Sanal Gerçeklik Gözlüklerinin İnsan Gözündeki Elektromanyetik Maruziyet Analizi
Electromagnetic Exposure Analysis of the Human Eye due to Virtual Reality Glasses

Niyazi İl
TMMOB Elektrik Müh. Odası
Antalya Şubesi
Antalya, Türkiye
niyazi.il@gmail.com

Kayhan Ateş
University of Pavia
Telecommunications & Remote Sensing Lab.
Pavia, Italy
kayhanates@akdeniz.edu.tr

Şükrü Özen
Akdeniz Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü
Antalya, Türkiye
sukruozen@akdeniz.edu.tr

***Özetçe* —Kablosuz ağ teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, giyilebilir cihazlarda da bir çeşitlilik ve yenilik meydana gelmektedir. Sanal gerçeklik (VR) gözlükleri de bu yeniliklerden bir tanesidir. VR gözlükler genellikle gözleri kaplamaktadır ve bu da o bölgedeki dokuların elektromanyetik (EM) alanlara maruziyetini arttırmaktadır. Bu çalışmada, yeni nesil haberleşme frekans bandında çalışan (2,4 GHz) VR gözlük kullanan bir insan modelinde, gözlerin maruz kaldığı özgül soğrulma oranı (SAR) ve elektrik alan dağılımı modellenmiş ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Simülasyonlar, üç boyutlu problem uzayında, dokuların literatürde belirtilen gerçek dielektrik değerleri referans alınarak yapılmıştır. İnsan gözü dokusundaki maksimum elektrik alan şiddeti 24 V/m'dir. Elde edilen en yüksek SAR değeri ise 1 g ortalama kütleli doku için 2,31 W/kg'dır. Sonuçlar, teknolojik gelişmelere paralel olarak, bir sonraki nesil genişletilmiş gerçeklik çalışmalarında elektromanyetik maruziyet güvenlik gereksinimleri konusunda önemli bilgiler sunmaktadır.**

Anahtar Kelimeler—sanal gerçeklik gözlüğü, elektromanyetik modelleme, elektromanyetik maruziyet, özgül soğrulma oranı (SAR), biyoelektromanyetik.

***Abstract*—With the development of wireless network technologies, there is a variety and innovation in wearable products. Virtual reality (VR) glasses are one of these innovations. VR glasses usually cover the eyes, which increases the exposure of large areas of that region. In this study, the specific absorption rate (SAR) and the electric field distribution in the eyes of a human model wearing VR glasses operating at the next-generation communication frequency band (2.4 GHz) were modeled and numerically analyzed. Simulations were carried out in a three-dimensional problem space, referencing the actual dielectric values of tissues as described in the literature. The maximum electric field strength in the human eye tissue calculated as 24 V/m. The corresponding maximum SAR value is 2.31 W/kg for 1 g average tissue. These findings provide essential insights into electromagnetic exposure safety requirements for the next generation of extended reality applications, in parallel with technological advancements.**

Keywords—virtual reality (VR) glasses, electromagnetic modelling, electromagnetic exposure, specific absorption rate (SAR), bioelectromagnetics.

979-8-3315-2981-9/24/$31.00 © 2024 IEEE

I. GİRİŞ

Küresel anlamda kullanılan kablosuz ağ teknolojileri her geçen gün ilerleme kaydetmektedir ve bu gelişmeler sağlık, eğitim, savunma gibi birçok alanda çığır açan uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Uzaktan bağlantı hızının ve kapasitesinin artması, ayrıca mobil haberleşmede gecikme süresinin azalması ile birlikte çok uzak mesafelerde eş zamanlı bağlantılar gerçekleştirilebilmektedir. Gelecekteki teknolojilerin sub-terahertz (THz) frekans bandı olarak adlandırılan 100 GHz - 300 GHz frekans aralığı da dahil olmak üzere geniş bir frekans spektrumunu kullanabileği ve dağıtabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla, holografik haberleşme, genişletilmiş gerçeklik ve akıllı cihazları birbirine bağlayıp entegre eden gerçek anlamda birbirine bağlı teknolojilerin, hayatımızın her alanının vazgeçilmez bir unsuru haline gelmesi yakın tarihte çok olasıdır [1].

