

# Mikrodalga Dielektrik Spektroskopi ile Sert ve Yumuşak Doku Karakterizasyonunun Ön İncelenmesi

## Preliminary Investigation of Hard and Soft Tissue Characterization with Microwave Dielectric Spectroscopy

Seda Keskin<sup>1</sup>, Tuba Yılmaz<sup>1</sup>, Tayfun Akgül<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi

keskins19@itu.edu.tr, tuba.yilmaz@itu.edu.tr, tayfunakgul@itu.edu.tr

### Özet

Mikrodalga frekanslarında sert ve yumuşak dokular arasındaki dielektrik özellik farkı yumuşak dokuların sert dokulardan ayrılması için kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Biyolojik dokuların mikrodalga frekanslarda dielektrik özellikleri geleneksel olarak açık uçlu koaksiyel prob tekniği ile ölçülür. Bununla birlikte, doku heterojenitesi, kullanıcı hataları, matematiksel yaklaşım ve kalibrasyon bozulması nedeniyle kullanılan teknik yüksek hata oranlarına sahiptir. Farklı değerlere sahip veri gruplarına makine öğrenimi algoritması uygulandığında verinin yüksek doğrulukta sınıflandırılacağı bilinmektedir. Bu nedenle, tekniğe özgü hatalardan en az etkilenebilecek bir sınıflandırma parametresinin seçilmesi, doku kategorizasyonunun doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir. Empirik olarak, mikrodalga frekanslarındaki dielektrik özellikler güç yasasına uyar. Bu olguya göre daha önce araştırılmamış bir parametre, dielektrik özelliklerden elde edilebilecek güç parametresidir. Bu kapsamda güç parametresinin farklı dokuları, özellikle sert ve yumuşak dokuları, ayırabilme potansiyeli bu çalışmada literatürde verilmiş olan veri gruplarından yola çıkarak araştırılmıştır. Ayrıca güç parametresinin etkinliğini araştırmak amaçlı sağlıklı ve kanserli karaciğer dokularına ait dielektrik özellik ölçümlerine ait güç parametreleri kullanılarak makine öğrenme algoritmalarıyla sınıflandırma yapılmıştır. Uygulanan teknik sonucu %82 doğruluk elde edilmiştir. Bu kapsamda güç parametresinin doku sınıflandırılmasında dielektrik özelliklere ek olarak farklı bilgi barındıran bir özellik olarak kullanılabilirliği öngörülmektedir. Alternatif olarak, bazı durumlarda dielektrik özellikler yeterli bilgi sağlamaz, bir örnek sert ve yumuşak dokuların ayrılmasıdır, bu koşullar altında güç parametresi sınıflandırma amacıyla kullanılabilir. Bu yaklaşım yüksek maliyetli görüntüleme veya mutasyon tarama testlerine alternatif bir hızlı tanı yöntemi olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga dielektrik özellikler, Cole-Cole denklemi, Güç yasası, Mikrodalga teşhis.

### Abstract

The dielectric property discrepancy between hard and soft tissues at microwave frequencies can potentially be utilized for the separation of these tissues from one another. Microwave dielectric properties of biological tissues are traditionally measured with the open-ended coaxial probe technique. However, the technique suffers from high error rates due to tissue heterogeneity, user errors, mathematical approach and calibration degradation. It is known that datasets with different values can be classified with high accuracy when a machine learning algorithm is applied. Therefore, choosing a classification parameter that can be least affected by inherent errors is critical for increasing the accuracy of tissue categorization. Empirically, dielectric properties at microwave frequencies abide by the power law. Based on this fact, one unexplored parameter is the power parameter which can be derived from the dielectric properties. To this end, this work presents investigations on the potential use of the power parameter to separate different tissues, specifically hard and soft tissues, based on the datasets available in the literature. Additionally, in order to investigate the effectiveness of the power parameter, classification was performed with machine learning algorithms using the power parameters obtained from dielectric property measurements of healthy and malignant liver tissues. Through the application of the technique 82% accuracy was obtained. Towards this goal, it is predicted that the power parameter can be used as a feature containing different information in addition to dielectric properties in tissue classification. Alternatively, in some cases dielectric properties do not provide enough information, one example is the separation of hard and soft tissues, under such conditions the power parameter can be employed for classification purposes. This approach can possibly be used as an alternative rapid diagnostic method to highcost imaging or mutation screening tests.

