

Giyilebilir ve İmplant Anten Ölçümleri için Yarı Katı Doku Fantomlarının Geliştirilmesine Yönelik Teknikler

Techniques to The Development of Semi-solid Tissue Phantoms for Wearable and Implantable Antenna Measurements

Erdem Cil, Onur Tatar, Omer A. Kati, Z. Pelin Yıldırım, Sema Dumanlı

Özetçe —Bu bildiride, farklı dokuların elektriksel özelliklerini taklit edebilen ve özellikle giyilebilir ve implant antenlerin ölçümünde kullanılabilecek fantomların geliştirilmesi için iki farklı teknik önerilmiştir. Bu tekniklerden birisi uzun ömürlü fantomlar geliştirmeye yönelikken, diğeri geniş aralıkta dielektrik sabitini kontrol etmeyi hedeflemektedir. Geliştirilen fantomların elektriksel özelliklerini ölçmek için kullanılan yöntem açıklanmıştır. Ayrıca fantom yapımı sırasında kullanılan malzemelerin kullanım miktarlarının fantomun elektriksel özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar 2.5 GHz’de bağıl dielektrik sabiti için 32-65 aralığındaki değerlere, iletkenlik içinse 1.1-2.7 $\frac{S}{m}$ aralığındaki değerlere ulaşmak için gereken madde miktarlarını gösteren bir kılavuz olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler—fantom, bağıl dielektrik sabiti, iletkenlik, giyilebilir anten, implant anten.

Abstract—In this paper, two different techniques have been proposed for the development of phantoms that can mimic the electrical properties of different tissues and can be used in particular for the measurement of wearable and implant antennas. One of these techniques is aimed at developing long-life phantoms, while the other aims to control the dielectric constant over a wide range. The method used to measure the electrical properties of the developed phantoms is explained. In addition, the effect of each material used on the electrical properties of the phantom is investigated. The results are presented as a guide that shows the required amount of ingredients to reach relative permittivity and conductivity values in the range of 32-65 and 1.1-2.7 $\frac{S}{m}$ respectively at 2.5 GHz.

Keywords—phantom, relative permittivity, conductivity, wearable antenna, implant antenna.

I. GİRİŞ

İletişim ve elektronik alanlarındaki son gelişmeler sayesinde günümüzde insan bedeni içinde ya da üzerinde çalışabilecek kadar küçük cihazların üretimi mümkün olmaktadır [1]. İnsan dokularının yüksek bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri bedene yakın komşuluktaki bu cihazların kablosuz iletişim performansını olumsuz etkileyebilmektedir [2]. Bu

yüzden giyilebilir ve implant edilebilir antenlerin beden ile etkileşimini öngörerek cihazların buna göre eniyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir [3].

Fantomlar, insan bedeninin bu tür cihazlara olan etkisini incelemek için kurulan ölçüm ortamlarında kullanılan, insan dokularının elektriksel özelliklerini taklit edebilen yapılardır [4]. Bugüne kadar üretilmiş fantomlar değişik özellikleri baz alınarak birçok farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma örneklerinden biri fantomun formuna göre yapılan katı fantom [5], yarı-katı fantom [6] ve sıvı fantomdur [7]. Bir diğer sınıflandırma ise fantomun üretimi sırasında kullanılan ana madde baz alınarak yapılır [8] ve bu sınıflandırma su bazlı [7], jelatin içinde yağ [9], Triton X100 [10] ve 3D basılmış [11] gibi alt dalları kapsar.

Literatürde farklı kullanım amaçlarına yönelik önerilmiş birçok fantom yapısı bulunmaktadır. [5]’te önerilen fantom, 60 GHz’de hava ve deri arasındaki yansıma katsayısını taklit etmek için geliştirilmiştir. [7]’de insanın kalça bölgesini taklit edebilen bir fantom anlatılmıştır. Fotoakustik görüntülemeye kullanılmak üzere geliştirilen yağ bazlı bir fantom [12]’de sunulmuştur. [10], [13], [14]’te farklı materyaller kullanılarak üretilmiş meme fantomları anlatılırken [15]’te 3D basılmış bir meme fantomu önerilmiştir. Bu fantomlar özellikle meme kanseri gibi mikrodalga görüntülemenin önemli olduğu çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

Bu bildiride tartışılan tekniklerin ilkinde, su bazlı yarı-katı fantomlar üretmek için literatürde sunulmuş bir tekniğin geliştirilmiş versiyonu üzerinde çalışılmıştır. Önerilen ikinci teknik ise yenilikçi bir teknik olup fantomun bağıl dielektrik sabitinin kolayca değiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bildirinin II. bölümünde fantomun üretilmesinde kullanılan teknikler verilmiştir. III. bölümde elektriksel özelliklerinin ölçülmesinde kullanılan düzenek anlatılmıştır. IV. bölümde malzemelerin fantomun elektriksel özelliklerine olan etkisi incelenmiş ve bu incelemenin sonuçları yorumlanmıştır. V. bölüm çalışmayı sonuçlandırmaktadır.