Son yıllarda, yeni nesil teknolojilerin elektromanyetik maruziyeti analizleri üzerine yapılan araştırmalar artmaktadır [2]–[5]. Bazı araştırmalarda, elektromanyetik alanların insan vücudu üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, insan vücudunu temsil eden matematiksel (fantom) modeller ele alınmıştır [6]–[10]. Bu modeller, dokuların elektromanyetik özellikleri ve dokularda indükledikleri SAR değerleri göz önünde bulundurarak tasarlanmaktadır. Söz konusu matematiksel modeller, doğrudan insanlar üzerinde deneysel olarak gerçekleştirilemeyen durumlar için çok değerli bilgiler sağlamaktadır. Cep telefonlarından ve birtakım elektronik cihazlardan kaynaklanan elektromanyetik radyasyon hakkında yapılan bu çalışmalar, genellikle beyin, deri, kalp vb. dokuların maruziyetini incelemeye odaklanmıştır. Ancak, göz ve katmanları için, 4G/5G frekanslarında çalışan yeni nesil haberleşme teknolojisine sahip sanal gerçeklik gözlükleri gibi cihazlardan kaynaklanan SAR hakkında çok az sayıda araştırma bulunmaktadır.

Li ve Lu'nun 2020 yılında yaptıkları çalışmada 2,6 GHz ve 3,5 GHz frekanslarında çalışan 5G cep telefonu antenlerinden yayılan elektromanyetik alana maruz kalan beyin

dokusundaki 10 g kütleli SAR ve elektrik alan dağılımı simüle edilmiştir [11]. Simülasyon sonuçlarına göre anten çalışma frekansı 2,6 GHz olduğunda, insan kafa modelinde ortalama SAR değeri 0,217 W/kg, elektrik alan şiddetinin tepe noktası 21,067 V/m ve ortalama frekans 3,5 GHz olduğunda SAR tepe noktası 0,285 W/kg ve elektrik alan şiddetinin tepe noktası 22,844 V/m'dir. Elde edilen değerler izin verilen referans aralığında kalmıştır. 2018 yılında Cvetković vd. tarafından yapılan çalışmada, 3G/4G ve 5G frekansları olan sırasıyla 900 MHz, 2,6 GHz ve 28 GHz için sanal gerçeklik gözlüklerinin elektromanyetik (EM) dalgasına maruz bırakıldıklarında gerçekçi bir üç boyutlu insan gözü modelindeki elektrik alanının ve SAR dağılımının sayısal analizi yapılmıştır [12]. Elde edilen sonuçlara göre, insan göz dokusunda 28 GHz ve 900 MHz frekanslarındaki elektrik alan şiddetinin maksimum değerleri sırasıyla 94,43 V/m ve 137,3 V/m'dir. 2,6 GHz için ise 8,62 V/m'dir. 28 GHz ve 900 MHz frekanslarındaki elektrik alan değerleri, referans değerlerden daha yüksektir. Tüm frekanslarda elde edilen SAR değerlerinin ise öngörülen güvenlik değerlerini aşmadığı gözlemlenmiştir. Poungsri vd. tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada 60 GHz frekansında çalışan bir sanal gerçeklik gözlüğü takan iki farklı insan kafası modelinde SAR analizleri gerçekleştirilmiştir [13]. Modelin birinde kafa modeli tek katmanlı olarak tasarlanmıştır, ikinci modelde ise beyin dokusu da bulunmaktadır. Daha gerçekçi olan modelde SAR değerleri daha yüksektir ve tepe SAR değerleri sırasıyla 10 g ve 1 g ortalama kütleler için yaklaşık 9 W/kg ve 50 W/kg'dır. İnsan vücudunda metal çerçeveli gözlük veya metal takıların bulunması durumunda, beşinci nesil (5G) frekanslarında çalışan cihazların neden olduğu elektromanyetik maruziyet ile ilgili 2021 [14] ve 2023 [15] yıllarında yapılan çalışmalarda, metal çerçeveli gözlük takan ve metal implantlar veya küpeler takan insan kafalarında yeni nesil cep telefonlarının neden olduğu SAR değerleri araştırılmış ve iyonlaştırıcı olmayan dozimetri açısından değerlendirilmişir. Çalışmalarda elde edilen sonuçlar, gözlük, diş implantı ve küpe gibi metal nesnelerin dış biyolojik dokular için SAR değerlerinde artışa neden olabileceğini ve metal nesnelerin daha derin dokular için bir tür kalkan gibi davranabileceğini göstermektedir. Ancak elde edilen değerler uluslararası kuruluşların sınırlarının altındadır.