Keywords: Microwave dielectric properties, Cole-Cole equation, Power law, Microwave diagnostics.

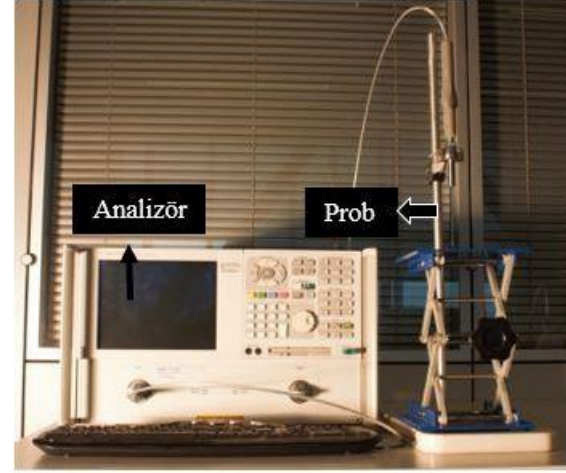
## 1. Giriş

Mikrodalga dielektrik spektroskopisi son 20 yıldır dokuların dielektrik özelliklerini karakterizasyon amaçlı laboratuvar ortamlarında kullanılmaktadır [1]. Doku dielektrik ölçümlerinin toplanmasındaki ana motivasyon mikrodalga görüntüleme veya mikrodalga hipertermi ya da ablasyon gibi teşhis ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamaktır. Fakat, geçtiğimiz yıllarda mikrodalga dielektrik spektroskopinin tek başına bir teşhis yöntemi olarak yüksek doğrulukta kanserli doku teşhisi amaçlı kullanılabileceği öne sürülmüştür [2]. Fakat, mikrodalga dielektrik spektroskopi için sıklıkla kullanılan açık uçlu prob yönteminin yüksek hatalı ölçüm yaptığı ve bazı dokuların arasındaki dielektrik özellik farkının, yumuşak ve sert doku gibi, ölçüm hatasını tolere edebilecek kadar farklı olmadığı bilinmektedir. Matür kistik teratomlar yumuşak ve sert dokuları beraber bulunduran biyolojik yapılarına örnek oluşturmaktadır. Literatürde tüm yumurtalık tümörleri arasında görülme sıklığı %10-20 arasında değişen matür kistik teratomlar en sık karşılaşılan iyi huylu tümörlerdir [3-6]. Bu tümörlerin, üreme çağındaki kadınlarda (20-40 yaş) teşhis sıklığı %45-60 arasındadır. Matür kistik teratomları yapılarında yağ, kıl, diş, kıkırdak ve kemik gibi dokuları bulundururlar. Dermoid kist ismiyle de bilinen teratomların teşhisi; ultrasonografi, bilgisayarlı tomografi ve manyetik rezonans görüntüleme gibi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Ancak bu yöntemler yalnızca operasyon öncesi planlama için ön bilgi sağlamak amaçlı kullanılmaktadır. Yakın literatürde sunulan ve doku sınıflandırılması için kullanılabilecek bir başka yöntem ise mikrodalga spektroskopi tekniğidir [7]. Mikrodalga spektroskopi ile şüphelenilen dokudan hızlıca veri toplanabilir. Daha sonra bu verilerin otomize olarak sınıflandırılması ile laboratuvar ortamında testlere ya da radyolog gibi eğitimli personele ihtiyaç duyulmaksızın dokunun çeşidine karar verilebilir. Bu teknoloji hem teşhis amaçlı hem de ameliyat sırasında sınır belirlemek amaçlı kullanılabilir.

