

Yagi-Uda Anten Tabanlı Epidermal Gerinim Sensörü

Burak Ferhat Özcan, Sema Dumanlı
Boğaziçi Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği
İstanbul

burak.ozcan@std.bogazici.edu.tr, sema.dumanli@bogazici.edu.tr

Özet: Malzeme ve üretim tekniklerindeki gelişmeler, mikrodalga sensörler için yeni tasarım olanakları ve uygulamalar sunmaktadır. Bu çalışmada, kas kasılmasının girişimsel olmayan bir yöntemle tespiti için Yagi-Uda anten tabanlı bir gerinim sensörü sunulmaktadır. Beden üzerindeki gerinimi izlemek amacıyla, $35\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ boyutlarında esnek bir alttaş kullanılmaktadır. Deri üzerindeki her % 10'luk gerinim artışı, primer ve parasitik dipoller arasındaki mesafenin 0.1 mm artmasına neden olmaktadır. 2.4 GHz ISM bandında çalışan Yagi-Uda tabanlı anten, % 0 ile % 30 arasındaki gerinim seviyelerini, antenin rezonans frekansında her % 10'luk artış için en az 20 MHz kayma ile takip edebilmektedir.

Abstract: Advances in materials and production techniques create new design possibilities and applications for microwave sensors. In this work, the design of a Yagi-Uda based antenna as a strain sensor for non-invasive muscle contraction detection is presented. To monitor epidermal strain, a highly flexible polyurethane substrate measuring $35\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ is utilized. For every 10 % increase in skin strain, the separation between the primary and parasitic dipole elements increases by 0.1 mm. The proposed Yagi-Uda-based antenna operates within the 2.4 GHz ISM band and is capable of tracking strain levels ranging from 0 % to 30 % through a minimum 20 MHz shift in its resonant frequency for each 10 % increment.

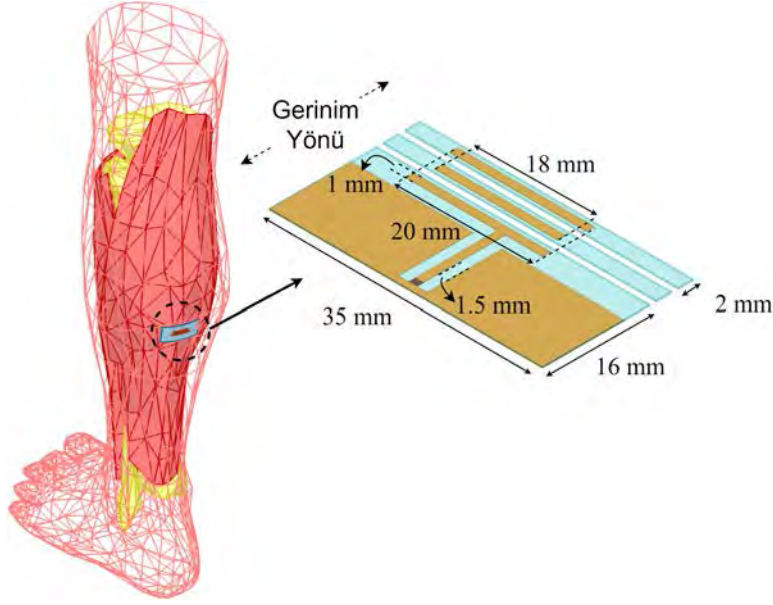
1. Giriş

Sağlık teknolojileri alanındaki gelişmeler, özellikle insan hareketi ve kas dinamikleriyle ilişkili fizyolojik parametrelerin izlenmesine yönelik yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine olan ilgiyi artırmıştır [1]. Farklı aktiviteler sırasında kasların maruz kaldığı gerinimin izlenmesi, biyomekanik performansın değerlendirilmesi; yaralanmaların tespiti ve rehabilitasyon stratejilerinin eniyileştirilmesi açısından önemlidir. Literatürde kas kasılması ve insan hareketlerinin takibi çeşitli sensörler kullanılmaktadır.