Elektromanyetik alanların biyolojik etkileri kısa süreli ve uzun vadeli etkiler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Kısa süreli etkiler, baş ağrısı, göz yanması, kulak çınlaması, görüş alanında daralma, halsizlik, baş dönmesi, yorgunluk ve gece uykusuzluğu gibi semptomlarla ortaya çıkar. Bununla birlikte, moleküler ve kimyasal bağlara, hücre yapısına ve bağışıklık sistemine etki eden uzun vadeli etkiler de mevcuttur [16]. Elektromanyetik alanların etkilerine karşı insan sağlığının korunması için Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen iki uluslararası standart bulunmaktadır. Bunlar Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) [17] ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) [18] tarafından yayınlanan kılavuzlardır. Genel halk maruziyeti için SAR sınır değeri hem ICNIRP hem de IEEE tarafından 2 W/kg olarak belirlenmiştir [19].

Kablosuz haberleşme sistemlerini kullanan ve kafa bölgesini kapsayan giyilebilir cihazlar genellikle insanların gözlerini kapladığından, göze çok yakın mesafeden veri transferi gerçekleştirmektedir. Gözün elektromanyetik radyasyonu absorbe etmesi, çok duyarlı ve hassas bir doku olması nedeniyle, bu cihazların sağlık ve güvenlik gereksinimlerini karşılayabilmesi; ayrıca göz sağlığına ilişkin endişelerin giderilmesi gerekmektedir [20], [21]. Bu çalışma, 1 g ve 10 g ortalama doku kütlesi için 2,4 GHz çalışma frekansına sahip bir anten içeren sanal gerçeklik gözlüğünden yayılan elektromanyetik kaynağın, gerçekçi kafa modelinin göz dokusunda indüklenen elektrik alan ve SAR dağılımını analiz etmeyi amaçlamaktadır.

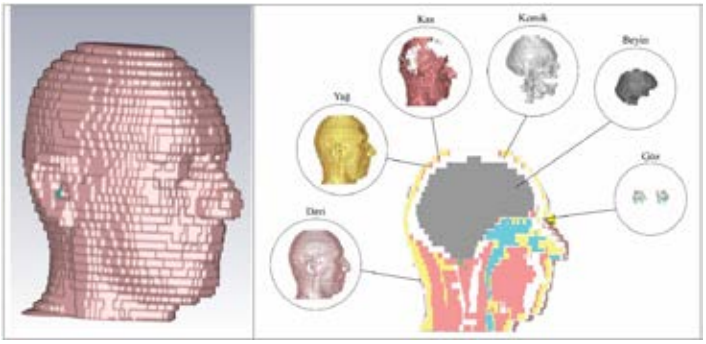
II. MATERYAL VE YÖNTEM

Teknolojik ilerlemelerle birlikte son yıllarda elektromanyetik spektrumun radyo frekansı (RF) bölgesini kullanan yeni cihazlar hızla yaygınlaşmaktadır. Bu gelişmelerle birlikte, mesleki ortamlarda veya kontrolsüz durumlarda istenmeyen RF radyasyona maruz kalma riski de artış göstermektedir. Bununla birlikte, 3 kHz ile 300 GHz arasındaki frekans aralığını kapsayan RF bölgesindeki EM enerjinin sağlık üzerindeki etkilerine dair yapılan araştırmalar sınırlı sayıdadır.

