunun yanında, bir dokudaki SAR seviyesini belirlemek için termal kameralar ve farklı sensörler de kullanılmaktadır.

B. Nümerik modelleme

Sıçanların elektromanyetik dozimetri analizi, sonlu integrasyon tekniği temelli elektromanyetik yazılım olan CST Microwave Studio ile yapılmıştır. SİT sayesinde problem uzayının ayrıklaştırma işlemi, zaman düzleminde sonlu farklar yönteminde olduğu gibi gerçekleştirilir. Bunun yanında, çözüme Maxwell denklemlerinin integral formu ele alınarak ulaşılır.

TABLO II. BİYOLOJİK DOKULARIN 2100 MHZ'DEKİ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Doku	Dielektrik Sabiti	İletkenlik (S/m)	Doku	Dielektrik Sabiti	İletkenlik (S/m)
Yağ	5.317	0.09	Beyin-Omurilik Sıvısı	66.764	3.154
Lenf Düğümü	68.802	0.794	Böbrek	53.587	2.162
İlik	5.336	0.08	Safra Kesesi	57.951	1.821
Sert Kemik	11.592	0.328	Kan Damarı	76.822	1.233
Deri	38.43	1.307	Akciğer	20.717	0.71
Dalak	53.159	1.982	Pankreas	77.898	0.9
Kas	53.163	1.514	Kan	58.851	2.262
Karaciğer	43.638	1.464	Kalp	55.579	1.985
Boz Madde	49.51	1.573	Testis	58.107	1.898



Şekil 1. Voxel tabanlı sıçan modeli

Gerçekleştirilen simülasyonlarda, voxel tabanlı sıçan modeli incelenmiştir. Voxel, üç boyutlu nesnelere en küçük birimi olarak tanımlanabilir. Sıçan modelindeki bir vokselin çözünürlüğü, $1.827 \times 1.827 \times 2.015 \text{ mm}^3$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 1, simülasyonlarda incelenen voxel tabanlı sıçan modelini belirtmektedir.

Biyolojik yapıların elektriksel özellikleri, istenen sıklıkta karmaşık dielektrik sabiti ölçümü ile elde edilebilir. Bu şekilde, elektromanyetik dalgalar ile canlı doku arasındaki etkileşim açıklanabilir. Denklem (4), karmaşık dielektrik sabitini belirtmektedir. Burada, ϵ' gerçek kısmı gösterir ve dokunun elektrik alan depolama ölçüsü olarak belirtilir. ϵ'' ise sanal kısımdır ve kayıpları temsil eder. Dokunun elektriksel iletkenliği ise (5) yardımıyla elde edilir ve birimi S/m'dir.

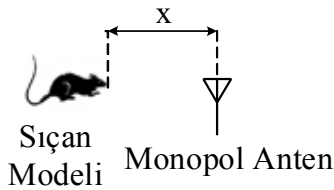
$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4)$$

$$\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon'' \quad (5)$$

Bu çalışmada kullanılan elektriksel özellikler, Tablo 2'de belirtilmiştir.

III. ÖZGÜL EMİLİM ORANI SİMÜLASYONLARI

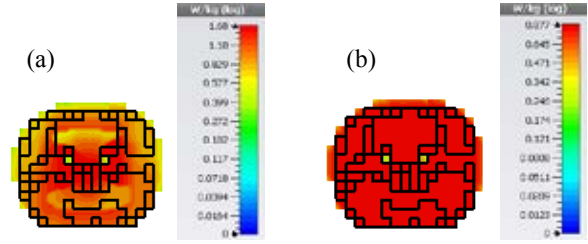
Bu çalışma için tasarlanan simülasyon senaryosuna göre (Şekil 2), 1.5 W gücünde 2100 MHz frekansında ışımaya yapan monopollü anten, çevresine elektrik alan yaymaktadır. Yayılan elektrik alan, farklı x mesafelerine sahip sıçan modellerine elektromanyetik girişim gerçekleştirmektedir.



