



DERİ DOKUSUNUN FARKSAL BAĞLAŞIMLI VÜCUT İÇİ HABERLEŞME KANALININ DAĞITIK PARAMETRELİ İLETİM HATTI MODEL ANALİZİ

Kayhan ATEŞ^{1,2*}, Şükrü ÖZEN²

¹ University of Pavia, Telecommunications & Remote Sensing Laboratory, Pavia, Italy

² Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Öz

Vücut İçi Haberleşme, Farksal Bağlaşım, İletim Hattı Modeli, Analitik Hesaplama, Biyoelektromanyetik.

Vücut içi haberleşme, insan vücudunu elektriksel sinyallerin iletimi için haberleşme kanalı olarak kullanan yenilikçi bir yöntemdir. Bu çalışmada, giyilebilir sistemler-için 100 MHz'e kadar olan farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalı, dağıtık parametrelili iletim hattı modeli kullanılarak analitik olarak incelenmiştir. Söz konusu model, dokunun frekansa bağlı elektriksel özellikleri dikkate alınarak iletim hattı davranışının detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, eşdeğer devredeki direnç ve kapasitansın artan frekansla birlikte azaldığını, kondüktansın ise arttığını göstermektedir. Özellikle, zayıflama ve faz sabitlerinin incelenen frekans bandında 100 kHz'de sırasıyla 3,85 Np/m ve 3,58 rad/m ile en yüksek değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, haberleşme kanalında iletilen gücün frekans arttıkça aynı uzaklıklarda artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yeni nesil giyilebilir sistemlerin haberleşme kanalı tasarımı için kritik bilgiler sunmakta ve sistem performansını optimize etmek için frekans seçimi açısından yol gösterici bir çerçeve oluşturmaktadır. Bu çalışma, düşük güçlü ve yüksek verimli veri haberleşmesi için vücut içi haberleşme sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

DISTRIBUTED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL ANALYSIS OF THE GALVANIC COUPLED INTRABODY COMMUNICATION CHANNEL OF SKIN TISSUE

Keywords

Abstract

Intrabody Communication, Galvanic Coupling, Transmission Line Model, Analytical Calculation, Bioelectromagnetics.

Intrabody communication is an innovative method that utilizes the human body as a communication channel for transmitting electrical signals. In this study, the galvanic coupled intrabody communication channel for wearable systems was analytically investigated using a distributed parameter transmission line model up to 100 MHz. The proposed model enables a detailed analysis of the transmission line behavior by considering the frequency dependent electrical properties of the tissue. The results indicate that the resistance and capacitance in the equivalent circuit decrease with increasing frequency, while conductance increases. Notably, the attenuation and phase constants were found to reach their maximum values at 100 kHz within the investigated frequency band, measured as 3.85 Np/m and 3.58 rad/m, respectively. Additionally, it was observed that the transmitted power in communication increases with frequency at the same distances. These findings provide critical insights into the design of communication channels in next-generation wearable systems and establish a guiding framework for optimizing system performance through frequency selection. This study aims to contribute to the development of intrabody communication systems for low-power and high-efficiency data communication.

Alıntı / Cite

Ateş, K., Özen, Ş., (2025). Deri Dokusunun Farksal Bağlaşımlı Vücut İçi Haberleşme Kanalinin Dağıtık Parametrelili İletim Hattı Model Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 545-555.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K. Ateş / 0000-0002-6016-6577
Ş. Özen / 0000-0002-5538-6786

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	02.12.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.04.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.05.2025
Yayın Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: kayhanates@akdeniz.edu.tr, +90-242-227-4400-4305

DISTRIBUTED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL ANALYSIS OF THE GALVANIC COUPLED INTRABODY COMMUNICATION CHANNEL OF SKIN TISSUE

Kayhan Ateş^{1,2†}, Şükrü Özen²

¹ University of Pavia, Telecommunications & Remote Sensing Laboratory, Pavia, Italy

² Akdeniz University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Eng., Antalya, Türkiye

Highlights

- Intrabody communication is defined as a communication channel modeling of tissue.
- This study investigates the transmission line model of tissue communication channel.
- Results indicate that dielectric properties affect the equivalent circuit model of tissue.
- Maximum attenuation was observed as 3.85 Np/m at 100 kHz.

Graphical Abstract

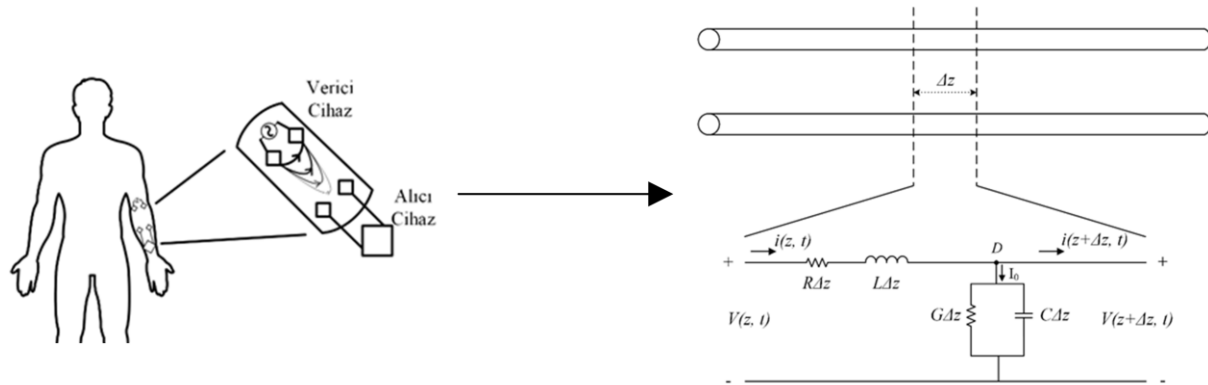


Figure. Galvanic Coupled Intrabody Communication Channel and Distributed Parameter Transmission Line Model

Purpose and Scope

In this study, a galvanic coupled-based intrabody communication channel was investigated according to the distributed parameter transmission line model of tissue. Consequently, the equivalent circuit model was derived in order to analyze further research about the data signal propagation through the biological tissue.

Design/methodology/approach

The transmission line model was analyzed up to 100 MHz in this study to address the communication channel model, with the equivalent circuit parameters considered frequency-dependent. Dielectric properties of tissues, which define aforementioned circuit parameters, were derived from realistic values available in open-access database libraries. Consistent with the assumptions of intrabody communication, the inductance parameter of the transmission line model was disregarded.

Findings

The study revealed that the transmission line model parameters vary with frequency: resistance and capacitance decrease, while conductance increases. Transmitted power at different frequencies was also calculated using the propagation constant of the galvanic coupling-based intrabody communication model.

Practical implications

The findings of this study can be applied to advanced wearable technologies and may help optimize a flatter communication channel in the frequency domain. In the future, data signal modulation could be explored to meet enhanced communication requirements.

Originality

This study highlights the transmission line model analysis for galvanic coupled-based intrabody communication channel in the frequency range of 0 – 100 MHz. Therefore, new generation communication systems for IoT-based wearable technologies might be designed in light of these results.