Kemik dışı dokuların kemikleşerek kemik dokusu niteliği kazanmasına ossifikasyon denir. Bir başka ossifikasyon hastalığı ise "taş adam sendromu" olarak bilinen Fibrodysplasia ossificans progressiva (FOP) bağ dokusunun zamanla kemiğe dönüşmesine yol açan nadir bir genetik bozukluktur. Bu sendromun ilk belirtisi doğumdan sonra ve takip eden yıllarda pediatrik grubun ayak parmak boyutundaki farklılık ile gözlemlenir. Kesin tanısı ise sadece mutasyon tarama yöntemleri ile konmaktadır [8]. Bu bozukluğun herhangi bir cerrahi müdahale ile tedavisi söz konusu değildir; ancak mutasyon tarama yöntemlerinin yüksek maliyeti sebebiyle şüpheli dokuların dielektrik özelliklerinin ölçümü alternatif bir teşhis yöntemi olarak geliştirilebilir.

Mikrodalga teşhis ve tedavi yöntemleri dokular arasında doğal olarak bulunan dielektrik özellik farkına dayanır. Bu kapsamda, farklı dokuların dielektrik özellikleri literatürde farklı koşullar altında olmak üzere ölçülmüş ve dokuların kendi içerisinde su içeriğine göre dielektrik özelliklerinin farklılaştığı raporlanmıştır [9-10]. Aynı şekilde, sağlıklı dokular ile anomaliler arasında da dielektrik özellik farkları gözlemlenmiştir.

Dielektrik özellik ölçümleri genellikle açık uçlu koaksiyel prob tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir [11-13]. Tipik ölçüm düzeneği Şekil 1 ile gösterilen bu tekniğin pratik uygulamaları, mikrodalga biyopsi probu gibi, daha önce literatürde öngörülmüştür [14]. Fakat dielektrik özellikler doğrudan ölçülebilen karakteristik özellikler değildir. Bu nedenle çeşitli ölçüm düzeneğinden toplanan veriler dielektrik özelliklere dönüştürülür.



Şekil 1: Tipik açık uçlu koaksiyel prob ölçüm düzeneği.

Biyolojik dokuların dielektrik özelliklerini ölçmeye en uygun olan açık uçlu prob tekniği ise yonteme özgü yüksek hata değerleri içerir. Bu hata doku heterojenitesi, kablo hareketleri, matematiksel yaklaşım gibi birçok faktörün katkısıyla yükselerek ölçümün kalitesini azaltır. Bu nedenle tek bir ölçüm sonucu elde edilen dielektrik özelliklerle doku sınıfının belirlenmesi mümkün olamamaktadır ve kontrollü deneylerle test edilen materyalden çok sayıda ölçüm örneği elde edilmesi gerekmektedir. Bir örnekten birden fazla verinin toplanması laboratuvar ortamında mümkün olsada pratik uygulamalarda tek veri ile yüksek doğrulukta ölçüm yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu ön çalışmada sağlıklı ve anomali gösteren dokuların arasındaki dielektrik özellik farkını en iyi şekilde temsil edecek, literatürde daha önce araştırılmamış olan, eğitim parametresi analiz edilmiştir. Güç yasası bağımlılığını tanımlamak amacıyla dielektrik özellik verileri logaritmik ölçekte incelenmiştir. Bağıl dielektrik katsayısının mikrodalga frekanslardaki doğrusal değişimi sonucu ortaya çıkan bu bağımlılığın, vücutta yumuşak ve sert dokuların ayrımı için belirleyiciliği incelenmiştir. Dolayısıyla, yumuşak dokuların kemikleşmesine yol açan genetik bozuklukların ve kemik dokusu içeren tümörlerin teşhisinde potansiyel olarak kullanılabilecek bir teknik olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

## 2. Yöntem

Biyolojik dokuların dielektrik özellik değişimlerini elektromanyetik dalga ile dokunun etkileşimi belirler. Dokuda, su gibi polar moleküllerin varlığından dolayı dielektrik özellik davranışı frekansa bağımlı olarak farklılık göstermektedir. Bu davranış, Debye denklemi ve Cole-Cole denklemleri gibi farklı modeller kullanılarak temsil edilmektedir.

