

7'den 77'ye Bağlı Dielektrik Sabiti Değerlerini Kapsayan PEG-100 Stearat Bazlı Doku Fantomu Geliştirme Yöntemi

Anıl Tülü, Burak Ferhat Özcan, Sema Dumanlı*

Boğaziçi Üniversitesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İstanbul

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

Özet: İnsan bedeninin dielektrik özelliklerini taklit eden fantomlar, giyilebilir ve implant edilebilir cihazların test süreçlerinde kritik öneme sahiptir. Bu fantomlar çeşitli tekniklerle farklı formlarda üretilmektedir. Bu çalışmada geniş bantlı fantom üretiminde PEG-100 Stearatın emülgatör olarak kullanımı önerilmiş, fantomların geliştirme adımları bileşenlerin dielektrik özelliklere etkileri incelenerek anlatılmıştır. Kas fantomu, insan ortalama fantomu ve kortikal kemik fantomu tarifi ile protokol anlatılmıştır. Bu fantomlar, 1 GHz ile 6.7 GHz aralığında dokuların dielektrik özelliklerini %10'dan az bir hata payıyla geniş bant performansı ile taklit etmektedir.

Abstract: Phantoms play a critical role in the measurement setups for wearable and implantable devices. While various methods exist for phantom development, in this study PEG-100 Stearate is proposed as an emulsifying agent for the development of wide-band liquid phantoms. The detailed protocol for phantom development is presented, with a analysis of how components influence the electrical properties. This methodology is demonstrated through the preparation of a muscle phantom, a human average phantom, and a bone cortical phantom. These phantoms accurately mimic the electrical characteristics of target tissues in a broad frequency spectrum from 1 GHz to 6.7 GHz, within an error margin below 10%.

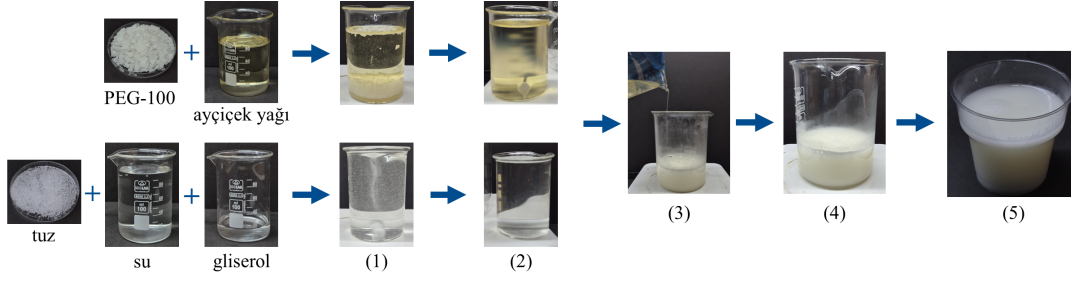
1. Giriş

Giyilebilir ve implant edilebilir teknolojilerin gelişmesiyle, insan dokularının dielektrik özelliklerini taklit eden fantomlar test süreçlerinde kritik hale gelmiştir. Bu fantomların bağlı dielektrik sabiti ve iletkenliği, hedef dokuya uygun şekilde çeşitli yöntemlerle ayarlanabilir. İletkenlik için genellikle tuz, eğrinin türevini geniş bantlı optimize etmek için gliserol kullanılır [1]. İnsan dokularının bağlı dielektrik sabiti, içerdiği su oranına göre 1 GHz'de 3 ila 77 arasında değişebilir [2]. Saf suya bağlı dielektrik sabitini düşüren maddeler eklenerek farklı dokular taklit edilebilir. Bu amaçla yağ [3], Triton X-100 (TX-100) [4], ECOSURF SA-9 [5], Tween [6], etanol [7], izopropanol (IPA) [8], şeker [9] ve akrilamid [10] gibi maddeler yaygın şekilde kullanılmıştır. Yağ en uygun maliyetli seçenek olsa da su ile homojen karışması için emülgatör gerektirir. Literatürde TX-100, ECOSURF SA-9, Tween ve deterjan gibi emülgatörlerle düşük bağlı dielektrik sabiti sağlanabilmekte, bunlardan TX-100 ve deterjanla geniş bantlı karakteristik elde edilebilmektedir. Ancak TX-100 pahalıdır ve su canlılarına toksik, ayrıca cilt ve göz için tahriş edici olabilir. Deterjan ise aşırı köpürerek karışımın homojenliğini bozabilir [11].