Bu bağlamda en yaygın kullanılan sensör, kas kasılması sırasında üretilen elektriksel sinyallerini kullanarak kas aktivasyonunu takip eden elektromiyografi (EMG)'dir [2]. Bunun yanı sıra, piezorezistif sensörler [3], iletken nanokompozitler [4] ve mikrodalga sensörleri [5] gibi farklı sensör türleri de insan hareketlerinin takibi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, deri üzerindeki gerinimi kas kasılma düzeyiyle ilişkilendiren bir anten sensör yaklaşımı benimsenmiştir. Sensör tasarımı, deri üzerindeki gerinim, beden üzerinde yer alan antenin yapısında fiziksel bir değişime dönüştürülmekte ve bu da antenin giriş empedansını değiştirmektedir. Literatürde esnek alttaş ve iletken malzemeler kullanılarak geliştirilen farklı anten ve mikrodalga sensör modelleri bulunmaktadır [5, 6]. Örneğin, kas kasılmasının tespiti amacıyla RTV silikon alttaş üzerine tasarlanmış eş düzlemli dalga kılavuzu beslemeli bir frekans filtresi mevcuttur [5]. Benzer şekilde, esnek poliüretan alttaş üzerine basılmış bir papyon (bowtie) anten yapısı, deri üzerindeki gerinimi takip etmek için önerilmiştir [6]. Bu çalışmada ise, daha önce gerinim takibi için önerilen Yagi-Uda anteninin [7] deri üzerindeki gerinim takibi için uyarlanması sunulmaktadır. Esnek poliüretan alttaş üzerine tasarlanan Yagi-Uda tabanlı sensör insan baldırına yerleştirilmiştir. Algılama mekanizması Bölüm 2'de açıklanmıştır. Elektromanyetik benzetim sonuçları ise Bölüm 3'te sunulmuştur. Çalışma, Bölüm 4 ile tamamlanmaktadır.

2. Algılama Mekanizması

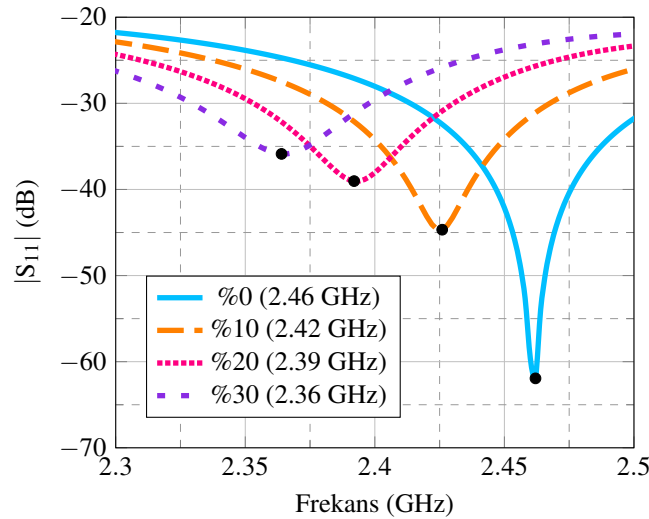
Gerinim sensörü, kas kasılmalarının girişimsel olmayan bir yöntemle tespit edilmesini hedefleyerek tasarlanmıştır. Bunun için sensörde, alttaş malzemesi olarak yüksek esnekliğe sahip termoplastik poliüretan (TPU) tercih edilmiştir. TPU, olağanüstü esnekliğiyle bilinmektedir. Bu özellikler sensörün beden hareketlerine uyum sağlaması ve epidermal bir sensör olarak işlev görebilmesi açısından vazgeçilmezdir [8]. Şekil 1'de tasarlanan Yagi-Uda anten tabanlı gerinim sensörü gösterilmektedir. Anten, primer dipol olarak görev yapan eş düzlemli dalga kılavuzu beslemeli bir dipol ve iki adet parasitik dipolden oluşmaktadır. Eş düzlemli dalga kılavuzunun boyutları karakteristik empedansı $50\text{ }\Omega$ olacak şekilde eniyileştirilmiş olup tüm iletken bileşenler, $50\text{ }\mu\text{m}$ kalınlığında bakır levhalar



Şekil 1. Gerinim sensörünün elektromanyetik benzetim modeli ve mm cinsinden boyutlandırılması.

olarak tasarlanmıştır. Bu iletken bileşenler, her biri 100 μm kalınlığında iki TPU alttaş arasına sandviç edilmiştir. Alttaş malzemesinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2.7$ kabul edilmiştir [9]. Alttaş malzemesinin esnek bir polimer malzeme seçilmesine ek olarak, kas kasılmalarının deri üzerindeki etkisinin doğrudan izlenebilmesini sağlamak amacıyla, Yagi-Uda anteninin primer ve parasitik dipolleri arasındaki alttaş bağlantısı kaldırılmıştır. Dipol yapıları arasında herhangi bir yapısal bağlantının bulunmaması sayesinde, kas kasılmalarının neden olduğu gerinim doğrudan dipol elemanları arasındaki mesafeyi etkilemekte, bu mesafedeki artış ise antenin çalışma frekansında kaymalara yol açmaktadır. Böylece, alttaş malzemesinin esnekliğinin ölçüm üzerindeki etkisi ortadan kaldırılarak, gerinim yalnızca cilt yüzeyindeki fiziksel deformasyonlara bağlı olarak algılanmaktadır.

3. Elektromanyetik Benzetim Sonuçları



Şekil 2. Yagi-Uda anteninin farklı gerinim seviyeleri altındaki yansıma katsayıları.