Gelişen teknoloji ile birlikte sanal gerçeklik cihazlarının kullanımının daha da yaygınlaşacağı düşünüldüğünde, gözün maruziyet analizlerinin gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmanın ana amacı, sanal gerçeklik (VR) gözlüğü takan gerçekçi bir kafa modelinin yeni nesil mobil haberleşme frekanslarındaki elektromanyetik dalgalara maruz kaldığında göz dokusundaki SAR ve elektrik alan dağılımının sayısal analizidir. Elektrik alan ve SAR değerlerini elde etmek için EM dalgalarının yayılımı denklemlerinin sayısal çözümü kullanılmıştır.

A. Kafa ve VR Gözlük Modeli

VR gözlükten yayılan elektromanyetik radyasyonun kullanıcının gözleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, 3D gerçekçi insan kafa ve göz modeli kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterilen ve çalışmada kullanılan insan kafası modelinin anatomik ve morfolojik özellikleri, 176 cm boyunda ve 69 kg ağırlığında 38 yaşında bir erkeğe karşılık gelmektedir.

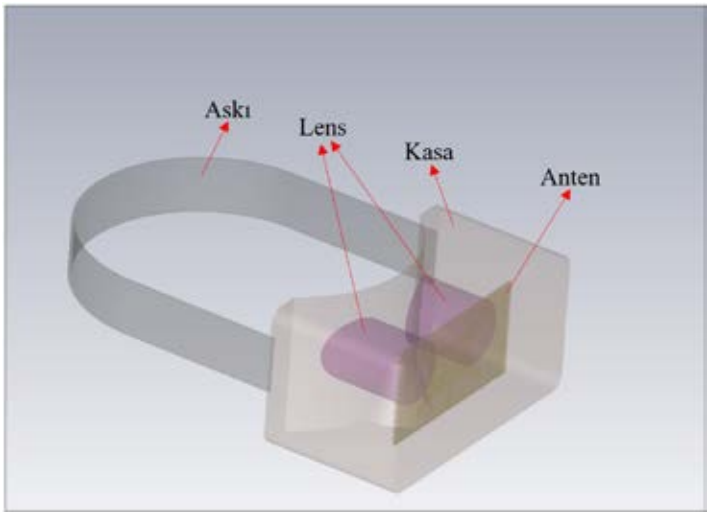


Şekil 1: Kullanılan kafa modeli ve katmanları

Dokuların dielektrik özellikleri elektromanyetik emilimi etkilemekte ve doku katmanlarınca soğrulan elektromanyetik enerji SAR değerlerini değiştirmektedir. Çalışmada modellenen dokuların 2,4 GHz frekansındaki dielektrik sabiti ve elektriksel iletkenlik değerleri, [22]'den alınmıştır.

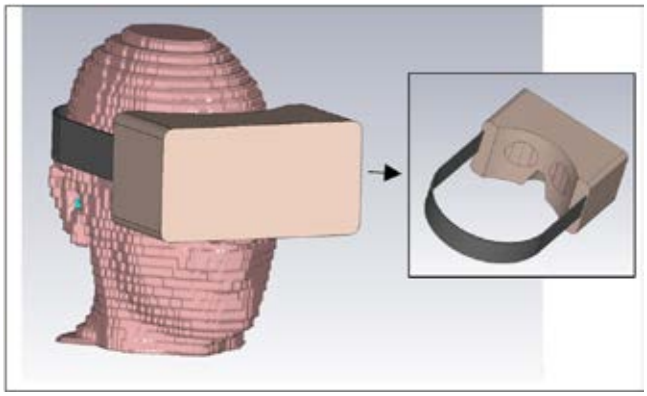
İnsan gözündeki elektrik alan ve SAR dağılımı için en doğru sonuçları elde etmek amacıyla, VR gözlüklerinin 3D modeli oluşturulmuştur. VR gözlüğünün içinde 2,4 GHz frekans için 1 W çıkış gücü olan bir anten modellenmiştir.