Şekil 2. Simülasyon senaryosu

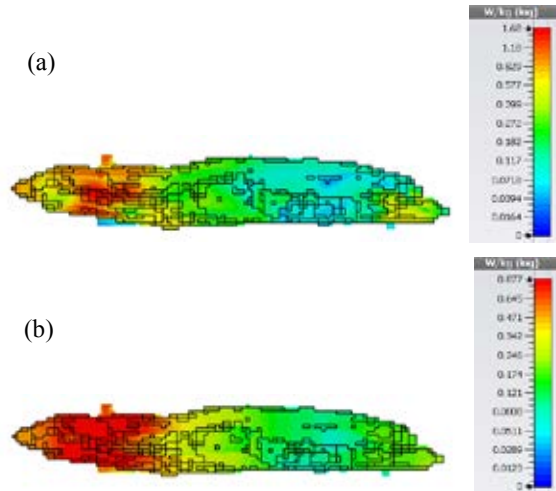
Tüm simülasyon sonuçları, logaritmik eksende değerlendirilmiştir. Vücut geneli toplam SAR değerleri, x mesafesi 4 cm iken 0.22 W/kg olarak elde edilmişken 14 cm için 0.039 W/kg olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3, antenin sıçan modelinin burnundan 4 cm uzağında bulunan kafa bölgesindeki indüklenen SAR'ı göstermektedir. Simülasyonlar, sırasıyla 1 gr ve 10 gr doku modeli için gerçekleştirilmiştir. Kafa bölgesindeki maksimum SAR, 1 gr doku için 1.306 W/kg olarak hesaplanmışken 10 gr doku modeli için 0.693 W/kg olarak elde edilmiştir.



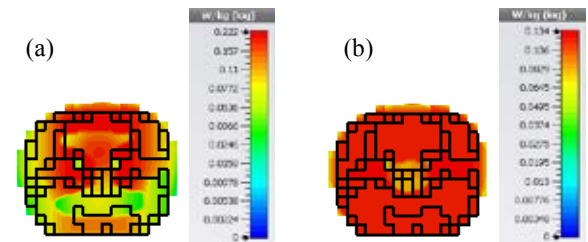
Şekil 3. x mesafesi 4 cm iken sıçan modelinin kafa bölgesinde indüklenen SAR (a) 1 gr doku sonuçları (b) 10 gr doku sonuçları

Şekil 4, x mesafesi 4 cm iken sıçan modelinin farklı dokularında indüklenen SAR'ı belirtmektedir. Şekil 4.a, 1 gr doku için SAR sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.b ise 10 gr ortalama doku için vücudun boyuna kesitini ve farklı dokulardaki indüklenmiş SAR'ı göstermektedir. Sonuçlar, vücudun değişik organlarında farklı değerlerde SAR'ın indüklenmiştir. Vücutun kafa ve gövde bölgesindeki farklı organlarda daha yüksek değerler gözlenmiştir. 1 gr ve 10 gr doku için vücut kesitinde maksimum değer olarak sırasıyla 1.679 W/kg ve 0.877 W/kg hesaplanmıştır.



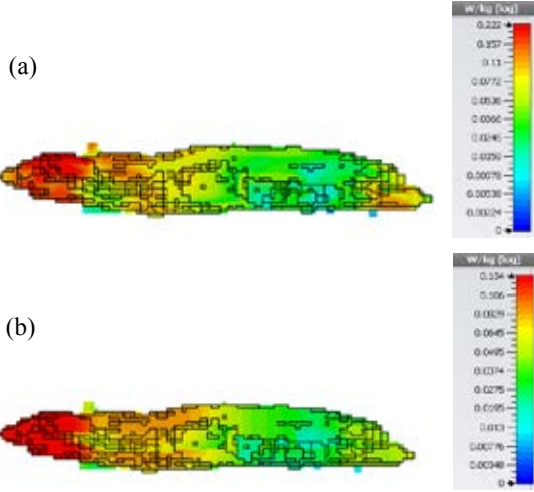
Şekil 4. x mesafesi 4 cm iken sıçan modelinin vücudunda indüklenen SAR (a) 1 gr doku sonuçları (b) 10 gr doku sonuçları

Şekil 5 ise x mesafesi 14 cm olması durumunda baş bölgesinde indüklenen SAR değerlerini 1 gr ve 10 gr doku için göstermektedir. Sonuçlar doğrultusunda, kafa bölgesinde gözlenen maksimum SAR değerleri 1 gr doku için yaklaşık 0.216 W/kg olarak hesaplanmışken 10 gr doku için 0.122 W/kg elde edilmiştir.



Şekil 5. x mesafesi 14 cm iken sıçan modelinin kafa bölgesinde indüklenen SAR (a) 1 gr doku sonuçları (b) 10 gr doku sonuçları

Şekil 6; anten ile sıçan modeli arasındaki mesafe 14 cm iken vücut modelinde indüklenen SAR'ı, 1 gr ve 10 gr ortalama doku için göstermektedir. Sonuçlar doğrultusunda en yüksek SAR, dokuların elektriksel özellikleri ve uzaklığa bağlı olarak kafa bölgesinde gözlenmiştir. Vücut modelinde indüklenen SAR'ın en yüksek değerleri, 1 gr doku için 0.222 W/kg ve 10 gr doku için 0.134 W/kg olarak elde edilmiştir.



