

Biyobozunur Kraniyal İmplantlarda Kemik Yenilenme Sürecinin Beden Üstü Yarık Anten ile Takibi

Mahdi Salimitorkamani, Burak Ferhat Özcan, Sema Dumanlı

Bogazici Üniversitesi

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Istanbul-Turkey

mahdi.salimitorkamani@pt.bogazici.edu.tr, burak.ozcan@std.bogazici.edu.tr, sema.dumanli@bogazici.edu.tr

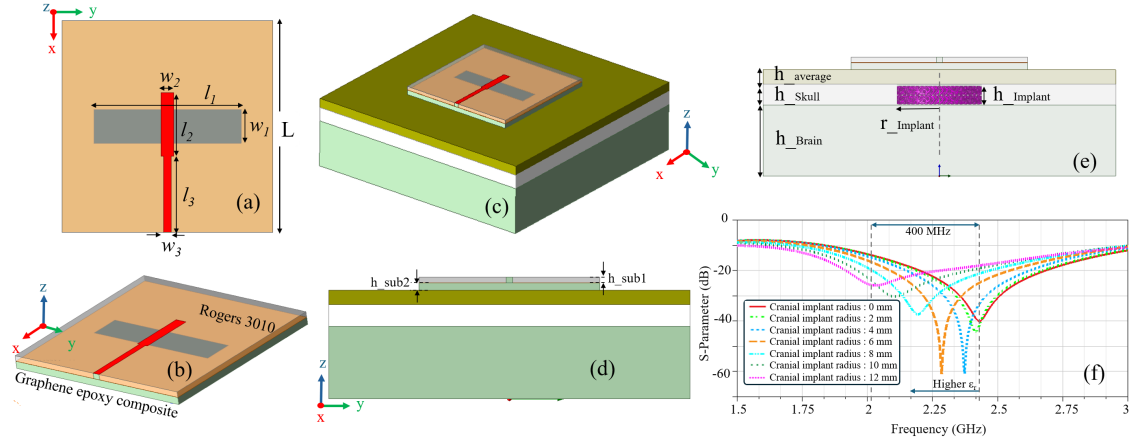
Özet: Bu çalışmada, kraniyal implantların biyobozunması ve kemik yenilenme sürecinin sürekli takibini sağlamak amacıyla bir yarık anten önerilmektedir. Anten tasarımı, alttaş olarak Rogers 3010 ve üsttaş olarak yüksek dielektrik sabitine sahip esnek bir polimer malzeme kullanılmıştır. Önerilen yarık anten, 2.4 GHz ISM bandında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Elektromanyetik benzetim ortamında, deri, kafatası ve beyin katmanlarından oluşan üç katmanlı bir kafa modeli kullanılmış ve anten, deri dokusu üzerine yerleştirilmiştir. Kafatası kemiğine 12 mm yarıçapında biyobozunur kafes yapılı bir kraniyal implant yerleştirilmiş ve implant, gerçekçi ameliyat sonrası koşulları modellemek amacıyla beyin omurilik sıvısı ile çevrelenmiştir. İmplant yarıçapının 12 mm'den 0 mm'ye azaltılmasıyla kemik yenilenmesi ve implantın erimesi süreci modellenmiştir. Bu süreçte, implant bölgesinin efektif bağıl dielektrik sabitinde iyileşmeye bağlı olarak değişim gözlenmiştir; bu değişim sonucunda beden üstü antenin rezonans frekansında 2.03 GHz'den 2.43 GHz'e kadar toplamda 400 MHz'lik bir kayma meydana gelmiştir. Böylece, önerilen sistemin kraniyal iyileşme sürecini izleyebilme potansiyeli ortaya konulmuştur.

Abstract: In this study, a slot antenna is proposed to enable continuous monitoring of the biodegradation of cranial implants and the associated skull bone regeneration process. The antenna design incorporates Rogers 3010 as the substrate and a high-permittivity flexible polymer as the superstrate. The proposed antenna operates within the 2.4 GHz ISM band. In the simulation environment, a three-layer head model consisting of skin, skull, and brain tissues is used, with the antenna positioned above the skin. A biodegradable lattice-structured cranial implant with a radius of 12 mm is embedded into the skull and surrounded by cerebrospinal fluid to emulate realistic post-operative conditions. The implant radius is gradually reduced from 12 mm to 0 mm to simulate the process of bone regeneration and implant degradation. As the defect heals, the effective relative permittivity of the implanted region changes accordingly. This change causes the resonance frequency of the on-body antenna to shift upward from 2.03 GHz to 2.43 GHz, yielding a total frequency shift of 400 MHz and enabling real-time tracking of the healing process.