II. SU BAZLI FANTOM GELİŞTİRME TEKNİĞİ

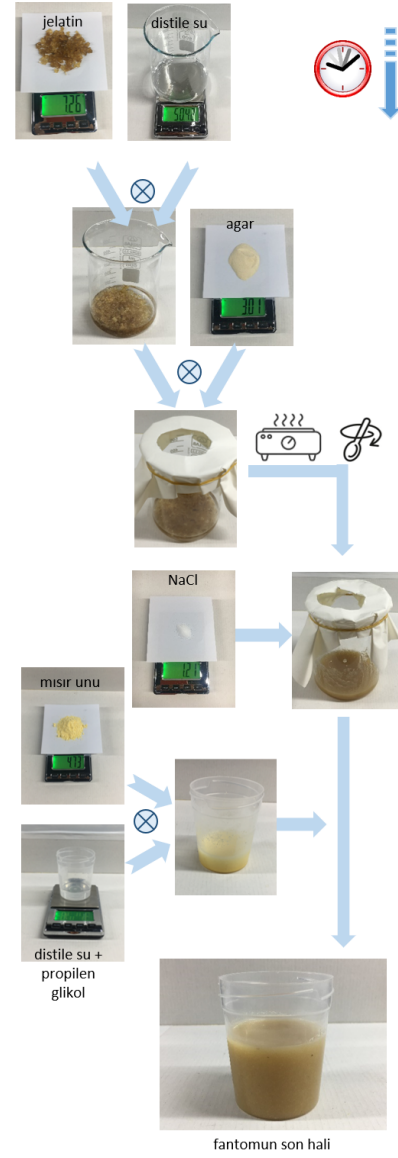
Fantomların hazırlanması sırasında kullanılan ilk teknik [6]’da verilen yöntem baz alınarak geliştirilmiştir. Geliştirilen

teknikğin aşamaları Şekil 1’de gösterilmiştir. İlk olarak belli miktarlardaki saf su, jelatin ve agar bir beherglas içine koyulur. Başka bir kaba oda sıcaklığında su koyulur, bu su ısıtıcı yardımıyla ısıtılırken beherglas içindeki karışım da bu suyun içinde 75°C’ye ulaşana kadar ısıtılır. Bu ısıtma süreci esnasında beherglas, suyun buharlaşmasını minimuma indirmek için alüminyum folyo ya da benzeri bir materyal ile kapatılır. Alüminyum folyonun ortasında açılan bir delikten karışım mikser yardımıyla sürekli karıştırılır. Bu şekilde jelatin ve agarın beherglasın dibine yapışması engellenerek suyun içinde eriyip dağılması sağlanır ve viskozitesi yüksek, homojen bir sıvı elde edilir. Bu sırada başka bir kaptaki jelatin ve agarla karıştırılan suyun yarısı kadar saf su ve propilen glikol karıştırılır. Bu karışıma mısır unu yavaş yavaş karıştırılarak eklenir. Birinci karışımın sıcaklığı 75°C’ye kadar sodyum klorür (NaCl) eklenir. Dört dakika sonra ikinci karışım da birincisine eklenir. Homojen bir hal alana kadar sabit sıcaklıkta tutulur. Ardından karışım manyetik karıştırıcı çalışır halde soğumaya bırakılır. Sıcaklık 45°C’ye indiği zaman sodyum azit (NaN₃) eklenir. Sodyum azit toksik olduğu için bu aşamada dikkatli olunmalıdır. Fantom oda sıcaklığına düşene kadar karıştırılmaya devam edilir. Elektriksel özellikleri oda sıcaklığında ölçülür. Burada daha geniş bir dielektrik sabiti aralığında fantom üretilmesi için [6]’da verilen teknik geliştirilmiştir ve bu amaçla teknığe üç ekstra adım eklenmiştir.