Bu çalışmada kullanılan Polietilen Glikol (PEG) 100 Stearat, düşük maliyetli ve toksik olmayan noniyonik bir yüzey aktif maddedir. Literatürde daha önce fantom üretiminde kullanılmamıştır. Önerilen fantom tarifi, düşük bağlı dielektrik sabitli dokuları taklit edebilmekte ve geniş bantta çalışabilmektedir. [3]'te verilen çalışmanın aksine toksik madde içermemektedir. Fantom bileşimi ve üretim protokolü Bölüm 2'de, bileşenlerin bağlı dielektrik sabiti ve iletkenlik üzerindeki etkisi Bölüm 3'te anlatılmıştır. Bölüm 4'te kas dokusu, kemik dokusu ve insan ortalama olmak üzere üç örnek fantom tarifi tanıtılmış, ve Bölüm 5'de sonuçlara yer verilmiştir.

2. Fantom İçeriği ve Protokol

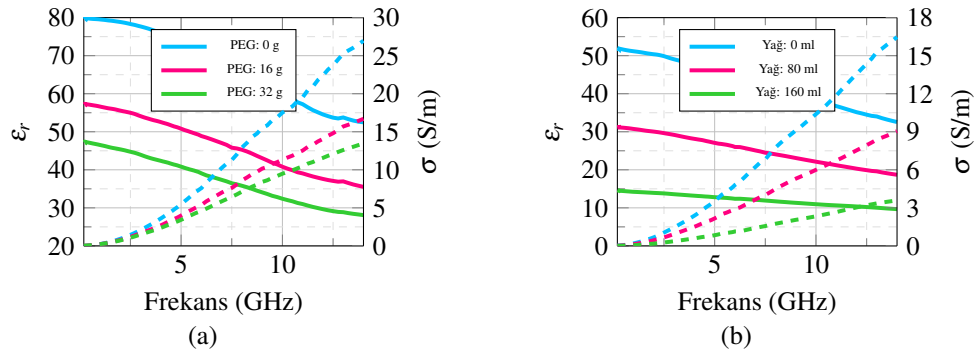
Önerilen fantom su, PEG-100 stearat, yağ, gliserol ve tuz içermektedir. Bağlı dielektrik sabiti su, yağ ve PEG-100 stearatı farklı oranlarda karıştırarak ayarlanırken, iletkenlik ise tuz ve gliserol oranıyla ayarlanmaktadır. Fantomun dielektrik özellikleri SPEAG DAK 3.5 probu kullanılarak analiz edilmiştir. Fantomlar Şekil 1'de gösterilen adımlarla geliştirilmiştir. İlk olarak bir beherde tuz, gliserol ve su, başka bir beherde ise PEG-100 stearat ve ayçiçek yağı 60°C'de homojen bir karışım oluşturma kadar ısıtılarak karıştırılır. Ardından sulu karışım yavaşça PEG-100 stearat karışımına eklenir ve 80°C'ye kadar karıştırmaya devam edilir. Daha sonra karışım oda sıcaklığına kadar karıştırılarak soğutulur. Buharlaşma ile su kaybını önlemek için fantom kapalı bir kapta saklanmalıdır. Ayrıca fantomun raf ömrü antimikrobiyal madde kullanılarak uzatılabilir, ancak bu durum makalenin kapsamı dışındadır.



Şekil 1. Fantom üretimi (1) Bir behere PEG-100 ve ayçiçek yağı eklenirken diğer behere tuz, su ve gliserol eklenir. (2) 60°C'de homojen olana kadar ısıtarak karıştırılır. (3) Sulu karışım PEG-100'lü karışıma yavaşça eklenir. (4) Karışım oda sıcaklığında homojen olana kadar soğutarak karıştırılır. (5) Elde edilen sıvı fantom.

