

## Kablosuz pH Algılama için Hidrojel Tabanlı İmplant Halhal Çınlaç

İpek Hilal Kacar, Burak Ferhat Özcan, Zeliha Cansu Canbek Özdi\*, Sema Dumanlı

Boğaziçi Üniversitesi

Elektrik Elektronik Mühendisliği

İstanbul

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

\*Yeditepe Üniversitesi

Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği

İstanbul

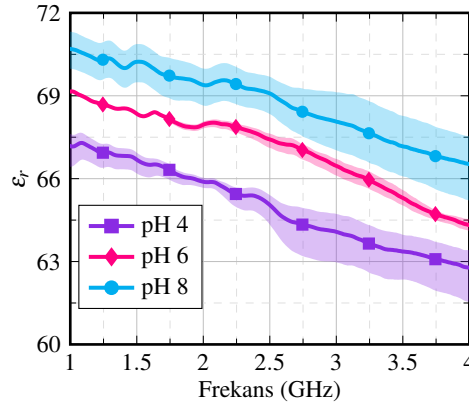
cansu.canbek@yeditepe.edu.tr

**Özet:** Bu çalışma, gerçek zamanlı beden içi pH takibi için geliştirilen pH'ye duyarlı, hidrojel tabanlı pasif bir implant çınlaç sistemini sunmaktadır. Hidrojin pH'ye bağlı değişen bağıl dielektrik ve iletkenlik katsayısı, yapının mikrodalga çınlaç olarak çalışmasını sağlar ve geniş bantlı beden-üstü okuyucu antenle kablosuz izlenebilir kılar. RFID temelli bu sistem, güç kaynağına gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Geliştirilen yapı, cerrahi sonrası enfeksiyon takibinde kritik olan fizyolojik pH değişimlerine yüksek duyarlılık göstermektedir. Deneysel bulgular, hidrojin dielektrik özelliklerinin pH ile birlikte tutarlı bir şekilde değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, hidrojel tabanlı sensörün yakın çevresindeki pH değişimlerinin, her 2 birimlik pH artışı için en az 5 MHz'lik rezonans frekansı kaymasıyla izlenebildiği gösterilmiştir.

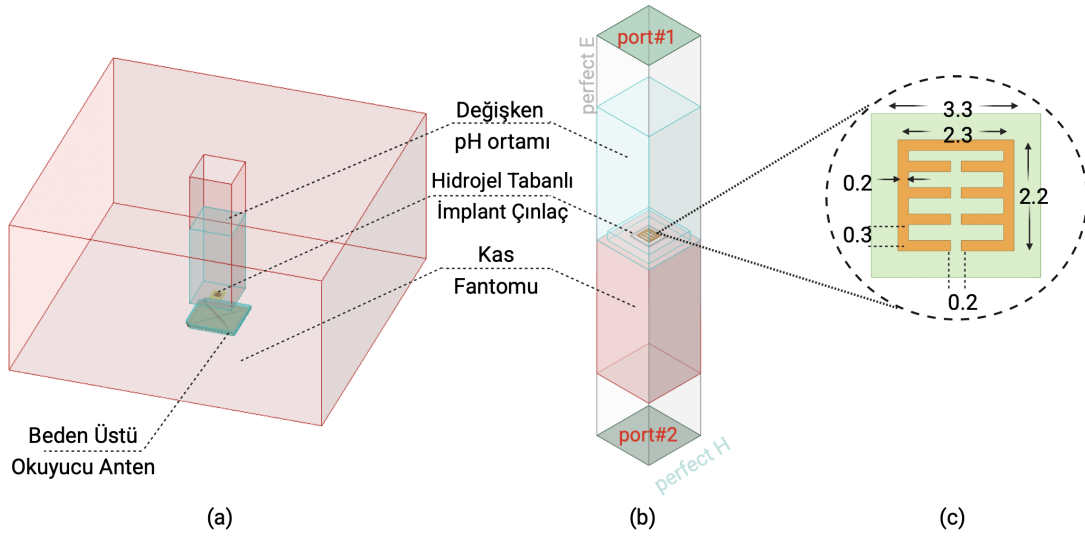
**Abstract:** This study presents a pH-sensitive, hydrogel-based passive implant resonator system developed for real-time in-body pH monitoring. The pH-dependent variations in the hydrogel's relative permittivity and conductivity enable the structure to function as a microwave resonator, allowing wireless tracking via a wideband on-body reader antenna. This RFID-based system eliminates the need for a power source inside the body. The proposed design exhibits high sensitivity to physiological pH variations, which are critical for post-surgical infection monitoring. Experimental results show that the dielectric properties of the hydrogel change consistently with pH. Furthermore, it was demonstrated that local pH variations around the hydrogel-based sensor can be tracked through a resonance frequency shift of at least 5 MHz for every 2-unit increase in pH.