[†] Corresponding author: kayhanates@akdeniz.edu.tr, +90-242-227-4400-4305

1. Giriş (Introduction)

Günlük yaşamda haberleşme, temel ihtiyaçların karşılanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Elektriğin keşfinden sonra telgrafın geliştirilmesi, insanların yaşantısını kolaylaştırmaya zemin hazırlamıştır. Bu tür teknolojik ilerlemeler, haberleşme sistemlerinin evriminde kritik bir noktayı temsil etmektedir. Günümüzde ise haberleşme teknolojileri, tıp gibi doğrudan insan yaşamını etkileyen alanlarda belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır. Geliştirilen sistemler sayesinde son yıllarda bireylerin hastanelere başvurma oranı düşmüş ve doktorlar, teşhis ve tedavi süreçlerini uzaktan gerçekleştirebilecek yöntemlere yönelmiştir (Cosoli vd., 2021; Troller-Renfree vd., 2021; Gigena vd., 2022; Mishra vd., 2022). Bu dönemde, sağlık uygulamalarının performansını artırma ve maliyetleri düşürme çabaları öncelikli hedefler arasında yer almıştır. Geleneksel tıbbi sistemlerde sensörlerin çoğu kablolu bir şekilde cihazlara bağlanmaktadır; ancak bu yöntem ile hastaların hareket özgürlüğü kısıtlanabilmekte ve sinyal kaydı zorlaşabilmektedir. Günümüzde, bu sorunlara kablosuz teknolojiler çözüm olarak sunulmuş ve hem hastaların hem de sağlık personelinin konforunu artıran bir alternatif oluşturulmuştur (Wegmüller, 2007).

Literatürde, farklı frekans bantlarında ve farklı tekniklerle hastalıkların çözümleri incelenmektedir. Son yıllarda araştırmacılar tarafından incelenen biyotelemetri sistemleri ile insan vücudundaki önemli sinyallerin takibi ve hastaların tedavisi gerçekleştirilebilir (Alper ve Coşkun, 2020). Gözel vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, 868 MHz frekansında implant edilebilir mikroşerit dipol anten tasarımı incelenmiştir. Tasarım, H-şeklinde katlanmış bir mikroşerit dipol anteni ele almaktadır. İncelemelerde boş uzaydaki antenin doku içerisinde davranışı ve dokuya etkileri ele alınmıştır. Bu kapsamda, ilgilenilen frekansta söz konusu antenin kazancı -25 dB olarak hesaplanmışken bant genişliği ise 250 MHz olarak belirtilmiştir. 1gr ortalama en yüksek özgül soğurma oranı ise 396,8 W/kg hesaplanmıştır. Alper ve Coskun (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 2,45 GHz'de implant anten tasarımı sunulmuştur ve deneysel olarak doku modeli içi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, doku içinde ve dışında geri dönüş kaybı sırasıyla -18 dB ve -33 dB elde edilmiştir. İmplant antenin dokudaki dozimetrik etkileri incelendiğinde ise özgül soğurma oranının 153 W/kg hesaplanmıştır.

Sağlık sektörünün yanı sıra günümüz teknolojisinin önemli bir diğer unsuru, cihazlar arası haberleşmenin geliştirilmesidir. Farklı amaçlarla kullanılan cihazların birbirleriyle ve çevreleriyle uyumlu bir şekilde haberleşmesi gerekmektedir. Yeni nesil cihazlarda kullanılan haberleşme sistemlerinin düşük gecikme, yüksek veri hızı ve çok sayıda cihazın bağlantı kurabilme kapasitesi kritik bir öneme sahiptir (Ateş, 2024). Kablosuz alan ağları ve nesnelerin interneti sayesinde bağlı cihazlar, bu ihtiyaçlara yanıt vermekte ve teknolojik ekosistemin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir. Bu tür zorluklara yönelik geliştirilen yöntemlerden birisi, biyolojik dokuyu bir sinyal iletim ortamı olarak ele alan vücut içi haberleşme tekniğidir. Düşük enerji ihtiyacı ve yüksek güvenilirliği sayesinde bu teknik, vücutların interneti kavramını gündeme getirmiştir (Chatterjee vd., 2023). Ayrıca, literatürde bu teknolojinin iş sağlığı ve güvenliği, artırılmış gerçeklik uygulamaları, spor aktivitelerinde sanal koçluk ve beslenme takibi gibi farklı alanlarda da kullanıldığına dair çalışmalar yer almaktadır (Celik vd., 2021).

Vücut içi haberleşme kanalının iletim hattı modelini inceleyen çalışmalar, son yıllarda literatürde yer almaktadır. Callejón vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deri üzerinden sinyal yayılımını açıklamak için dağıtık parametrelili bir iletim hattı modeli geliştirilmiştir. Farksal bağlaşımlı temelli model, 1 GHz'e kadar olan frekanslarda test edilmiş ve zayıflama ile yayılım parametreleri literatürle uyumlu bulunmuştur. QPSK ve BPSK modülasyonları 30 cm mesafeye kadar düşük bit hata oranı sunarken, QPSK daha yüksek veri hızlarında da başarılı olmuştur. 16-QAM en düşük performansı göstermiştir. Swaminathan vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada deri, yağ, kas ve kemikten oluşan çok katmanlı insan dokusu için farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme tekniği temelli eşdeğer devre modeli sunulmuştur. Model sayesinde frekans, elektrot mesafesi, doku kalınlığı gibi farklı parametrelerin haberleşme kanal kazancına etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, modelin doğruluğunu ve implant edilebilir sensör tasarımı için uygunluğunu göstermiştir. Wang vd. (2016), vücut dokusunu sığa bağlaşımlı temelli kademeli RC devre modeliyle temsil eden yeni bir iletim hattı modeli önermiştir. Ayrıca, BPSK modülasyonu kullanılarak kanal analizi ve bit hata oranı değerlendirilmiştir. Lodi vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 1 kHz – 1 MHz aralığında sığa bağlaşımlı temelli bir iletim hattı modeli önerilmiştir. Faz açısı ve empedans ölçümleriyle modelin doğruluğu %3 hata payı ile kanıtlanmıştır. Belirtilen çalışmalar incelendiğinde, devre elemanlarının frekansa bağlı ayrıntılı davranışlarının analiz edilmesi ve ilgili frekanslardaki transfer fonksiyonu cevaplarının değerlendirilmesi, vücut içi haberleşme sistemlerinin daha doğru ve optimize bir şekilde tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, haberleşme kanal kazancının artırılmasına yönelik uyumlandırma devreleri tasarlanarak sistem performansı iyileştirilebilir. Bu çalışma, söz konusu ihtiyaçlara odaklanarak mevcut modellere alternatif bir yaklaşım sunmakta; elde edilen parametrik analiz ve modelleme yöntemiyle vücut içi haberleşme sistemlerinin tasarım süreçlerine özgün bir katkı sağlamaktadır.