3. Dielektrik Özelliklerin Ayarlanması

Fantomun bağıl dielektrik sabiti ayarı iki aşamalıdır. 1 GHz'de 50'den yüksek bağıl dielektrik sabiti değerleri için ayçiçek yağı eklenmeden sadece PEG-100 ile ayarlanabilmektedir. Şekil 2 (a)'da artan PEG-100 stearat oranıyla karışımın bağıl dielektrik sabitinin ve iletkenliğin azaldığı gösterilmektedir. Bağıl dielektrik sabiti 50'den düşük değerler için ayçiçek yağı eklenmelidir. Çünkü sadece PEG-100 stearat ve su karışımı ile bu değerlere inilirse karışım aşırı viskoz olmaktadır. Eklenen ayçiçek yağı ile PEG-100 stearat ve su karışımının bağıl dielektrik sabiti ve iletkenliği Şekil 2 (b)'de görüldüğü üzere tüm bant boyunca azalmıştır. İletkenlik değeri ise tuz ve gliserol ile ayarlanabilmektedir. Tuzun iletkenlik artırıcı etkisi literatürde sıkça bahsedilmiştir. Gliserolle de eğrinin türevi iyileştirilebilmektedir, ancak gliserolün bağıl dielektrik sabitini azaltıcı etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.



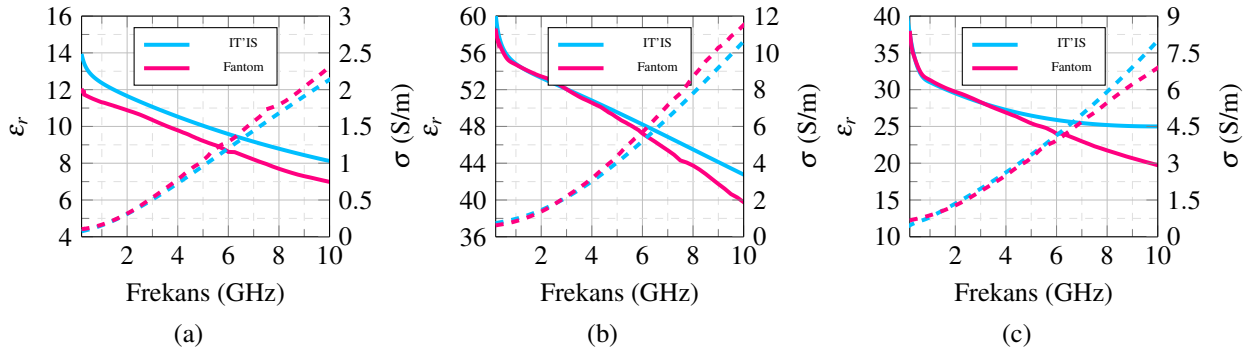
Şekil 2. (a) 100 ml suda artan PEG-100 stearat oranının ϵ_r ve σ değerleri, (b) 100 ml su ve 18 g PEG-100 stearat karışımında artan ayçiçek yağı oranının ϵ_r ve σ değerleri.

4. Fantom Tarifleri

Önerilen protokolle yüksek, düşük ve ortalama bağıl dielektrik sabiti değerlerine sahip olan insan kas dokusu, insan kortikal kemik dokusu ve insan ortalamasını taklit eden üç farklı fantom tarifi geliştirilmiştir. Önerilen insan kası fantomu 100 ml su, 16.2 g PEG-100 stearat ve 0.25 g tuzdan oluşmaktadır. Bu karışımında yağ gerekmediğinden bileşenler, karışım homojen olana kadar tek beherde karıştırılabilir. Fantomun bağıl dielektrik sabiti ve iletkenliği, Şekil 3 (a)'da görülebilmektedir. Önerilen insan kortikal kemik fantomu 100 ml su, 22.6 g gliserol, 177.4 ml ayçiçek yağı, 9.7 g PEG-100 stearat ve 0.97 g tuz içermektedir. Fantomun bağıl dielektrik sabiti ve iletkenliği, Şekil 3 (b)'de verilmiştir. Daha düşük bağıl dielektrik sabiti değerlerine ulaşırken yağ-su oranı 1'i aşmaktadır ve homojenliği sağlamak amacıyla yüksek hızlı bir karıştırıcı kullanılmıştır. İnsan ortalamasını temsil eden fantom ise 100 ml su, 16.7 g gliserol, 77.3 ml ayçiçek yağı, 16.7 g PEG-100 stearat ve 1.92 g tuzdan oluşmaktadır. Fantomun bağıl dielektrik sabiti ve iletkenliği, Şekil 3 (c)'de verilmiştir. Geliştirilen fantomlar, gerçek dokunun bağıl dielektrik sabiti ve iletkenliğini 1 GHz ile 6.7 GHz aralığında %10'luk bir hata payı dahilinde kapsamaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada emülgatör olarak PEG-100 stearat kullanılan geniş bantlı sıvı fantom geliştirilmiştir. Bileşenlerin bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. PEG-100 stearat sadece emülgatör olarak değil, aynı zamanda bağıl dielektrik sabitini azaltmak için de kullanılmıştır. Yağın iletkenlik eğrisinin eğimine