Sanal gerçeklik gözlüğü modeli Şekil 2'de gösterildiği gibi dört parçadan oluşmaktadır. İlk parça 2,4 GHz frekansında ışıma yapan tek bantlı bir mikro şerit yama antenidir. Diğer parçalar ise polikarbonattan yapılmış kasa, mikadan yapılmış lens ve elastik malzemeden yapılmış askıdır.



Şekil 2: VR gözlüğün parçaları

VR gözlük modelinin yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir. Model içerisindeki VR gözlüklerinin elektromanyetik alanının dağılımını belirlemek için, sonlu integrasyon tekniğine (FIT) dayanan CST Microwave Studio yazılımı kullanılmıştır. Simülasyon, CST paketine dahil olan geçici çözücü (transient solver) kullanılarak zaman alanında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3: VR gözlük modeli

Herhangi bir hesaplamadan önce, modelin ortamdaki EM dalga yayılımını tanımlayan uygun sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, "open (add space)" sınır koşulları uygulanmıştır [15].

B. SAR Hesabı

Elektromanyetik dalga, EM radyasyon kaynağından, yani antenden insan vücuduna yayıldığında, biyolojik dokular EM dalgaların enerjisini soğurur. EM dalgalar ile biyolojik dokular arasındaki bu etkileşim, SAR ile tanımlanabilir. SAR, dokunun EM radyasyon kaynağından (bu çalışmada VR gözlük) yayılan radyo-frekans (RF) enerjisini soğurmasının bir ölçüsüdür. SAR, EM radyasyon kaynağının RF maruziyetini ölçmek için doğrudan bir fikir sağlar. Elde edilen sonuçların uluslararası kuruluşlarca belirlenen limit değerleri sağlaması beklenmektedir [23].

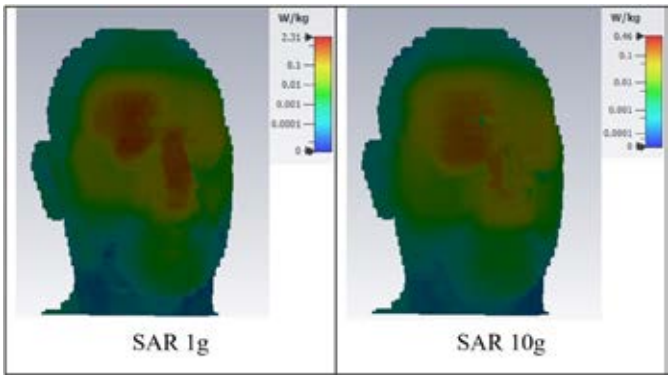
Elektromanyetik dalgalar biyolojik dokularda yayılırken, bu dokulara enerji aktarırlar ve bu enerji emilimi olan SAR, aşağıdaki Denklem (1) ile ifade edilebilir:

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

Burada **E** dokudaki elektrik alanının genliği (V/m), σ elektriksel iletkenlik (S/m) ve ρ ise doku kütle yoğunluğudur (kg/m^3).

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada elektromanyetik maruziyet için söz konusu model, 2,4 GHz çalışma frekansında, yaklaşık otuz üç milyon ağ hücresi sayesinde 1 g ve 10 g ortalama doku için simüle edilmiştir. Kafa modelinde VR gözlükten kaynaklı indüklenen 1 g ve 10 g SAR değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



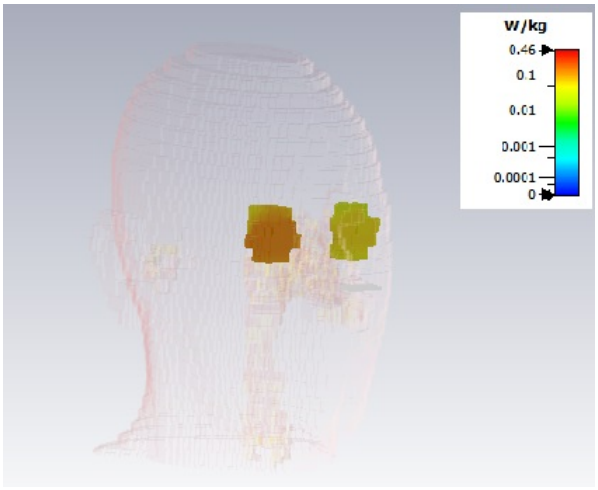
Şekil 4: Modelin 1 g ve 10 g kütleli SAR analizi