İkinci fantom geliştirme tekniği Şekil 2’de gösterilmiştir. İlk olarak bir kaptaki saf su ve propilen glikol oda sıcaklığında karıştırılır. Aynı bir beherglasın içinde bunun iki katı kadar saf su 60°C’ye kadar ısıtılır. Daha sonra mısır nişastası karıştırılarak eklenir, bu esnada ısıtma işlemine devam edilir. Karışıma hedeflenen iletkenlik değerine ulaşmayı sağlayacak miktarda tuz eklenir, bu miktar ilgili iletkenlik davranışı grafiğinden belirlenebilir. Karışım homojen hal aldıktan sonra su ve propilen glikol eklenir. Bu aşamaya kadar karışımın sıcaklığı 60-65°C arasında tutulur. Isıtma ve karıştırma işlemlerine devam edilirken mısır unu eklenir. Kıvamı artırmak için bu aşamada sıcaklık 85-90°C’ye yükseltilir. Tüm karışım homojen ve viskozitesi yüksek bir hal alana kadar karıştırılmaya devam edilir. Mısır ununun çökmediğinden emin olunduktan sonra karışım soğumaya bırakılır. Oda sıcaklığındaki karışıma hedeflenen bağıl dielektrik sabitine ulaşmayı sağlayacak miktarda mısır unu eklenir ve homojen dağılım sağlanır. Oda sıcaklığında eklenecek mısır ununun miktarı ilgili dielektrik sabiti davranışı grafiğinden belirlenebilir.

III. ÖLÇÜM DÜZENİĞİ

Verilen tariflerle geliştirilen fantomların kullanılmadan önce bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerlerinin ölçülmesi ve bu değerlerin başta hedeflenen değerlere yakın olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Elektriksel özelliklerin ölçümü için [16] ve [17]’de verilen açık uçlu koaksiyel kablo yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, koaksiyel kablunun açık ucu sırasıyla bağıl dielektrik sabiti bilinen iki ortama ve elektriksel özellikleri belirlenmek istenen bir test ortamına yerleştirilir ve bu üç durumda yansıma katsayısı ölçülür. Daha sonra ilk iki ölçümdeki yansıma katsayıları referans alınarak test ortamında elde edilen yansıma katsayısına göre bu ortamın elektriksel özellikleri belirlenir. Bu süreçte kullanılan iterasyon şeması [16]’da verilmiştir. Ölçümler sırasında Şekil 3’te görüldüğü üzere açık uçlu koaksiyel kablo olarak 9 cm boyunda RG402 yarı-katı koaksiyel kablo ve bağıl dielektrik sabiti

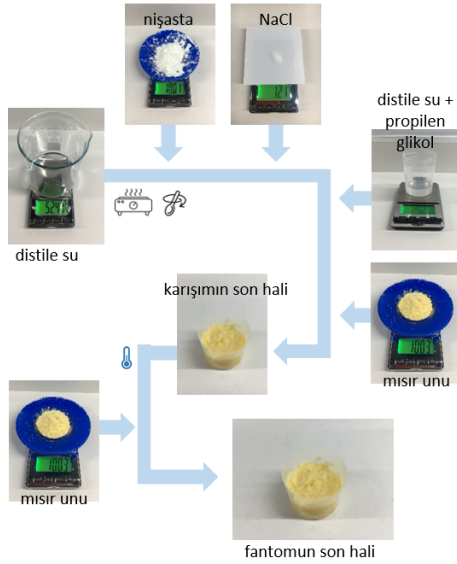


Şekil 1: 1. fantom hazırlama tekniği

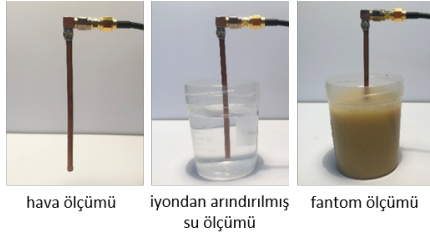
bilinen iki ortam olarak hava ($\epsilon_r = 1$) ve iyondan arındırılmış su ($\epsilon_r = 80$) kullanılmıştır. Yöntemi teyit etmek için etil alkolün elektriksel özellikleri ölçülmüştür ve Şekil 4’te gösterilmiştir. Sonuçlar literatürde bilinen değerlerle uyumaktadır.