Şekil 3. Üç farklı fantomun (a) kortikal kemik, (b) insan kası ve (c) insan ortalaması için bağlı dielektrik sabiti ve iletkenlik değerlerinin IT'IS [2] veri tabanı ile karşılaştırılması.

etkisi, gliserolün eğimi artırıcı etkisiyle dengelenmiştir. Protokol, 1 GHz ila 6.7 GHz arasında geniş bant performanslı kas, kemik ve insan ortalaması fantomları aracılığıyla gösterilmiştir. Önerilen fantomun, giyilebilir ve implant edilebilir cihazların testi için düşük maliyetli, toksik olmayan ve kolay bir yöntem sunduğu gösterilmiştir.

Kaynaklar

- [1] P. M. Meaney, C. J. Fox, S. D. Geimer ve K. D. Paulsen, "Electrical Characterization of Glycerin: Water Mixtures: Implications for Use as a Coupling Medium in Microwave Tomography," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, cilt 65, sayı 5, ss. 1471–1478, Mayıs 2017, doi: 10.1109/TMTT.2016.2638423.
- [2] IT'IS Foundation, "IT'IS Database for Thermal and Electromagnetic Parameters of Biological Tissues," [Çevrim içi]. Erişim adresi: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties>, Erişim tarihi: 17 Ekim 2024.
- [3] M. Lazebnik, E. L. Madsen, G. R. Frank ve S. C. Hagness, "Tissue-mimicking phantom materials for narrowband and ultrawideband microwave applications," *Phys. Med. Biol.*, cilt 50, sayı 18, ss. 4245–4262, 2005, doi: 10.1088/0031-9155/50/18/001.
- [4] S. Romeo, L. Di Donato, O. M. Bucci, I. Catapano, L. Crocco, M. R. Scarfi ve R. Massa, "Dielectric characterization study of liquid-based materials for mimicking breast tissues," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, cilt 53, ss. 1276–1280, 2011, doi: 10.1002/mop.26001.
- [5] A. F. Carnicero, S. Raman, A. Fernández-Escribano, M. Redondo-Horcajo, T. Suárez ve A. K. Skrivervik, "Biodegradable and Easy-to-Make Broadband Tissue Phantoms Between 0.4 and 6 GHz Based on Phosphate Buffered Saline Solution," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, doi: 10.1109/TMTT.2024.3468444.
- [6] G. Hartsgrrove, A. Kraszewski ve A. Surowiec, "Simulated biological materials for electromagnetic radiation absorption studies," *Bioelectromagnetics*, cilt 8, sayı 1, ss. 29–36, 1987, doi: 10.1002/bem.2250080105.
- [7] S. Wood, N. Krishnamurthy, T. Santini, S. Raval, N. Farhat ve J. A. Holmes vd., "Design and fabrication of a realistic anthropomorphic heterogeneous head phantom for MR purposes," *PLoS ONE*, cilt 12, sayı 8, e0183168, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0183168.
- [8] T. Pokorny, D. Vrba, J. Tesarik, D. B. Rodrigues ve J. Vrba, "Anatomically and Dielectrically Realistic 2.5D 5-Layer Reconfigurable Head Phantom for Testing Microwave Stroke Detection and Classification," *Int. J. Antennas Propag.*, cilt 2019, Makale No. 5459391, 7 s., 2019, doi: 10.1155/2019/5459391.
- [9] T. Karacolak, A. Z. Hood ve E. Topsakal, "Design of a Dual-Band Implantable Antenna and Development of Skin Mimicking Gels for Continuous Glucose Monitoring," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, cilt 56, sayı 4, ss. 1001–1008, Nisan 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.919373.
- [10] A. Bilir ve S. Dumanlı, "Temperature-Dependent Electrical Characterization of a Thermally Sensitive Hepatic Tumor Phantom," *18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Glasgow, Birleşik Krallık, 2024, ss. 1–5, doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10500960.
- [11] E. Cil, C. Çadır, O. A. Katı, H. B. Yılmaz ve S. Dumanlı, "Machine Learning-Based Matching Medium Design for Implant Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 70, sayı 7, ss. 5199–5208, Temmuz 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3140497.