### 1. Giriş

Beden merkezli algılama sistemleri, fizyolojik parametrelerin gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukla izlenmesini mümkün kılarak; erken teşhis, tedavi süreci takibi ve kişiselleştirilmiş sağlık uygulamalarında önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu çerçevede geliştirilen beden içi algılayıcılar; minyatür boyutları, biyoyumlu yapıları ve enerji verimliliği ile ön plana çıkan yenilikçi çözümler sunmaktadır [1]. Özellikle aktif bileşen içermeyen RFID tabanlı sistemler, batarya gerektirmeden çalışabildikleri için bedene entegrasyon sırasında invazivliği azaltır ve uygulama kolaylığı sunar. Bu tür yapılar, cerrahi sonrası enfeksiyonların (SSI) takibi gibi klinik açıdan kritik uygulamalarda etkin şekilde kullanılabilir. Enfekte dokularda gözlenen pH değişimleri, yaranın mikrobiyal durumu hakkında doğrudan bilgi sunar. Sağlıklı iyileşme sürecinde pH değeri genellikle 4.5–6 arasında seyretnmekteyken, enfeksiyon varlığında bu değer 6.5–8.5 seviyelerine çıkabilmektedir [2]. Geleneksel cam elektrotlu pH sensörleri laboratuvar ortamında yüksek hassasiyet sunsa da; kırılkan yapıları, sık kalibrasyon gereksinimleri ve sınırlı biyoyumlulukları nedeniyle in-vivo kullanıma elverişli değildir. Bu kısıtları aşmak amacıyla geliştirilen optik, elektrokimyasal ve transistör tabanlı sistemler arasında; fiber optik sensörler yüksek sıcaklık dayanımı [3], tümleşik katı-hal sensörler ise minyatürleştirme avantajı sağlamaktadır. Ancak, pH değişimlerinin pasif ve kablosuz biçimde, gerçek zamanlı olarak izlenmesine yönelik sistemlerin hâlâ yetersiz olduğu dikkat çekmektedir. Yüksek su tutma kapasitesine ve ayarlanabilir kimyasal yapıya sahip hidrojeller; ilaç salımı, yara örtüleri ve pH duyarlı sistemlerde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu çalışmada, pH'ye duyarlı hidrojel içerisine entegre edilmiş mikrodalga çınlaç yapısından oluşan pasif bir implant sistemi önerilmektedir. Batarya gerektirmeksizin çalışabilen bu yapı, uzun süreli kullanım için sürdürülebilirlik sunmakta; hidrojin pH'ye bağlı olarak değişen bağıl dielektrik ve iletkenlik katsayısı, rezonans frekansında kaymalara neden olarak beden-üstü anten aracılığıyla kablosuz pH takibini mümkün kılmaktadır. Sunulan tüm sonuçlar, elektromanyetik simülasyonlarla elde edilmiş teorik verilere dayanmaktadır.



Şekil 1. Hidrojin farklı pH seviyelerindeki bağıl dielektrik sabiti.



Şekil 2. Beden içi pH takibi için önerilen sistemin elektromanyetik simülasyon modelleri: (a) Beden-üstü okuyucu anten, kas fantomu ve değişken pH ortamından oluşan benzetim modeli; (b) Dalga kılavuzu modeli; (c) Hidrojel içine gömülü implant çınlaç yapısı ve boyutları (mm cinsinden).