Göz dokusunda 1 g ve 10 g ortalama kütleli SAR değerleri sırasıyla 2,31 W/kg ve 0,46 W/kg olarak hesaplanmıştır. Modelin göz dokusunda en yüksek elektrik alan şiddeti 24 V/m olarak elde edilmiştir.

ICNIRP limit değerleri belirlerken 10 g kütleli SAR değerleri göz önünde bulundurulmaktadır. Çalışmada göz dokusu için elde edilen 10 g SAR sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir. Hesaplamalar sonucunda en yüksek 0,46 W/kg olarak ölçülen bu değer, genel halk sağlığı için 2 W/kg olarak izin verilen limit değerin altındadır.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, yeni nesil mobil haberleşme frekanslarını kullanan sanal gerçeklik gözlüğünün modellenmesi ve sayısal simülasyonu yoluyla, insan göz dokusunda meydana getirdiği SAR ve elektrik alanı dağılımı ele alınmıştır. Bu sayede, günümüzde yaygın olarak kullanılan giyilebilir teknolojilerden olan VR gözlüklerin elektromanyetik maruziyeti incelenmiştir. Cihazın çalışma frekansı 2,4 GHz olduğunda, gözün ortalama



Şekil 5: Goz dokusu 10 g kütleli SAR analizi

1 g ve 10 g kütleli ortalama SAR değerinin 2,31 W/kg ve 0,46 W/kg olduğu elde edilmiştir. Bu değerler ICNIRP tarafından 10 g kütle için belirlenen 2 W/kg'lık referans elektromanyetik maruziyet limit değerinin altındadır. Ancak, bu çalışmada yalnızca elektromanyetik kaynağın anteninin insan yüz modeline paralel yerleştirildiği durum için güvenlik limitleri incelenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda, kaynağın farklı polarizasyonlarda (E-polarize veya H-polarize) ışıması durumunda insan dokusundaki SAR dağılımının incelenmesi planlanmaktadır. Mobil haberleşmenin gelişimi ile birlikte, cep telefonu yapılarının tasarımı ve yeni malzemelerin ortaya çıkması, hassas dokulardaki elektromanyetik maruziyeti açısından dikkate değerdir. Bununla birlikte, elektromanyetik enerjinin ısı transferi ve devamlılığı üzerine yapılacak daha fazla çalışma, cep telefonlarının, VR gözlüklerin ve yeni nesil elektronik cihazların insan dokuları üzerindeki etkilerinin ele alınması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] Elmaadawyi, S., and Jornet, J. M., "The Thermal Impact of Wireless Sub-Terahertz Radios on the Human Eye in Next-Generation Extended Reality Headsets," *IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, pp. 1-6. 2023.

[2] Dirik, E. Y., Ateş, K., İl, N., and Özen, Ş. Günlük Yaşam Alanlarındaki Yüksek Frekaslı Elektromanyetik Alanların İncelenmesi ve Maruziyet Analizi, *Akdeniz Mühendislik Dergisi*, 2(1): 24-34, 2024.

[3] Gökçek-Saraç, Ç., Akçay, G., Karakurt, S., Ateş, K., Özen, Ş., and Derin, N. "Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats", *Electromagn. Biol. Med.*, 40(1): 179-190, 2021.

[4] Güneş, M., Ateş, K., Yalçın, B., Akkurt, S., Özen, Ş., and Kaya, B. "An Evaluation of the Genotoxic Effects of Electromagnetic Radiation at 900 MHz, 1800 MHz, and 2100 MHz Frequencies with a SMART Assay in Drosophila Melanogaster", *Electromagn. Biol. Med.*, 40(2): 254-263, 2021.