IV. DIELEKTRİK SABİTİ VE İLETKENLİK DAVRANIŞI

Farklı insan dokularının 2.5 GHz’deki bağıl dielektrik sabiti değerleri 10-78 arasında değişirken iletkenlik değerleri 0.1-3.5 $\frac{S}{m}$ aralığında değişmektedir [18]. Bildirinin bu bölümünde, sunulan iki fantom geliştirme tekniğinde kullanılan malzemelerin kullanım miktarlarının fantomun elektriksel özelliklerine olan etkisi araştırılmış ve bu tekniklerle kapsanabilen bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik aralığı saptanmıştır. Bu amaçla fantomun üretimi sırasında kullanılan malzemelerin miktarları kontrollü bir biçimde değiştirilerek birçok örnek üretilmiş ve bu örneklerin elektriksel özellikleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerin sonuçları verilen davranış grafiklerinde noktalar ile gösterilmiştir ve bu noktalara yakınsayan fonksiyonlar çizdirilmiştir. Malzemelerin kullanım miktarları Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 2: 2. fantom hazırlama tekniği



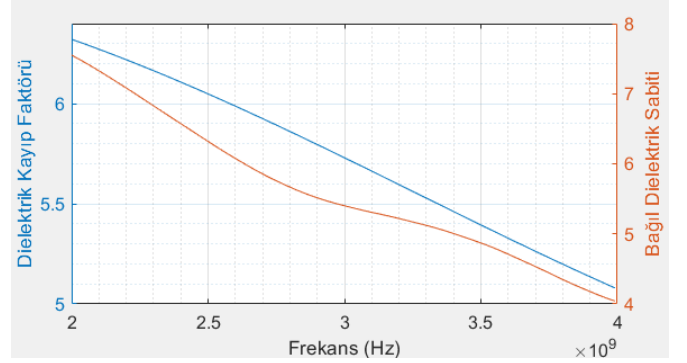
Şekil 3: Yansıma katsayısı ölçüm düzeneği

A. Dielektrik Sabiti Davranışı

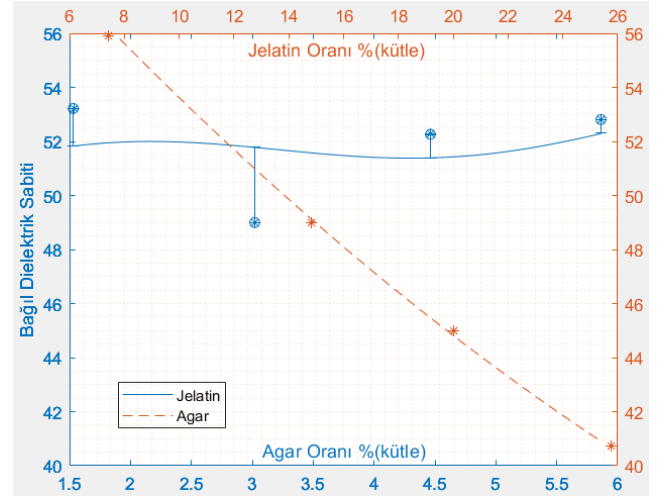
Önerilen fantom geliştirme tekniklerinde su en yüksek dielektrik sabiti olan malzeme olup diğer malzemeler ile oluşan karışımın dielektrik sabiti düşürülmektedir. Önerilen ilk teknikte kullanılan jelatin ve agar miktarlarının fantomun 2.5 GHz'deki dielektrik sabitine olan etkileri Şekil 5'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kullanılan jelatin miktarının artması fantomun dielektrik sabitini düşürmektedir ve farklı dokuların dielektrik sabiti değerine ulaşmak için Şekil 5'te verilen grafik kullanılabilir. Kullanılan agar miktarının dielektrik sabitine etkisi önemsiz seviyededir. Şekil 5'te gözlenebilecek ufak değişimler örneklerin üretimi sırasında kaptan buharlaşan su miktarlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Agar bu teknikte kıvam verici olarak kullanılmaktadır. Özellikle 50 ve üzeri dielektrik sabitli dokuları taklit eden fantom hedefleniyorsa, agar kullanılmadan yeterli kıvama ulaşılması zorlu bir hale gelmektedir. Buna ek olarak verilen sonuçların 1-3 GHz aralığında fazla değişim göstermediği gözlenmiştir. Önerilen ikinci teknikte farklı dielektrik sabitlerine ulaşmak için fantomdaki mısır unu miktarı değiştirilmektedir. Mısır ununun fantomun dielektrik sabitine olan etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir ve görüldüğü üzere mısır unu miktarı arttıkça dielektrik sabiti azalmaktadır. Ek olarak, ikinci teknik kullanıldığında birinci tekniğe göre dielektrik sabiti daha geniş bir aralıkta kontrol edilebilmektedir. Fakat 1. teknikle üretilen fantomların 2. tekniğe göre daha stabil olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi 2. teknikle üretilen fantomun daha hızlı su kaybetmesidir.