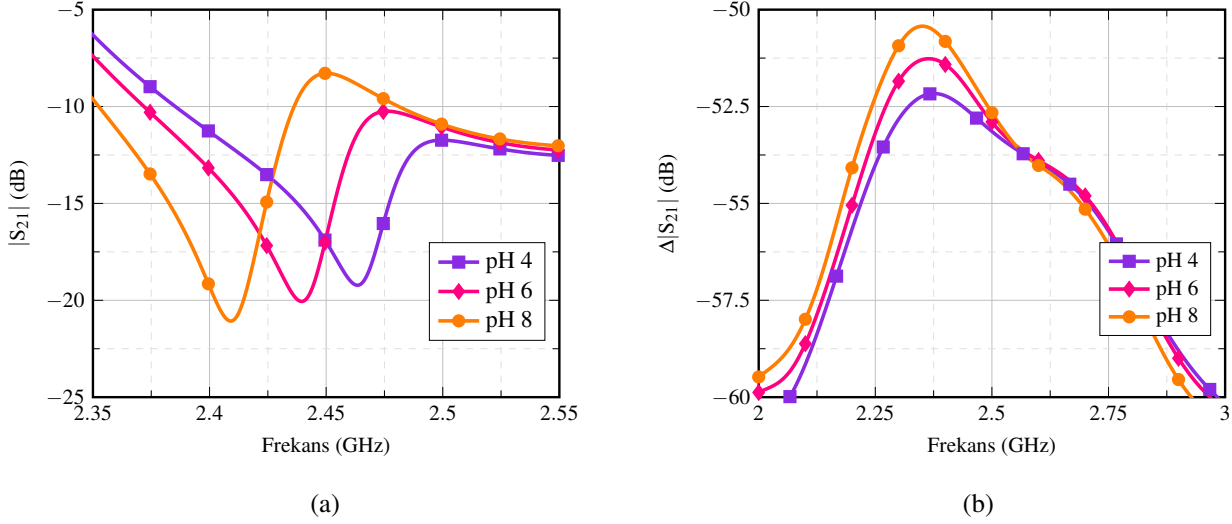
## 2. Hidrojin Üretimi ve Dielektrik Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan pH duyarlı hidrojel, akrilamid (AAM), akrilik asit (AAc) ve polietilenglikol diakrilat (PEGDA) içeren P(AAM-co-AAc-co-PEGDA) yapısındadır ve serbest radikal kopolimerizasyon tekniğıyle sentezlenmiştir. Tipik sentezde, AAM, AAc ve PEGDA deiyonize suda çözülmüş; TEMED eklenerek +4 °C'de soğutulmuş, ardından APS ilavesiyle 25 °C'de polimerizasyon başlatılmıştır. AAc gruplarının pH 6.5-8.0 aralığında  $\text{COO}^-$  iyonlarına dönüşmesiyle oluşan elektrostatik itme, hidrojin şişmesine ve bağıl dielektrik sabitin artmasına neden olur [4]. Karakterizasyon için hazırlanan numuneler pH 4, 6 ve 8 çözeltilerinde dengelenmiş; ölçümler DAK3.5 kiti ile 1-4GHz aralığında gerçekleştirilmiştir. Artan pH ile birlikte bağıl dielektrik sabitinde artış gözlemlenmiştir (Şekil 1).