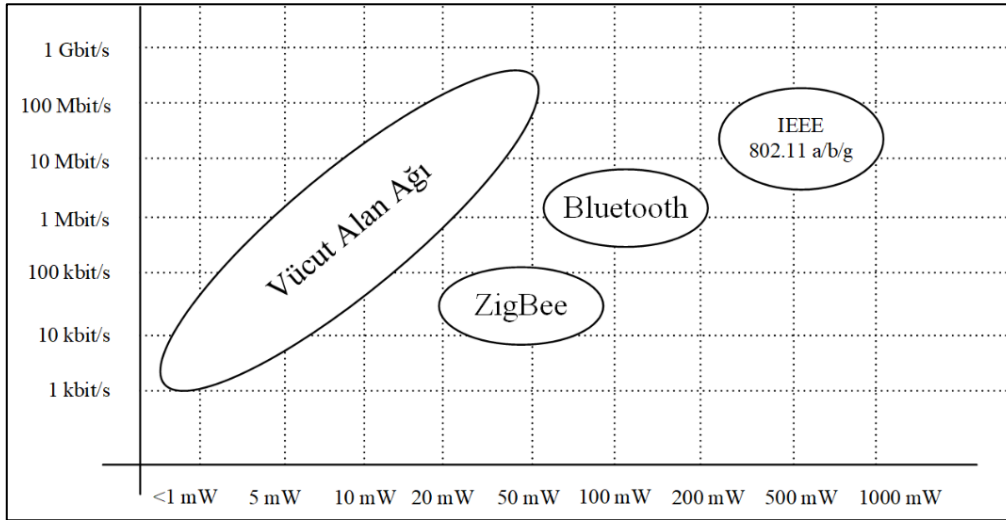
Araştırmacılar, son yıllarda farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalını hem teorik hem de deneysel olarak incelemelerine rağmen dağıtık parametrelili iletim hattı model analizi ile ilgili güncel çalışmalar kısıtlıdır (Vizziello

vd., 2022; Ateş vd. 2024b). Bu çalışmada, deri dokusunun farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalının dağıtık parametrelili iletim hattı modeli analitik olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, frekansa bağlı iletim hattı parametreleri, deri dokusunun gerçekçi dielektrik özelliklerine göre hesaplanmıştır. Ayrıca, doku üzerinde farklı frekanslarda iletilen gücün davranışı ele alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, giyilebilir sistemler için farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalının dağıtık parametrelili iletim hattı modellenerek frekansa bağlı devre elemanlarının analitik olarak hesaplanmasıdır ve bu sayede giyilebilir sistemlerin vücut içi haberleşme kanal cevabının modellenmesi için öngörü oluşturmaktır.

Çalışmanın gidişatı, şu şekilde planlanmıştır: Öncelikle vücut içi haberleşme konusu, farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşmenin önemi ve teorik altyapısı açıklanmıştır. Ardından, vücut dokusunun iletim hattı modeli analitik olarak incelenmiştir ve farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme yaklaşımlarına göre analiz edilmiştir. 100 MHz'e kadar olan dağıtık parametrelili iletim hattı modeli analitik olarak incelenmiştir ve farklı frekanslarda ve uzaklıklarda doku modelinde iletilen elektriksel sinyalin davranışı değerlendirilmiştir. Son olarak, elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Taşınabilir elektronik sistemlerin boyutlarının küçülmesi ve işlevselliklerinin artması, insan vücudunda haberleşme kurabilen teknolojilerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Giyilebilir ya da implant edilebilir özelliklere sahip bu cihazlar, kısa mesafeli kablosuz haberleşme için önemli bir altyapı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, IEEE'nin 802.15.6-2012 standardı (IEEE, 2012), insan vücudu içinde ve çevresinde kullanılacak kablosuz haberleşme sistemleri için bir çerçeve sunmaktadır. Vücut içi haberleşme teknikleri, bu standart kapsamında detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Mevcut kablosuz haberleşme yöntemleri arasında, enerji tüketimi, veri güvenliği ve sinyal kaybı gibi faktörler nedeniyle vücut içi haberleşme ön plana çıkmaktadır (Alam ve Ben Hamida, 2014). Şekil 1, farklı kablosuz haberleşme yöntemlerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. Yatay eksen güç gereksinimlerini, dikey eksen ise veri hızını temsil etmektedir. Bu karşılaştırma, vücut alan ağlarının diğer tekniklere kıyasla daha düşük enerji harcayarak daha yüksek veri hızlarına ulaşabildiğini göstermektedir.



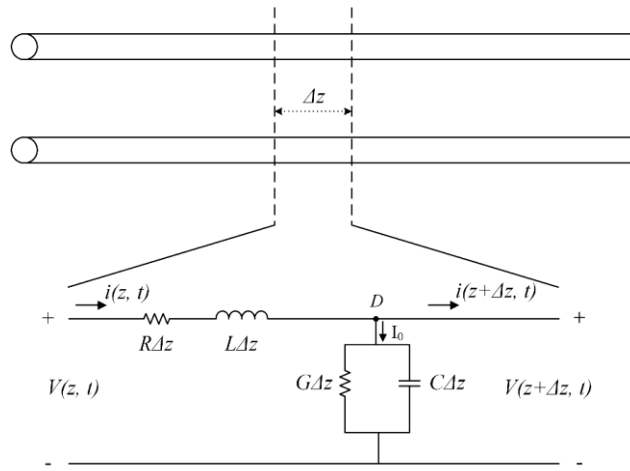
Şekil 1. Kablosuz haberleşme yöntemlerinin karşılaştırılması
(Comparison of wireless communication methods (Drude, 2007))

Vücut içi haberleşme yöntemi, insan vücudunu elektriksel sinyal iletim ortamı olarak modelleyerek enerji verimliliği, bilgi güvenliği ve frekans bandının yeniden kullanımı gibi pek çok avantaj sunmaktadır (Ateş vd., 2024a). Bu alanda literatürde farklı yöntemler sunulmuştur (Vizziello vd., 2023). Bu yöntemler temel olarak ultrasonik ve elektromanyetik olmak üzere iki ana gruba ayrılmakta ve kullanılan yöntemle ilgili olarak farklı çalışma frekanslarında incelenmektedir. Elektromanyetik tekniklerin ultrasonik yöntemlere göre daha hızlı veri iletimi, düşük sinyal zayıflaması ve geniş bir uygulama alanı gibi avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte radyo frekansı (RF) tabanlı teknikler yaygın olarak kullanılmasına rağmen, biyolojik dokularda yüksek düzeyde sinyal kayıplarına neden olabilmektedir (Vizziello vd., 2022). Bu çalışmada, farksal bağlaşım tekniği tercih edilmiştir. Bu teknolojinin seçimi, girişim ve güvenlik kaygıları, biyolojik doku üzerindeki etkileri ve diğer vücut içi haberleşme yöntemlerine göre daha basit bir alıcı-verici mimarisi sunması gibi çeşitli faktörlere dayandırılmıştır (Vizziello vd., 2023).