1. Giriş

Kafatası implantları, travma, cerrahi müdahaleler veya konjenital anomaliler sonucu oluşan kraniyal deformasyonların onarılması amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Titanyum, tıbbi sınıf polimerler ve biyobozunur kompozitler gibi biyouyumlu malzemelerden üretilen bu implantlar, hem kafatasının yapısal bütünlüğünü sağlamakta hem de beyin dokusunu dış etkenlere karşı korumaktadır. Son yıllarda, polilaktik asit (PLA), poliglikolik asit (PGA) ve poli(D,L-laktik asit) (PDLA) gibi kemik rejenerasyonunu destekleyen biyobozunur malzemeler ön plana çıkmıştır. Bu biyobozunur implantlar sayesinde kalıcı implantlara duyulan gereksinim önemli ölçüde azalmıştır [2]. Ayrıca, bu implantların hastaya özgü anatomik yapıya uygun olarak üretilebilmesi, üç boyutlu (3B) baskı teknolojileri sayesinde mümkün hâle gelmiştir.

Kemik yenilenme sürecinin takibi, kraniyal implantların yerleştirilmesinden sonra ameliyat bölgesinde oluşabilecek komplikasyonların önlenmesi ve tedavi sürecinin izlenmesi açısından kritik öneme sahiptir [3]. Bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve kemik sintigrafisi gibi geleneksel yöntemler yüksek çözünürlük sunmakla birlikte; yüksek maliyet, iyonize radyasyon riski, işlem süresinin uzunluğu ve hamile bireyler için kullanım sınırlamaları gibi çeşitli dezavantajlara sahiptir [4, 12]. Bu nedenle, iyonize olmayan ve düşük maliyetli mikrodalga tabanlı izleme yöntemlerine olan ilgi artmaktadır [5, 6, 7, 8]. Deri, kemik, beyin, kafatası gibi biyolojik dokular ile biyobozunur implant arasında belirgin bağıl dielektrik sabiti farklılıkları bulunmaktadır. Beden üzerine yerleştirilen okuyucu anten, kraniyal implantın biyobozunma süreci boyunca bu bağıl dielektrik sabitindeki değişimleri izleyerek tedavi sürecinin takibini mümkün kılmaktadır. Güncel çalışmalar, bu amaç doğrultusunda esnek ve biyouyumlu anten yapılarını implantlarla entegre etmenin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Literatürde; enfeksiyon, pH ve sıcaklık gibi biyolojik parametrelerin takibine yönelik biyosensör-



Şekil 1. (a–b) Yarık anten geometrisi, (c–d) elektromanyetik benzetim modeli, (e) biyobozunur kraniyal implant modeli ve boyutları, (f) kraniyal implant bozunmasına bağlı yansıma katsayıları. Tüm tasarım parametreleri mm cinsindendir. $L = 50$, $w_1 = 1.8$, $w_2 = 3$, $l_1 = 35$, $l_2 = 15$, $l_3 = 18$, $h_{sub1} = 1.58$, $h_{sub2} = 2$, $h_{Skin} = 4$, $h_{Skull} = 6$, $h_{Brain} = 20$, $r_{Implant} = 22$, $h_{Implant} = 5$.