TABLO I: 2 TEKNİK İÇİN MALZEME MİKTARLARI VE DEĞİŞİM ARALIKLARI

Malzeme	Kullanım miktarı(g)	
	1. teknik	2. teknik
Saf su	75.6	78.7
Mısır unu	4.7	10+5↔40
Mısır nişastası	*	10
Jelatin	7.2↔29	*
Agar	1.5↔6	*
Sodyum azit	0.3	*
Propilen glikol	0.6	1
Tuz	0.3↔1.2	0↔0.5



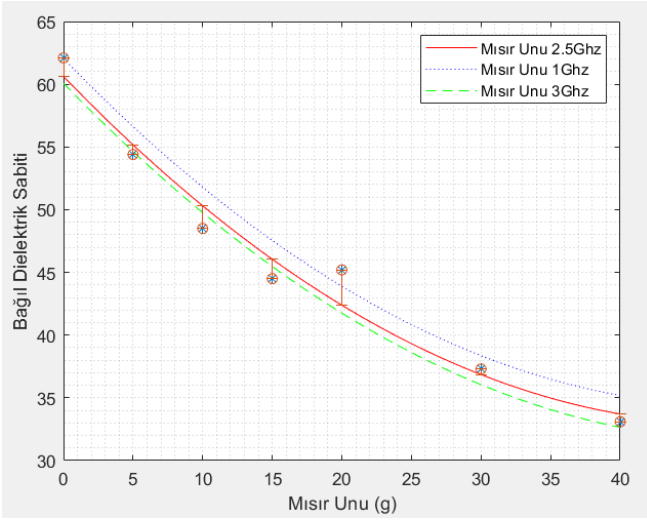
Şekil 4: Etil alkolün ölçülen elektriksel özellikleri



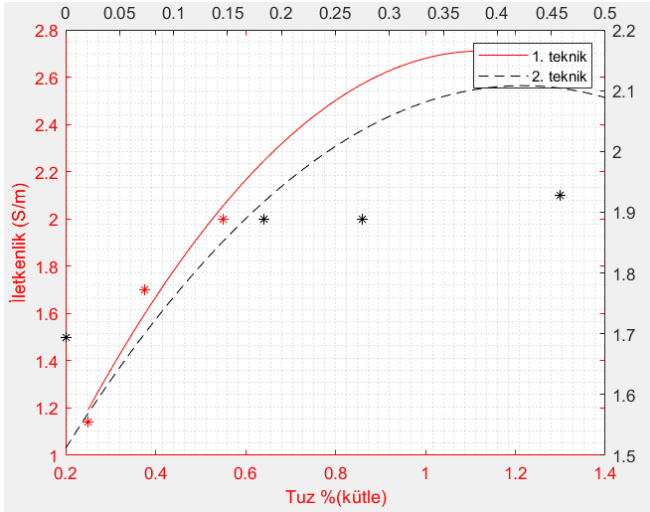
Şekil 5: 1. teknikte bağıl dielektrik sabitinin jelatin ve agar miktarına göre değişimi

B. İletkenlik Davranışı

Sunulan fantom geliştirme tekniklerinde fantomun iletkenlik değerini etkileyen malzeme tuzdur. Üretilen fantomun iletkenlik değerinin kullanılan tuz miktarına göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Bu grafiğe göre hazırlanan fantomun iletkenliği özinyeli olarak eniyileştirilebilir. İyonik bir çözeltinin iletkenliğinin çözünmüş iyon konsantrasyonu ile ilişkisinin beklendiği üzere, Şekil 7'de tuz miktarının karekökü ile iletkenlik arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenmiştir [19].