## 3. Hidrojel Tabanlı İmplant Çınlaç

Önerilen implant tasarımında, minyatürizasyon amacıyla iç içe geçmiş yarık halka (NSRR) çınlaç yapısı kullanılmaktadır (Şekil 2 (c)). Biyouyumluluğı sağlamak için altın iletken ve poliamid alttaş kullanılmıştır.  $5.3 \times 5.3 \times 2\text{mm}^3$  boyutlarındaki NSRR yapısı, pH duyarlı hidrojel içine hapsedilmiştir. pH'ye bağıl bağıl dielektrik sabitleri DAK 3.5 ile ölçülmüş ve hidrojel modeline entegre edilmiştir (Şekil 1). Artan pH ile hidrojin bağıl dielektrik sabiti yükselmekte, bu da NSRR'in rezonans frekansında kaymalara yol açmaktadır. Her 2 birimlik

pH değişimi için  $|S_{21}|$  eğrisinde en az 5 MHz rezonans frekansı kayması gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda hidrojel tabanlı implant çınlaç, dikdörtgen bir dalga kılavuzu içerisine Şekil 2 (b)'de görüldüğü gibi yerleştirilmiş ve  $|S_{21}|$  parametresiyle karakterize edilmiştir (Şekil 3 (b)). Dalga kılavuz modellemesinde, elektromanyetik modların doğru yönlendirilmesini sağlamak amacıyla üst ve alt yüzeylerde *mükemmel elektriksel iletken (PEC)*, yan yüzeylerde ise *mükemmel manyetik iletken (PMC)* sınır koşulları uygulanmıştır.



**Şekil 3.** (a) pH seviyeleri için dalga kılavuzunun iletim katsayısı. (b) pH seviyeleri için beden-üstü antenin iki portu arasındaki iletim katsayısının genliği (simülasyon verisi).

Sistemin beden içi koşullarda çalışabilirliği,  $16 \times 16 \times 8 \text{ cm}^3$  boyutlarında kas fantomu ve içerisine yerleştirilen  $2 \times 2 \times 4 \text{ cm}^3$  değişken pH ortamı ile modellenmiştir (Şekil 2 (a)). İmplantın rezonans tepkisi, fantomun altına 1 cm mesafeye konumlandırılan geniş bantlı, çift portlu çapraz yarık anten ile izlenmiştir [5]. Kas fantomunun elektriksel özellikleri IT'IS Foundation veri tabanına dayanmaktadır [6]. Şekil 3 (b)'de, hidrojel implantın ortama yerleştirilmiş ve ortamdan çıkarılmış olduğu durumlar için, beden-üstü antenin iki portu arasındaki iletim katsayısı karşılaştırılmıştır. Analizde, karmaşık iletim katsayısının hem gerçek hem de sanal bileşenleri birlikte değerlendirilmiş; böylece genlik ve faz bilgisini içeren daha hassas bir kalibrasyon gerçekleştirilmiştir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışma, hidrojel tabanlı, pasif bir mikrodalga çınlaç yapısına dayanan ve kablosuz pH takibine olanak tanıyan özgün bir implant sistemini sunmaktadır. Elektromanyetik simülasyonlarla farklı pH seviyeleri altında sistemin iletim katsayısı analiz edilmiş; hidrojin bağlı dielektrik sabitindeki artışa bağlı olarak rezonans frekansında meydana gelen kaymalar gözlemlenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] M. H. Zarifi, S. Deif, and M. Daneshmand, "Wireless passive RFID sensor for pipeline integrity monitoring," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 261, pp. 24–29, 2017.
- [2] L. R. Bennison, C. N. Miller, R. J. Summers, A. M. B. Minnis, G. Sussman, and W. McGuiness, "The pH of wounds during healing and infection: a descriptive literature review," *Journal of Wound Care*, 2023.
- [3] N. Chauhan and V. Singh, "Fiber optic pH sensor utilizing TiO-SiO composite layer," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 310, p. 127850, 2020.
- [4] S. Abdurrahmanoglu, V. Can, and O. Okay, "Design of high-toughness polyacrylamide hydrogels by hydrophobic modification," *Polymer*, vol. 50, no. 23, pp. 5449–5455, Nov. 2009.
- [5] A. Bilir and S. Dumanli, "Wide-band dual port cross slot wearable antenna for in-body communications," in *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, 2023, IEEE.
- [6] IT'IS Foundation, *Tissue Properties Database*, The Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS), Zurich, Switzerland. [Online]. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/>. [Accessed: Jan. 24, 2025].