Sunulan bu çalışmada, farksal bağlaşım teknolojisini temel alan vücut içi haberleşme yöntemi incelenmiştir. Literatürde, farksal bağlaşım temelli sinyal iletimi için sinyal ve topraktan oluşan bir verici elektrot çifti ve bir alıcı elektrot çifti kullanılmaktadır (Ateş ve Özen, 2019). Elektriksel topraklama gerektirmeyen bu teknik, verici elektrot çifti arasında bir akım yoğunluğu oluşturarak sinyalleri iletir. Oluşan düşük akım yoğunluğu, alıcı elektrot çiftine farksal olarak ulaşır ve böylece sinyalin iki elektrot çifti arasında iletimi gerçekleşir. Yapılan çalışmalar, farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme tekniğinin çalışma frekansını 100 MHz'e kadar ele almaktadır (Vizziello vd., 2023). Bu yöntem, farksal bağlantı topolojisinin sağladığı avantajlarla elektriksel gürültüye karşı daha dirençlidir. Ayrıca, giyilebilir sistemler ve implant edilebilir teknolojiler için düşük enerji tüketimi ve güvenilir bir performans sunar (Chen vd., 2018).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Biyolojik dokuları iletim hattı olarak modelleyen çalışmalar literatürde sınırlı sayıda bulunmaktadır (Mao vd., 2018; Lodi vd., 2020). İnsan vücudunun fiziksel boyutları, 100 MHz'in altındaki frekanslarda sinyal dalga boyuna kıyasla küçük olduğundan, bu frekans aralığında iletim hattı modelinin kullanımı uygundur (Swaminathan vd., 2016). Bu model, eşdeğer devre elemanlarının seri şekilde bağlanarak periyodik bir yapı oluşturmasıyla elde edilir (Ferikoğlu vd., 2014). Şekil 2, dağıtık parametrelili iletim hattını belirtir. Elektriksel sinyal bu modelde iletim hattı boyunca yayılırken, devre elemanları dokunun sinyal iletim özellikleri üzerinde önemli bir etki oluşturur.



Şekil 2. Dağıtık parametrelili iletim hattı modeli (Distributed parameter transmission line model (Ateş, 2019))

Şekil 2'de belirtilen modelde, R ifadesi birim uzunluktaki direnç (Ω/m) olarak, L ise seri indüktans (H/m) olarak tanımlanır. C ve G ise sırasıyla kapasitans (C/m) ve kondüktans (S/m) elemanlarını temsil eder. $V(z, t)$, iletim hattının bilinen gerilimini ifade ederken, $V(z + \Delta z, t)$, Δz uzaklıktaki bilinmeyen gerilimi belirtir. Benzer şekilde, $i(z, t)$ ve $i(z + \Delta z, t)$, sırasıyla iletim hattındaki bilinen ve Δz uzaklıktaki bilinmeyen akımı gösterir. Bu eşdeğer devrenin çözümü sayesinde Eşitlik (1) - (3) elde edilir. Bu denklemler, devre parametrelerine bağlı olarak, akım ve gerilimin konum ve zamana göre belirlenmesini sağlar.

$$-\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = R i(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = G v(z, t) + C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

Eşitlik (1) ve (2), iletim hattındaki sırasıyla gerilim eşitliğini ve akım eşitliğini tanımlarken Eşitlik (3) ise iletim hattı modelinin yayılma sabitini ifade etmektedir. Burada, α iletim hattının zayıflama sabitini (Np/m) ve β faz sabitini (rad/m) belirtirken, ω ise açısal frekansı ifade eder ($\omega = 2\pi f$, rad/s).

Yapılan araştırmalarda, dokunun eşdeğer devre modeli ile dielektrik özellikleri arasında bir ilişki olduğu gösterilmiştir (Chen vd., 2018). Çalışma frekansına bağlı olarak dokunun dielektrik özellikleri değişir ve bu durum, farklı frekanslar için çeşitli eşdeğer devre modellerinin oluşmasını sağlar. Bu değişim, sinyal iletim ortamının karakteristiğini de etkiler. Vücut içi haberleşme kanalının iletim hattı modelindeki indüktif eleman, elektriksel potansiyel değişimine göre düşük etkili olduğundan, genellikle ihmal edilmektedir (Wegmüller, 2007). Dokunun eşdeğer iletim hattı modelindeki devre elemanları ise elektrot ve doku özelliklerine göre Eşitlik (4) - (6) ile

tanımlanmıştır (Callejón vd., 2012).

$$G = \frac{A}{d} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{G} \quad (5)$$

$$C = \frac{A}{d} \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \quad (6)$$

Burada, A elektrot yüzey alanını, d ise dokunun kalınlığını ifade eder. Bu çalışmada elektrot yüzeyi olarak $2 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ referans alınmışken doku kalınlığı ise $1,5 \text{ mm}$ 'dir (Ateş, 2024). Elektrotlar, farksal bağlaşım tekniğine göre verici ve alıcı elektrot çifti olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada incelenen eşdeğer modelde, elektrot çiftleri deri dokusu üzerinde 10 cm aralık olacak şekilde konumlandırılmıştır. Hem verici hem de alıcı taraftaki sinyal ile toprak elektrotları ise kendi arasında $6,3 \text{ cm}$ aralıklı yerleştirilmiştir. ε_0 , boşluğun dielektrik sabiti olup $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ olarak tanımlanmıştır. ε' ve ε'' , sırasıyla dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımlarını ifade eder (Ateş vd., 2017). Bu parametreler temel alınarak, haberleşme kanalı olan dokunun eşdeğer devre modeli oluşturulabilir.

Gabriel vd. (1996), dokuların dielektrik sabitlerini matematiksel olarak modellemek amacıyla Cole-Cole dağılım modelini geliştirmiştir. Bu model, dokuların dielektrik özelliklerindeki değişimi geniş bir frekans aralığında aşağıdaki şekilde tanımlar:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_n \frac{\Delta \varepsilon_n}{1 + (j\omega \tau_n)^{(1-\alpha_n)}} - j \frac{\sigma_i}{\omega \varepsilon_0} \quad (7)$$

Yüksek frekanslarda ($\omega \tau \gg 1$), dokunun dielektrik sabiti ε_∞ ile tanımlanır. Düşük frekanslarda ($\omega \tau \ll 1$) ise $\Delta \varepsilon_n$, dokunun dielektrik sabiti ile ε_∞ arasındaki farkı ifade eder. τ_n ilgili frekanstaki zaman sabiti olup, α_n ise dağılım genişliğini temsil eder. Bir malzemenin dielektrik özellikleri sayesinde elektriksel karakterizasyonu ve eşdeğer devre modeli incelenebilir (Polat vd., 2019).