Şekil. 6. x mesafesi 14 cm iken sıçan modelinin vücudunda indüklenen SAR (a) 1 gr doku sonuçları (b) 10 gr doku sonuçları

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, elektromanyetik dozimetri kavramı açıklanmış ve sıçanlar için GSM-2100 frekans bandında dozimetri parametresi olarak özgül emilim oranı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, elektromanyetikte kullanılan sayısal yöntemlerden birisi olan SİT temelli simülasyon programı CST Microwave Studio sayesinde voksel tabanlı sıçan modellerinin özgül emilim oranı elde edilmiştir. Elektromanyetik kaynak olarak 2100 MHz'de ve 1.5 W gücünde ışına yapan monopollü anten tasarlanmış ve sıçan modelinden farklı uzaklıklara yerleştirilerek çalışma gerçekleştirilmiştir.

SAR simülasyonları sayesinde, anten ile sıçan modeli arasında 4 cm ile 14 cm mesafeler için kafa bölgesi ve tüm vücut modeli değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 1 gr dokuda indüklenen SAR'ın 10 gr dokudan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kaynak ile kurban arasındaki mesafe arttığında elektromanyetik maruziyetin azaldığı gözlenmiştir. Başka bir deyişle, elektromanyetik dalganın genliği mesafe arttıkça azalmaktadır. Elektromanyetik dalga, genellikle vücut ile anten arasındaki en yakın bölge olan vücudun kafa bölgesine girişim yapmaktadır.

Elektromanyetik alanların biyolojik dokularla etkileşiminin geçici veya kalıcı olarak doku hasarına neden olduğu bilinmektedir. Bu etkileşimi incelemek için disiplinler arası işbirliği ve detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır. Bunun yanında; söz konusu alanların termal ve termal olmayan etkilerinin deneysel olarak incelendiği çalışmalarda, model analizleri ve doz parametrelerinin bilinmesi önem arz eder. Bu çalışma ile biyoelektromanyetik deneysel çalışmalar için sıçan modelinin SAR simülasyonları sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Park, S., "Evaluation of Electromagnetic Exposure During 85 kHz Wireless Power Transfer for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(1):1-8, 2017.
- [2] Paul, C. R. and Hardin, K. B., "Diagnosis and Reduction of Conducted Noise Emissions", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 30(4):553-560, 1988.
- [3] Ramdani, M., et al. "The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits-Past, Present and Future", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(1):78-100, 2009.
- [4] Arı, N. ve Özen Ş., *Elektromanyetik Uyumluluk*, Palme Yayıncılık, Ankara, 2008.
- [5] Ates, K., Carlak, H. F. and Ozen, S., "Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: a Simulation Study", *2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16)*, pp.1-7, 2016.
- [6] Vander Vorst, A., Rosen, A. and Kotsuka, Y., *RF/Microwave Interaction with Biological Tissues*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- [7] Repacholi, M. H. and Greenebaum, B., "Interaction of Static and Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields with Living Systems: Health Effects and Research Needs", *Bioelectromagnetics*, 20(3):133-160, 1999.
- [8] Ates, K., Carlak, H. F. and Ozen, S., "The Distance Effect in the Dosimetry Analysis of a Rat Model at GSM-900 Frequency Band: a Simulation Study", *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES'18)*, Safranbolu, Turkey, pp.1-4, 2018.
- [9] Gajšek, P., et al., "Empirical Validation of SAR Values Predicted by FDTD Modeling", *Bioelectromagnetics*, 23(1):37-48, 2002.
- [10] Wake, K. et al., "An Exposure System for Long-Term and Large-Scale Animal Bioassay of 1.5-GHz Digital Cellular Phones", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 55(2):343-350, 2007.
- [11] Bamba, A., et al. "Experimental Assessment of Specific Absorption Rate Using Room Electromagnetics", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 54.4 (2012): 747-757.
- [12] Rashid, T. B. and Song, H. H., "Analysis of Biological Effects of Cell Phone Radiation on Human Body Using Specific Absorption Rate and Thermoregulatory Response", *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(6):1482-1490, 2019.
- [13] Celaya-Echarri, M., et al. "Spatial Characterization of Personal RF-EMF Exposure in Public Transportation Buses", *IEEE Access*, 7: 33038-33054, 2019.
- [14] Ates, K. and Carlak, H. F., "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)*, pp.1-5, 2017.
- [15] 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*, 2005.
- [16] Ahlbom, A., et al., "ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", *Health Phys.*, 74(4):494-522, 1998.
- [17] Federal Communications Committee (FCC) RF Safety FAQ [Online], <https://www.fcc.gov/engineering-technology/electromagnetic-compatibility-division/radio-frequency-safety/faq/rf-safety#block-menu-block-4>, Son giriş tarihi: 6 Mayıs 2019.