[5] Gökçek-Saraç, Ç., Çetin, E., Ateş, K., Özen, Ş., and Karakurt, S., "Different Duration of Exposure to a Pulsed Magnetic Field can Cause Changes in mRNA Expression of Apoptotic Genes in Oleic Acid-Treated Neuroblastoma Cells", *Int. J. Radiat. Biol.*, 1-10, 2024.

[6] Polat, L. N. Ö., Özen, Ş., Ateş, K., and Keskin, H. İ., "Investigation of the Exposure to Electromagnetic Fields in the Body with Metallic Orthopedic Implant", *2019 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO)*, pp. 1-4, October 2019.

[7] Ateş, K., Carlak, H. F., and Özen, Ş., "Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation using an Electromagnetic Shielding technique", *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, 28(3): 1672-1682, 2022.

[8] Ateş, K., Carlak, H. F., and Özen, Ş., "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, August 2016.

[9] Erol, M., Ateş, K., and Özen, Ş., "Elektrikli Araçlarda Kablosuz Güç Transferi Sistemi Tasarımı ve Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Değerlendirilmesi", *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1): 605-618, October, 2019.

[10] Ateş, K., Özen, Ş., and Carlak, H.F., "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)*, pp. 642-645, November 2019.

[11] Li, Y., and Lu, M., "Study on SAR Distribution of Electromagnetic Exposure of 5G Mobile Antenna in Human Brain", *Journal of Applied Science and Engineering*, 23(2): 279-287, 2020.

[12] Cvetković, N., Krstić, D., Stanković, V., and Jovanović, D., "Electric field distribution and SAR inside a human eye exposed to VR glasses", *IET Microwaves Antennas Propag.*, 12(14): 2234-2240, 2018.

[13] Poungsri, P., Pechrkool, T., Pruksanubal, A., and Akkaraekthalin, P., "Prediction of SAR of Electromagnetic Radiation due to Virtual Reality Headsets in the Human Head", *Przeglad Elektrotechniczny*, pp. 173-177, 2020.

[14] Jovanović, D. B., Stanković, V. B., Živaljević, D. U., Cvetković, N.N., Vučković, D. D., and Hederić, Z. D., "Glasses Influence on the Eyes Exposed to 2.45 GHz Electromagnetic Radiation", *15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, pp. 157-160, 2021.

[15] İl, N., Ateş, K., and Özen, Ş., "Electromagnetic Field Exposure to Human Head Model with Various Metal Objects at Sub-6 GHz Frequencies", *Electromagn. Biol. Med.*, 42(3): 114-122. 2023.

[16] Barnes, F. S., Greenebaum, B., *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields - Two Volume Set (3rd ed.)*, CRC Press, 2006.

[17] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)", *Health Phys.*, 118(5): 483-524, 2020.

[18] IEEE, 2012. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C95.1-2019*, C95.1-2019, 2019.

[19] Funahashi, D., Hirata, A., Kodera S., and Foster, K. R., "Area-Averaged Transmitted Power Density at Skin Surface as Metric to Estimate Surface Temperature Elevation", *IEEE Access*, 6: 77665-77674, 2018.

[20] Ren, Z., Fu, X., Dong, K., Lai, Y., and J. Zhang, "Advanced Study of Optical Imaging Systems for Virtual Reality Head-Mounted Displays", *Photonics*, 10(5): 555, pp. 1-15, 2023.

[21] Elmeadawy, S., and Shubair, R. M., "6G Wireless Communications: Future Technologies and Research Challenges," *2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, pp. 1-5, 2019.

[22] Hasgall, P.A., Di Gennaro, F., Baumgartner, C., Neufeld, E., Lloyd, B., Gosselin, M.C., Payne, D., Klingenböck, A. and Kuster, N., IT'IS Database for Thermal and Electromagnetic Parameters of Biological Tissues, Version 4.1.[(accessed on 15 July 2024)]; https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties.

[23] İl, N., Yeni Nesil Haberleşme Sistemlerinin Neden Olduğu Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Modellenmesi ve İncelenmesi. *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, 2024