Şekil 2'de belirtilen eşdeğer devre modeli parametrelerinden biri de iletim hattının yayılma sabitidir. Bu çalışmada modellenen yayılma sabiti, dokunun dielektrik özelliklerine bağlıdır. Buna göre, frekans değiştikçe malzemenin dielektrik özellikleri de değişmekte ve bu durum farklı eşdeğer devrelerin oluşmasına yol açmaktadır. Böylelikle sinyal haberleşme ortamının karakteristiği de değişecektir. Farksal bağlaşım vücut içi haberleşmede yayılma sabiti, literatürde aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Nikita, 2014):

$$\gamma(\omega) = \sqrt{2(R(\omega))(G(\omega) + jC(\omega))} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan 2 çarpanı, elektrotların farksal bağlaşımı sonucunda devre modelinde oluşturduğu geri dönüş empedanslarından kaynaklanmaktadır (Callejón vd., 2012). Hesaplanan yayılma sabiti, karmaşık bir sayı olup, zayıflama sabitini gerçek kısmıyla, faz sabitini ise sanal kısmıyla tanımlar. Doku üzerinde iletilen gücün hesaplanmasında, kaynak gücü ve zayıflama sabiti kullanılabilir (Pozar, 2011; Tomlinson vd., 2015):

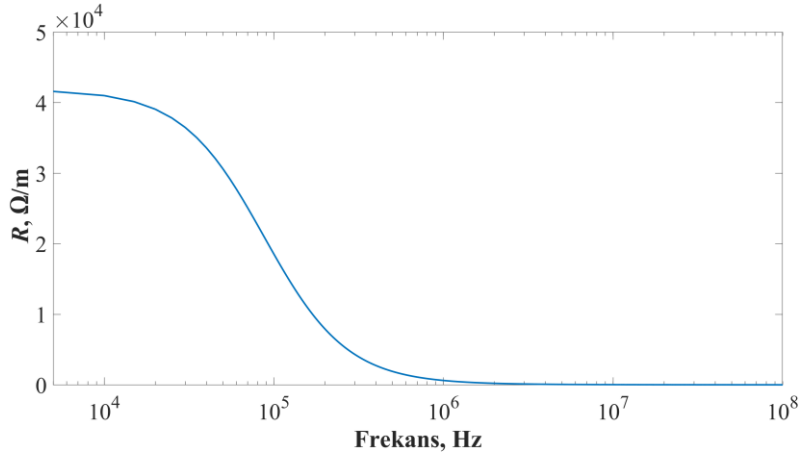
$$P(d) = P(0)e^{-2\alpha d} \quad (9)$$

$P(0)$, kaynak gücünü temsil ederken, $P(d)$ ise kaynaktan d mesafedeki gücü ifade etmektedir. Zayıflama sabiti olan α , farksal bağlaşım tekniğine göre Eşitlik (8)'de tanımlandığı şekilde hesaplanır.

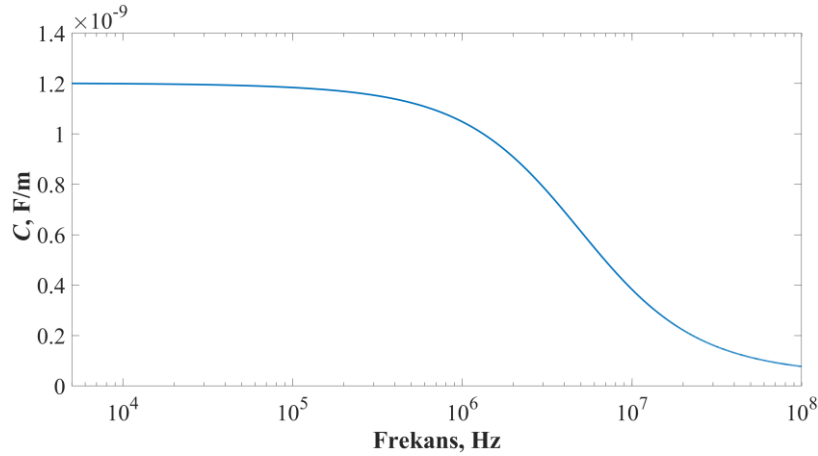
4. Hesaplamalı Sonuçlar (Computational Results)

Literatürde daha önce yayınlanmış çalışmalar, giyilebilir sistemlerde vücut içi haberleşmenin çoğunlukla deri dokusu üzerinden sağlandığını göstermektedir (Nikita, 2014). Bu çalışmada, deri dokusunun dielektrik özellikleri literatürdeki kaynaklardan alınmıştır (Andrecuetti vd., 2012). Deri dokusunun dağıtık parametrelili iletim hattı modeli; dış ve iç katmanlardaki sinyal iletimini temsil eden dirençleri, epidermisin keratinli hücreleri ile çift katmanlı yağ dokusunu modelleyen kapasitör elemanını ve ter bezleri ile hücre membranındaki iyonik kanalları ifade eden kondüktans içerir (Ateş, 2019). İç katmanın direnci, dış katmanlara oranla çok daha düşük olduğundan genellikle ihmal edilmektedir. Bu devre elemanlarının özellikleri, dokunun elektriksel yapısına bağlı

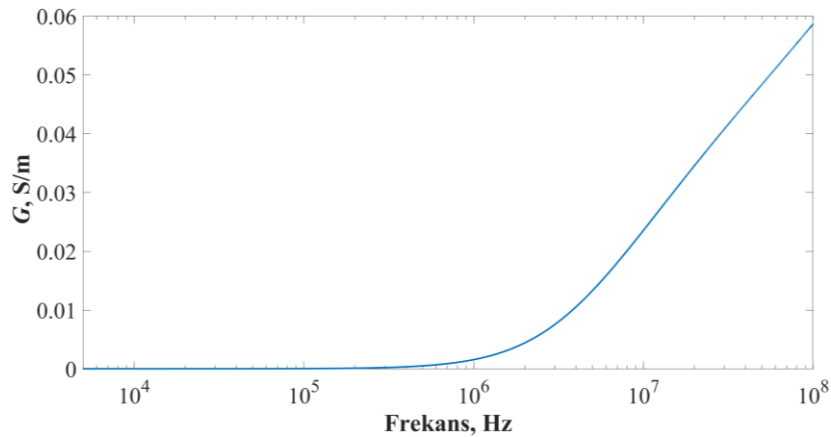
olarak Eşitlik (4)-(6)'da verilmiştir. Şekil 3-5, deri dokusunun dağıtık parametrelili iletim hattı devre elemanlarının frekans ile değişimini göstermektedir. Frekans arttıkça, direnç ve kapasitans azalma eğilimi gösterirken kondüktans artmaktadır. Direnç, 10 kHz'den itibaren azalarak 100 MHz'de yaklaşık 17,03 Ω/m 'ye düşmüştür. Kapasitans ise 1 MHz'den itibaren hızlı bir şekilde azalarak 100 MHz'de yaklaşık 0,77 pF/m değerine ulaşmıştır. Kondüktans elemanı ise 1 MHz'den sonra hızla artarak 100 MHz'de 58,7 mS/m'dir.