Şekil 6: 2. teknikte bağıl dielektrik sabitinin ikinci aşamada eklenen mısır unu miktarına göre değişimi



Şekil 7: İletkenliğin tuz miktarına göre değişimi

V. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı elektriksel özelliklere sahip dokuları taklit edebilen fantomların üretilmesi için geliştirilen 2 farklı teknik sunulmuştur. Fantomun geliştirilmesi sırasında uygulanan adımlar aşama aşama verilmiş ve dikkat edilmesi gereken durumlar belirtilmiştir. Ayrıca geliştirilen fantomun elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntem anlatılmıştır. Son olarak fantomun üretilmesinde kullanılan malzemelerin kullanım miktarlarının fantomun bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında bağıl dielektrik sabiti 32 ile 65, iletkenliği 1.1 ile 2.7 $\frac{S}{m}$ değerleri arasında olmak üzere su bazlı yarı katı fantomlar için ihtiyaç duyulacak malzemelerin miktarları verilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] M. El Abbasi and K. Kabalan, "Revolutionizing the development of wearable antennas," in *2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, March 2019, pp. 54–57.

[2] S. Ma, L. Ukkonen, L. Sydänheimo, and T. Björninen, "Comparison of human head phantoms with different complexities for implantable antenna development," in *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*, July 2018, pp. 1–2.

[3] K. N. Paracha, S. K. Abdul Rahim, P. J. Soh, and M. Khalily, "Wearable antennas: A review of materials, structures, and innovative features for autonomous communication and sensing," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 56 694–56 712, 2019.

[4] C. Garcia-Pardo, C. Andreu, A. Fornes-Leal, S. Castelló-Palacios, S. Perez-Simbor, M. Barbi, A. Vallés-Lluch, and N. Cardona, "Ultrawideband technology for medical in-body sensor networks: An overview of the human body as a propagation medium, phantoms, and approaches for propagation analysis," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 60, no. 3, pp. 19–33, June 2018.

[5] A. R. Guraliuc, M. Zhadobov, O. De Sagazan, and R. Sauleau, "Solid phantom for body-centric propagation measurements at 60 ghz," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 6, pp. 1373–1380, June 2014.

[6] A. T. Mobashsher and A. M. Abbosh, "Three-dimensional human head phantom with realistic electrical properties and anatomy," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1401–1404, 2014.

[7] E. Cil and S. Dumanli, "Characterization of an implanted antenna inside a 3d printed multilayer hip phantom," in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, March 2019, pp. 1–4.

[8] J. Moll, D. Wörtge, D. Byrne, M. Klemm, and V. Krozer, "Experimental phantom for contrast enhanced microwave breast cancer detection based on 3d-printing technology," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, April 2016, pp. 1–4.

[9] G. Ruvio, R. Solimene, A. Cuccaro, J. E. Browne, D. Gaetano, and M. J. Ammann, "Experimental microwave breast cancer detection with oil-on-gelatin phantom," in *2013 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Sep. 2013, pp. 871–874.

[10] N. Joachimowicz, C. Conessa, T. Henriksson, and B. Duchêne, "Breast phantoms for microwave imaging," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1333–1336, 2014.

[11] M. J. Burfeindt, T. J. Colgan, R. O. Mays, J. D. Shea, N. Behdad, B. D. Van Veen, and S. C. Hagness, "Mri-derived 3-d-printed breast phantom for microwave breast imaging validation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1610–1613, 2012.

[12] F. W. Grillo, L. C. Cabrelli, D. R. T. Sampaio, A. A. O. Carneiro, and T. Z. Pavan, "Glycerol in oil-based phantom with improved performance for photoacoustic imaging," in *2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Sep. 2017, pp. 1–4.

[13] V. G. Sirtoli, K. Morcelles, and P. Bertemes-Filho, "Electrical properties of phantoms for mimicking breast tissue," in *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, July 2017, pp. 157–160.

[14] E. Porter, J. Fakhoury, R. Oprisor, M. Coates, and M. Popović, "Improved tissue phantoms for experimental validation of microwave breast cancer detection," in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, April 2010, pp. 1–5.

[15] M. Klemm, J. A. Leendertz, D. Gibbins, I. J. Craddock, A. Preece, and R. Benjamin, "Microwave radar-based breast cancer detection: Imaging in inhomogeneous breast phantoms," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1349–1352, 2009.

[16] F. M. Ghannouchi and R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 2, pp. 505–508, April 1989.

[17] D. ALPTEKIN, "Dual band microstrip implantable antenna design for biomedical applications," Ph.D. dissertation, MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2015.

[18] <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>, January 2020.

[19] S. Matsunaga and S. Tamaki, "Ionic conduction in electrolyte solution," *Journal of Solution Chemistry*, vol. 43, no. 9-10, pp. 1771–1790, 2014.