ler [13], PLA yapıyı yapay kemik malzemelerinin erime davranışını izleyen manyetoelastisite tabanlı sensörler [14] ve yapay zekâ destekli izleme sistemleri [15] gibi çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Ayrıca, literatürdeki mikrodalga sistemleri yansıma ve iletim katsayılarının analizi yoluyla osteoporoz ve kırık teşhisi gibi kemik dokularının takibi gerçekleştirilmektedir [16]. Kafatası görüntüleme ve iyileşme takibine odaklanan çalışmalarda kullanılan tek boyutlu darbe radar teknikleri [9], kısa darbe radar sistemleri [10] ve direnç yüklü dipol antenlerle geliştirilen ultra geniş bant (UWB) sensörler [11] öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, biyobozunur kafatası implantlarının kemikle bütünleşme sürecinin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi amacıyla, 2.43 GHz frekansında çalışan bir yarık anten tasarlanmıştır. Biyobozunur implantın çapı 12 mm'den 0 mm'ye, 2 mm'lik adımlarla azaltılarak kemik yenilenme süreci benzetimlenmiştir. Bu değişime bağlı olarak, antenin rezonans frekansında toplamda 400 MHz'den fazla bir kayma gözlemlenmiştir.

2. Takip Mekanizması ve Elektromanyetik Benzetim Sonuçları

Kafatası kemiğinin yenilenme sürecini izlemek amacıyla tasarlanan beden üstü yarık anten, Şekil 1(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Antenin üsttaş tabakası, bağlı dielektrik sabiti yaklaşık $\epsilon_r = 12$ olan, grafit ile katkılanmış yüksek dielektrik sabitli esnek RTV silikondan üretilmiştir. Bu yapı, antenin bedenle teması sırasında kafatasının eğrisel yüzeyine uyum sağlamasını mümkün kılarak biyomekanik uyumluluğunu artırmaktadır. Deri, kafatası ve beyin dokularını içeren elektromanyetik benzetim modeli Şekil 1(c) ve (d)'de sunulmuştur. Kafatası dokusu içerisine, 12 mm yarıçapında biyobozunur bir kraniyal implant yerleştirilmiştir; implantın kafes yapısında bulunan boşlukların beyin omurilik sıvısı ile dolu olduğu varsayılmıştır. Bu yapı Şekil 1(e)'de gösterilmektedir. İmplantı oluşturan polimer malzemenin bağlı dielektrik sabiti, 2.4 GHz frekansında DAK 3.5 dielektrik ölçüm kiti kullanılarak ölçülmüş ve $\epsilon_r \approx 2.5$ olarak alınmıştır. Deri, kemik ve beyin dokularına ait bağlı dielektrik sabiti değerleri ise IT'IS Foundation veri tabanından temin edilmiştir. Bu sistemde, kemik dokusu, biyobozunur implant ve implantı çevreleyen beyin omurilik sıvısı arasındaki bağlı dielektrik sabiti farkı sayesinde osseointegrasyon süreci izlenebilmektedir.

Şekil 1(f)'de sunulan elektromanyetik benzetim sonuçları, biyobozunur kraniyal implantın yarıçapındaki değişimin antenin rezonans frekansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Kademeli kemik yenilenme sürecini modelleyebilmek amacıyla, implant yarıçapı 12 mm'den 0 mm'ye kadar 2 mm'lik adımlarla azaltılmıştır. İmplantın tamamen erimesi ve yerinin kemik dokusuyla dolması sürecinde, antenin rezonans frekansı 2.03 GHz'den 2.43 GHz'e kadar kademeli olarak artmakta ve toplamda 400 MHz'lik bir frekans kayması gözlemlenmektedir. Bu artış, implant bölgesinin efektif bağlı dielektrik sabitinde meydana gelen azalmadan kaynaklanmaktadır. Başlangıçta yüksek bağlı dielektrik sabitine sahip sıvı ile çevrili biyobozunur implant, zamanla yerini daha düşük bağlı dielektrik sabitine sahip yenilenmiş kemik dokusuna bırakmakta; bu değişim antenin elektromanyetik alan dağılımını etkileyerek rezonans frekansının yukarı yönde kaymasına neden olmaktadır.