Şekil 3. Direncin frekansla değişimi (Variation of resistance with frequency)

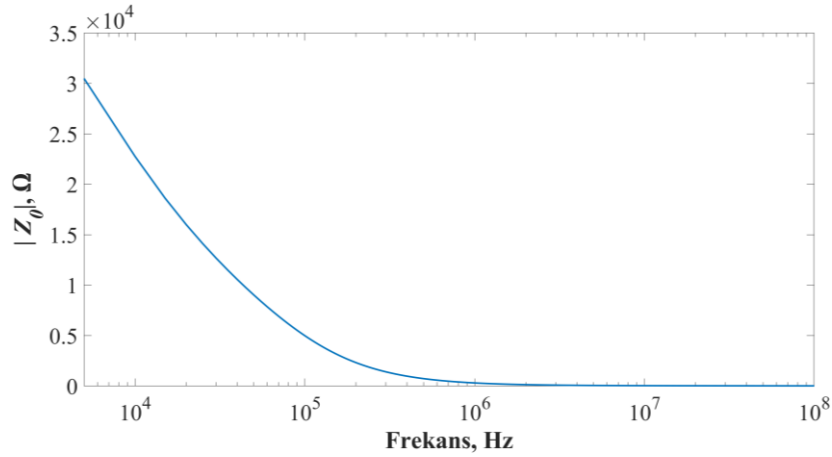


Şekil 4. Kapasitansın frekansla değişimi (Variation of capacitance with frequency)



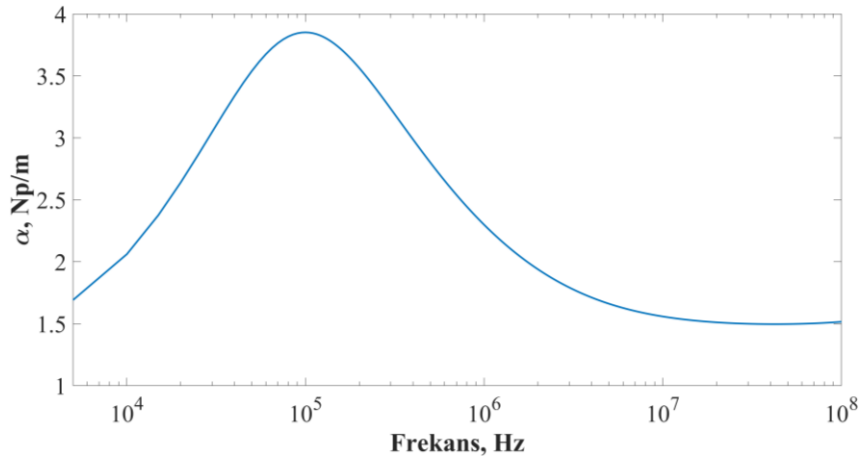
Şekil 5. Kondüktansın frekansla değişimi (Variation of conductance with frequency)

Şekil 2'de belirtilen iletim hattı modelinde karakteristik empedans önemli bir parametredir ve sinyalin dokuda iletilmesini etkiler (Callejón vd., 2011). Şekil 6'da ise eşdeğer devre elemanları kullanılarak deri dokusunun karakteristik empedansı hesaplanmıştır. Burada sunulan sonuçlara göre, frekans arttıkça karakteristik empedansın azaldığı gözlemlenmiştir. Empedans, 100 kHz'de 4986 Ω , 1 MHz'de 305 Ω , 10 MHz'de 35,6 Ω ve 100 MHz'de yaklaşık 14,96 Ω olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, frekans bağımlı davranışın karakteristik empedans üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

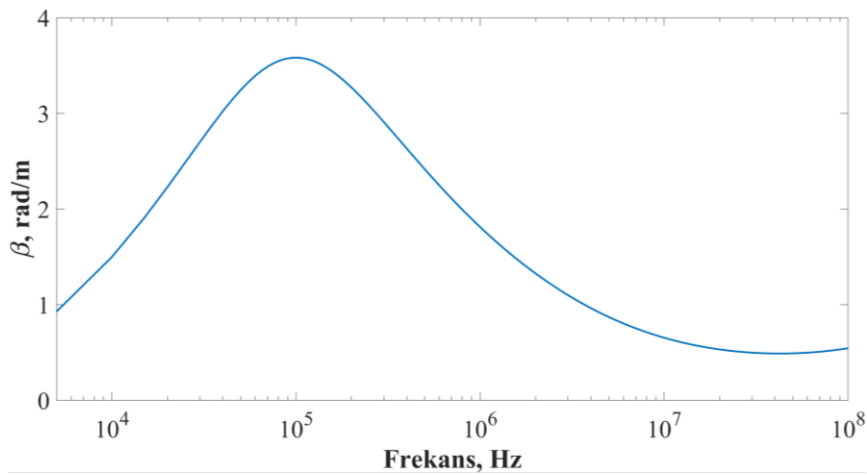


Şekil 6. Karakteristik empedansın frekansla değişimi (Variation of characteristic impedance with frequency)

Deri dokusunun yayılma sabitinin gerçek (α) ve sanal (β) bileşenleri, Şekil 7 ve 8’de sunulmuştur ve Eşitlik (8) temel alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre, 100 kHz frekansında α yaklaşık 3,85 Np/m, β ise 3,58 rad/m değerine ulaşarak en yüksek seviyelerini göstermiştir. Frekans arttıkça bu sabitlerin azaldığı gözlemlenmiş ve 100 MHz frekansında α yaklaşık 1,51 Np/m, β ise 0,54 rad/m olarak belirlenmiştir.



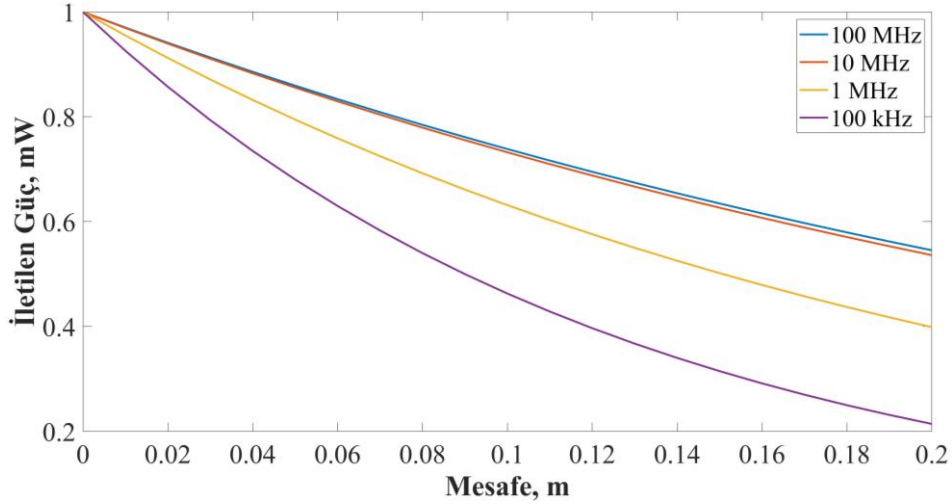
Şekil 7. Zayıflama sabitinin frekansla değişimi (Variation of attenuation constant with frequency)



Şekil 8. Faz sabitinin frekansla değişimi (Variation of phase constant with frequency)

Deri dokusu sayesinde iletilen farklı frekanslardaki elektriksel gücün değişimi Şekil 9’da ve Tablo 1’de gösterilmiştir. Burada, kaynak giriş gücü olarak 1 mW normalize değer referans alınmıştır. Giriş noktası olan verici elektrotlardan 5 cm, 8 cm ve 10 cm uzaklıklardaki güç değerleri, Eşitlik (8) ve (9) kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, aynı mesafe için frekans arttıkça iletilen gücün arttığı, ancak mesafenin artmasıyla aynı frekanstaki güç değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm mesafeler için en yüksek güç değeri 100 MHz’de, en düşük güç

değeri ise en fazla zayıflamanın gerçekleştiği 100 kHz frekansında elde edilmiştir.