Yagi-Uda antenin farklı gerinim durumları altındaki elektromanyetik benzetimlerinin gerçekleştirilebilmesi için, primer dipol ile parasitik dipol elemanları arasındaki mesafe 1.0 mm'den 1.3 mm'ye kadar, 0.1 mm adımlarla artırılmıştır. Gerinim koşulları, yürüyüş sırasında baldır kasının yaklaşık % 30 oranında uzadığına dair literatürde yer alan bilgiler esas alınarak belirlenmiştir [10]. Farklı gerinim seviyelerine karşılık gelen yansıma kat-

sayısı değerleri Şekil 2’de sunulmaktadır. Gerinim seviyesi arttıkça, primer ve parasitik dipol elemanları arasındaki mesafenin artması rezonans frekansında belirgin bir kaymaya neden olmaktadır. Dipol elemanları arasındaki mesafede gerçekleşen her 0.1 mm’lik artış, sensörün rezonans frekansında yaklaşık 20 MHz’lik bir kaymaya karşılık gelmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, kas kasılmasının girişimsel olmayan bir yöntemle takibi için esnek bir alttaş üzerine tasarlanmış Yagi-Uda anten tabanlı bir gerinim sensörü önerilmektedir. Antenin epidermal uyumluluğunu sağlamak amacıyla alttaş malzemesi olarak termoplastik poliüretan (TPU) kullanılmıştır. Alttaş yapısının tıbbi bant benzeri epidermal formu sayesinde anten doğrudan beden üzerine yapıştırılabilir. Primer ve parasitik dipoller arasında alttaş bağlantısının bulunmaması, deri üzerindeki gerinimin doğrudan sensöre aktarılmasını mümkün kılmıştır. Deri üzerindeki gerinim ile antenin çalışma frekansı arasındaki ilişki, antenin dipol elemanları arasındaki doğrudan kulpajın değişimine dayanmaktadır. Antenin farklı gerinim seviyelerine karşı duyarlılığı, elektromanyetik benzetim sonuçlarına göre her bir gerinim adımında rezonans frekansında en az 20 MHz’lik bir kayma gözlemlenerek ortaya konulmuştur. Gelecek çalışmalar kapsamında, Yagi-Uda anteninden kaynaklanan frekans kaymalarını izleyebilmek amacıyla giyilebilir ve esnek bir RF yansıma ölçüm devresinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] J. V. Basmajian and D. L. C. J., *Muscles Alive: Their Functions Revealed by Electromyography*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1985.
- [2] F. Bai and C. -M. Chew, "Muscle force estimation with surface EMG during dynamic muscle contractions: A wavelet and ANN based approach," 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, Japan, 2013, pp. 4589-4592, doi: 10.1109/EMBC.2013.6610569.
- [3] D. Esposito et al., "A Piezoresistive Sensor to Measure Muscle Contraction and Mechanomyography," *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2553, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/s18082553>.
- [4] Y. Zhao et al., "Highly sensitive flexible strain sensor based on threadlike spandex substrate coating with conductive nanocomposites for wearable electronic skin," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 3, p. 035004, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aaf3ce>.
- [5] Z. Attoun, N. Shafi, Y. Tawk, J. Costantine and E. Shammas, "Wearable Flexible Body-Adaptable Frequency Reconfigurable Filter for Muscle Contraction Monitoring," 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI), Portland, OR, USA, 2023, pp. 781-782, doi: 10.1109/USNC-URSI52151.2023.10237527.
- [6] H. Xu et al., "Flexible Gas-Permeable and Resilient Bowtie Antenna for Tensile Strain and Temperature Sensing," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 22, pp. 23215-23223, 15 Nov.15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3188265.
- [7] A. Salim, O. Niksan and M. H. Zarifi, "Kirigami Integrated Yagi-Uda Antenna for Strain Sensing in Biomedical Applications," 2023 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC), Leuven, Belgium, 2023, pp. 172-174, doi: 10.1109/IMBioC56839.2023.10305131.
- [8] Zhang, W., Liu, Q. and Chen, P. (2018) 'Flexible strain sensor based on carbon black/silver nanoparticles composite for human motion detection', *Materials*, 11(10), p. 1836. doi:10.3390/ma11101836.
- [9] K. Gurgar, G. Saini and B. S. Dhaliwal, "3D Printed Varying Infill Density Thermoplastic Polyurethane Substrate Based Flexible Antennas For IoT Applications," 2024 International Conference on Electrical Electronics and Computing Technologies (ICEECT), Greater Noida, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEECT61758.2024.10739151.
- [10] J. Rubenson, N. J. Pires, H. O. Loi, G. J. Pinniger, and D. G. Shannon, "On the ascent: the soleus operating length is conserved to the ascending limb of the force-length curve across gait mechanics in humans," *Journal of Experimental Biology*, vol. 215, no. 20, pp. 3539–3551, Jul. 2012, doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.070466>.