3. Sonuç

Bu çalışmada, biyobozunur kraniyal implantlar ile kafatası kemiği yenilenme sürecinin gerçek zamanlı izlenmesini amaçlayan, 2.43 GHz'de çalışan bir beden üstü yarık anten tasarımı sunulmuştur. Elektromanyetik benzetimlerde, deri, kafatası ve beyin dokularını içeren üç katmanlı bir kafa fantomu üzerine yerleştirilen ve cerrahi sonrası koşulları taklit etmek üzere sıvı ile çevrili 12 mm yarıçapında biyobozunur bir implant modellenmiştir. Kemik yenilenmesini simüle edebilmek amacıyla, implant yarıçapı 12 mm'den 0 mm'ye kadar 2 mm'lik adımlarla kademeli olarak azaltılmış ve bu değişim sonucunda antenin rezonans frekansında 2.03 GHz'den 2.43 GHz'ye kadar toplamda 400 MHz kayma gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan antenin kraniyal implantın biyobozunumunu ve kemik dokusuyla bütünleşme sürecinin kablosuz ve gerçek zamanlı takibinin yapılabildiğini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] J. Li, C. Gsaxner, A. Pepe, A. Morais, V. Alves, G. von Campe, J. Wallner, and J. Egger, "Synthetic skull bone defects for automatic patient-specific craniofacial implant design," *Scientific Data*, vol. 8, no. 1, p. 36, 2021.
- [2] S. Shaikh, R. Ghosh, A. H. Pandit, S. Mehrotra, and A. Kumar, "Recent Advances in Biodegradable Implants in Bone Tissue Engineering," in *Emerging Materials and Technologies for Bone Repair and Regeneration*. CRC Press, 2025, pp. 109–128.
- [3] M. D. Perez et al., "Preliminary study on microwave sensor for bone healing follow-up after cranial surgery in newborns," in *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*. IET, 2018, p. 891.
- [4] A. Mangrulkar, S. B. Rane, and V. Sunnapwar, "Automated skull damage detection from assembled skull model using computer vision and machine learning," *International Journal of Information Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 1785–1790, 2021.
- [5] M. Särestöniemi, D. Singh, M. von und zu Fraunberg, and T. Myllylä, "Microwave Technique for Linear Skull Fracture Detection—Simulation and Experimental Study Using Realistic Human Head Models," *Biosensors*, vol. 14, no. 9, p. 434, 2024.
- [6] J. EbrahimiZadeh, M. D. Perez, and R. Augustine, "Electromagnetic Time-Reversal Technique for Monitoring Skull Healing Stages," in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [7] G. G. Thomas, *Extraction of Follow-up Parameters of Bone Density Microwave Sensor from Post Craniotomy and Lower Extremity Trauma Rehabilitation Measurements*, Master's thesis, 2017.
- [8] V. Mattsson, *Clinical Data Analysis for Conceptual Proof of Microwave Bone Healing Monitoring System for Craniosynostosis Patients*, Master's thesis, 2018.
- [9] D. Lee, G. Shaker, D. Nowinski, and R. Augustine, "Monitoring of Healing Progression of Cranial Vault using One-dimensional Pulsed Radar Technique," in *2018 IEEE International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*. IEEE, 2018, pp. 64–66.
- [10] D. Lee, J. Velander, D. Nowinski, and R. Augustine, "A preliminary research on skull healing utilizing short pulsed radar technique on layered cranial surgery phantom models," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 84, pp. 1–9, 2018.
- [11] D. Lee, D. Nowinski, and R. Augustine, "A UWB sensor based on resistively-loaded dipole antenna for skull healing on cranial surgery phantom models," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 4, pp. 897–905, 2018.
- [12] P. Mathur, D. G. Kurup, and R. Augustine, "Design of open ended circular waveguide for non-invasive monitoring of cranial healing in pediatric craniosynostosis," in *2017 First IEEE MTT-S International Microwave Bio Conference (IMBIOC)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [13] E. G. SanVicente et al., "Implantable Sensors and Biosensors to Monitor Bone Regeneration: Wireless Smart System for on-Line Monitoring of pH, Temperature, Strain Sensors and TGFβ1 During Bone Healing," in *2023 IEEE SENSORS*. IEEE, 2023, pp. 1–4.
- [14] K. Yu, L. Ren, Y. Tan, and J. Wang, "Wireless magnetoelasticity-based sensor for monitoring the degradation behavior of polylactic acid artificial bone in vitro," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4, p. 739, 2019.
- [15] A. Aldelemly et al., "Monitoring bone healing: Integrating RF sensing with AI," *IEEE Access*, 2024.
- [16] M. S. Hossen et al., "Revolutionizing Osteoporosis and Bone Fracture Diagnostics: The Emergence of Microwave Antenna Technology," *IEEE Access*, 2024.