Şekil 9. Deri dokusundaki farklı frekanslarda uzaklığa bağlı iletilen güç değişimi
(Variation of transmitted power with distance at different frequencies on skin tissue)

Tablo 1. Farklı frekanslar ve uzaklıklar için deri dokusunda iletilen güç değerleri (mW)
(Transmitted power values at various frequencies and distances (mW))

Çalışma Frekansı	5 cm	8 cm	10 cm
100 kHz	0,68	0,54	0,463
1 MHz	0,79	0,692	0,631
10 MHz	0,856	0,779	0,732
100 MHz	0,856	0,785	0,738

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada; deri dokusunun farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalının dağıtık parametrelili iletim hattı modeli, 100 MHz'e kadar analitik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda frekans bandında teorik çalışmalarla ele alınan farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalında, dokunun elektriksel özelliklerinin ve buna bağlı dağıtık parametrelili iletim hattı eşdeğer devre modelinin elektriksel sinyal iletimindeki davranışı vurgulanmıştır.

Literatürde giyilebilir sistemler için vücut içi haberleşme, genellikle deri dokusu üzerinden gerçekleştiği belirtilmiştir. Deri dokusunun farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanal parametreleri, Şekil 3-9'da analitik olarak sunulmuştur. Burada sunulan parametrelerin frekansla beraber değiştiği gözlemlenmiştir. Bu değişim, dokuların frekans bağımlı elektriksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 7 ve 8'de sırasıyla α ve β sabitlerinin 10 kHz – 1 MHz aralığında doğrusal olmayan bir artış ve ardından azalış sergilediği, her iki sabitin de 100 kHz'de en yüksek değerine ulaştığı görülmüştür ($\alpha \approx 3,85$ Np/m; $\beta \approx 3,58$ rad/m). Şekil 9'da bu sonuçlara dayanarak farklı frekans ve uzaklıklarda iletilen güç grafiği sunulmuş ve en düşük güç seviyesinin aynı uzaklıklar için 100 kHz'de olduğu hesaplanmıştır. Callejón vd., (2012), farksal ve sığa bağlaşımlı yöntemlerde deri dokusunun iletim hattı parametrelerini deneysel sonuçlarla karşılaştırarak, düşük frekanslarda dielektrik özellikler ile farksal bağlaşım tekniği arasında bir ilişki ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada elde edilen dağıtık parametrelili iletim hattı model parametreleri, literatüre katkı sağlamış ve yeni nesil teknolojilerin tasarımına referans olabilecek veriler sunmuştur. Elde edilen veriler sayesinde haberleşme kanalının davranışı frekansa bağlı olarak modellenilebilir ve bu kapsamda giyilebilir sistemlerin tasarımları gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı ve benzer çalışmalarla karşılaştırılması, Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışma boyunca hesaplanan parametrelerin haberleşme kanal karakteristiğine ve alıcı tarafta algılanan sinyale etkileri ele alınmıştır. Literatürdeki çalışmalar bağlaşım yöntemi, çalışma frekansı, devre modeli ve sinyal yayılım karakteristiği açısından incelenmiştir. Söz konusu çalışmalarda özellikle çalışma frekansı ve devre modeli farklılık göstermektedir.

Tablo 2. Bu çalışmanın literatüre katkısı ve benzer çalışmalarla karşılaştırılması
(The contribution of this study to the literature and comparison with similar studies)

Yapılan Çalışmalar	Bağlaşım Yöntemi	Çalışma Frekansı	Devre Modeli	Sinyal Yayılım Karakteristiği
Callejón vd., (2011)	Yakın alan bağlaşımı	0 – 1 GHz	Dağıtık parametrelili iletim hattı modeli	Zayıflama sabiti sayesinde elektriksel gerilim yayılımı
Tomlinson vd., (2015)	Farksal bağlaşım	100 kHz – 1 MHz	İki kapılı devre modeli	Zayıflama sabiti sayesinde elektriksel güç yayılımı
Wang vd., (2016)	Sığa bağlaşım	0 – 100 MHz	RC dağılımlı devre modeli	Zayıflama sabiti sayesinde güç kazancı
Lodi vd., (2020)	Sığa bağlaşım	1 kHz – 1 MHz	Sonlu periyodik iletim hattı modeli	Sinyal gürültü oranı sayesinde sinyal zayıflamasının hesaplanması ve sinyalin yayılımı
<u>Bu çalışma</u>	<u>Farksal bağlaşım</u>	<u>0 – 100 MHz</u>	<u>Dağıtık parametrelili iletim hattı modeli</u>	<u>Zayıflama sabiti sayesinde elektriksel güç yayılımı</u>

Gelişen teknoloji, haberleşme sistemlerinin avantajlarını en üst düzeye çıkarırken potansiyel riskleri en aza indirme gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada sunulan ve biyoelektromanyetik prensiplere dayanan yaklaşım, disiplinler arası çalışmalarla daha da ileri taşınabilir. Vücut içi haberleşme teknolojileri, vücut alan ağlarını "vücutların interneti" kavramına dönüştürerek, modern cihazlarla daha entegre ve güçlü bir bağlantı sunmuştur. Bu çalışmada ele alınan yöntemin, gelecekte daha da geliştirilerek geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabileceği öngörülmektedir. İlerleyen çalışmalarda, vücut içi haberleşme kanalının farksal ve sığa bağlaşımli yöntemlerle deneysel olarak incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, farklı tekniklerle bilgi sinyalinin modülasyonu sonucu vücut dokusu sayesinde veri haberleşmesinin gerçekleştirilmesi ve haberleşme kanal modeli davranışının ele alınması düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı'na (Proje No: 1059B142201521) ve Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje No: FDK-2022-6051) destekleri için teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Alam, M.M., Ben Hamida, E., 2014. Surveying Wearable Human Assistive Technology for Life and Safety Critical Applications: Standards, Challenges and Opportunities. *Sensors*, 14 (5), 9153-9209.
- Alper, F., Coşkun, Ö., 2020. ISM 2.45 GHz Mikroşerit İmplant Anten Tasarımı ve Doku İçi Ölçümleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 8 (2), 541-551.
- Alper, F., Coskun, O., 2022. Design of a Microstrip Implant Antenna for Biotelemetry Applications. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*. 16 (9-10), 430-436.
- Andreuccetti, D., Fossi, R. and Petrucci, C., 2012. An internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop> [Son erişim tarihi: 09/10/2024].
- Ateş, K., 2019. Vücut İçi Haberleşmenin İletim Hattı Modeli ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye.
- Ateş, K., 2024. Yeni Nesil Haberleşme Sistemleri İçin Vücut İçi Haberleşme Kanalının Modellenmesi ve İncelenmesi. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye.
- Ateş, K., İl, N., Savazzi, P., Dell'Acqua, F., Vizziello, A., Özen, Ş., 2024a. Comparison of Galvanic and Capacitive Coupled Intrabody Communication Channel by using Isolation Transformer. 2024 Medical Technologies Congress, 1-4.
- Ateş, K., Marcucci, A., Savazzi, P., Özen, Ş., Dell'Acqua, F., Vizziello, A., 2024b. Channel Characterization of Implantable Intrabody Communication through Experimental Measurements. *Proceedings of the 11th Annual ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, 66-71.
- Ateş, K., Özen, Ş., Carlak, H. F., 2017. The Freshness Analysis of an Apple and A Potato using Dielectric Properties at the Microwave Frequency Region. In 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), 1688-1693.
- Ateş, K., Özen, Ş., 2019. Modelling of Galvanic Coupled Intrabody Communication due to Finite Element Method. 2019 Medical Technologies Congress, 175-178.

- Callejón, M.A., Roa, L. M., Reina-Tosina, J., Naranjo-Hernandez, D., 2011. Study of Attenuation and Dispersion Through the Skin in Intrabody Communications Systems. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 16 (1), 159-165.
- Callejón, M.A., Naranjo-Hernández, D., Reina-Tosina, J., Roa, L.M., 2012. Distributed Circuit Modeling of Galvanic and Capacitive Coupling for Intrabody Communication. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59 (11), 3263-3269.
- Celik, A., Salama, N.S. and Eltawil, A.M., 2021. The Internet of Bodies: A Systematic Survey on Propagation Characterization and Channel Modeling. *IEEE Internet of Things Journal*, 9 (1), 321-345.
- Chatterjee, B., Mohseni, P., Sen, S., 2023. Bioelectronic Sensor Nodes for the Internet of Bodies. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 25, 101-129.
- Chen, Z.Y., Gao, Y.M., Du, M., 2018. Multilayer Distributed Circuit Modeling for Galvanic Coupling Intrabody Communication. *Journal of Sensors*, 2018, 8096064, 1-8.
- Cosoli, G., Spinsante, S., Scardulla, F., D'Acquisto, L., Scalise, L., 2021. Wireless ECG and Cardiac Monitoring Systems: State of the Art, Available Commercial Devices and Useful Electronic Components. *Measurement*, 177, 109243.
- Drude, S., 2007. Requirements and Application Scenarios for Body Area Networks. 2007 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit. 1-5.
- Ferikoğlu, A., Çerezci, O., Kahriman, M., Yener, Ş.Ç., 2014. Electromagnetic Absorption Rate in a Multilayer Human Tissue Model Exposed to Base-Station Radiation Using Transmission Line Analysis. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 13, 903-906.
- Gabriel, S., Lau, R.W., Gabriel, C., 1996. The Dielectric Properties of Biological Tissues: III. Parametric Models for the Dielectric Spectrum of Tissues. *Physics in Medicine & Biology*, 41 (11), 2271
- Gigena, C., Di Vincenzo, M., Toselli, L., Bellia-Munzon, G., Sanjurjo, D., Martinez, J., Vallee, M., Nazar-Peirano, M., Martinez-Ferro, M., 2022. Remote Treatment of Pectus Carinatum (Telepectus) During the COVID-19 Pandemic. *Journal of Pediatric Surgery*, 57 (8), 1609-1613.
- Gözel, M., Kasar, Ö., Kahriman, M., 2019. 868 MHz UHF Bandında H-Şeklinde Katlanmış İmplant Mikroşerit Dipol Anten Tasarımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10 (3), 797-806.
- IEEE, 2012. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.6: Wireless Body Area Networks. *IEEE std.*, 802, (6), 2012.
- Lodi, M. B., Curreli, N., Fanti, A., Cuccu, C., Pani, D., Sanginario, A., Spanu, A., Ross, P. M., Crepaldi, M., Demarchi, D., Mazzarella, G., 2020. A Periodic Transmission Line Model for Body Channel Communication. *IEEE Access*, 8, 160099-160115.
- Mao, J., Yang, H., Lian Y., Zhao, B., 2018. A Five-Tissue-Layer Human Body Communication Circuit Model Tunable to Individual Characteristics. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 12 (2), 303-312.
- Mishra, S., González-Briones, A., Bhoi, A.K., Mallick, P.K. Corchado, J.M., 2022. *Connected E-Health: Integrated IoT and Cloud Computing*. Cham: İsviçre: Springer Nature.
- Nikita, K.S., 2014. *Handbook of Biomedical Telemetry*. Piscataway: NJ: IEEE.
- Polat, T.G., Ateş, K., Bilgin, S., Duman, O., Özen, Ş., Tunç, S., 2019. Carbon Nanotube, Poly (3, 4-Ethylenedioxythiophene): Poly (Styrenesulfonate) and Ag Nanoparticle Doped Gelatin Based Electro-Active Hydrogel Systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 580, 123751.
- Pozar, D.M., 2011. *Microwave Engineering*. Hoboken: NJ: John Wiley & Sons.
- Swaminathan, M., Cabrera, F.S., Pujol, J.S., Muncuk, U., Schirner, G., Chowdhury, K.R., 2016. Multi-Path Model and Sensitivity Analysis for Galvanic Coupled Intrabody Communication Through Layered Tissue. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 10 (2), 339-351.
- Tomlinson, W.J., Abarca, F., Chowdhury, K.R., Stojanovic, M., Yu, C., 2015. Experimental Assessment of Human-Body-Like Tissue as a Communication Channel for Galvanic Coupling. *12th IEEE International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*, 1-6.
- Troller-Renfree, S.V., Morales, S., Leach, S.C., Bowers, M.E., Debnath, R., Fifer, W.P., Fox, N.A. and Noble, K.G. 2021. Feasibility of Assessing Brain Activity Using Mobile, in-Home Collection of Electroencephalography: Methods and Analysis. *Developmental Psychobiology*, 63(6): e22128.
- Vizziello, A., Galluccio, L., Magarini, M., Savazzi, P., Biglioli, F., Bolognesi, F., Magenes, G., 2022. An Implantable System for Neural Communication and Stimulation: Design and Implementation. *IEEE Communication Magazine*, 60 (8), 74-79.
- Vizziello, A., Magarini, M., Savazzi, P., Galluccio, L., 2023. Intra-Body Communications for Nervous System Applications: Current Technologies and Future Directions, *Comput. Networks*, 227, 109718.
- Wang, H., Tang, X., Choy, C.S., Sobelman, G.E., 2015. Cascaded Network Body Channel Model for Intrabody Communication. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 20 (4), 1044-1052.
- Wegmüller, M.S., 2007. *Intra-Body Communication for Biomedical Sensor Networks*. Doktora Tezi. ETH Zurich, İsviçre.