Dielektrik özelliklere dayalı doku sınıflandırılmasının gerçek zamanlı yapılabilmesi için tekniğin çeşitli aşamalarının iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Matematiksel yaklaşımın ve kalibrasyonun iyileştirilmesinin yanı sıra veriyi ayırmayı kolaylaştıracak parametrelerin incelenmesi gerekmektedir. Dokuların dielektrik özelliklerinin frekansa göre değişiklik göstermesi, bu özelliklerin matematiksel modellerle ifade edilmesini sağlamıştır. Literatürde öncelikle Debye tarafından polar moleküllerin frekansa bağlı dielektrik özellik davranışını incelemek amaçlı yapılan çalışma ile oluşturulan model, daha sonraki çalışmalar ile farklı formları almış ve biyolojik dokuların dielektrik özelliklerini ifade etmek için Cole-Cole denklemi (1) olarak adlandırılan

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

ifade literatürde sıklıkla kullanılmıştır [15-17]. Bu denklemdeki parametreler açılmal frekans  $\omega$  ( $2\pi f$ )'a bağlı kompleks dielektrik özellik  $\hat{\epsilon}(\omega)$ , bağıl dielektrik katsayısının çok yüksek frekanslardaki değeri  $\epsilon_{\infty}$ , statik bağıl dielektrik katsayısı  $\epsilon_s$ , boşluğun bağıl dielektrik katsayısı  $\epsilon_0$ , iyonik iletkenlik  $\sigma_i$ , gevşeme zamanı  $\tau$ , gevşeme zamanının katsayısını genişleten parametre  $\alpha$  ile temsil edilmektedir.

Cole-Cole denkleminde gerçel ve sanal kısımların basit ifadesi

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon' + j\epsilon'' = \frac{\epsilon_s + \epsilon_{\infty}(j\omega\tau)^{1-\alpha}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2)$$

şeklinde. Güç parametresi  $\alpha$  üstel davranış sergilemektedir ve  $\alpha$  ile ilişkili dielektrik özelliklerin frekansa bağımlı değişimi ölçülmek istendiğinde logaritmik ifade karşımıza çıkmaktadır. Dielektrik özellikler logaritmik ölçekte incelendiğinde frekansa bağımlı doğrusal bir değişim göstermektedir. Gözlemlenen bu doğrusal değişim ile güç yasası varlığı kabul edilmektedir. Güç yasası varlığının, frekansa bağımlı bu davranışı modelleyen gevşeme zamanı  $\tau$  ve güç parametresi ile doğrudan ilişkili olduğu öngörülmektedir [18].

Cole-Cole denklemine iyonik iletkenlik parametresi  $\sigma_i$  işlemlere dahil edilmeden paydalar eşitlenir. Denklemdeki  $(j\omega\tau)^{1-\alpha}$  ifadesi trigonometrik fonksiyonlar yardımıyla yeniden yazıldığında

$$(j\omega\tau)^{1-\alpha} = (\omega\tau)^{1-\alpha} \left[ \cos\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

ifadesi oluşturulur. Burada, gerçel kısım  $\left((\omega\tau)^{1-\alpha} \cos\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right)\right)$  A, sanal kısım  $\left((\omega\tau)^{1-\alpha} j\sin\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right)\right)$  ise B şeklinde gösterildiğinde

$$\epsilon' + j\epsilon'' = \frac{\epsilon_s + \epsilon_{\infty}A(1-\alpha) + j\epsilon_{\infty}B(1-\alpha)}{(1+A(1-\alpha)) + jB(1-\alpha)} \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde, frekansa bağımlı davranışın güç parametresiyle doğrusal ilişkisinin mevcudiyeti, dielektrik sabitinin hem gerçel

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \cos\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (5)$$

hem de sanal kısmında

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \sin\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin\left(\left(1-\alpha\right)\frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (6)$$

ayrı ayrı gösterilebilir.

Bu sayede, farklı dokuların dielektrik davranışı sayısal olarak anlamlandırılarak görece yüksek doğrulukta sınıflandırma yapılabilir.

Bu ön çalışma kapsamında, bağıl dielektrik katsayısını analiz etmek için İtalya Uygulamalı Fizik Enstitüsü ('Nello Carrara', IFAC-CNR)'nün açık kaynak olarak sunduğu farklı dokuların dielektrik ölçüm verileri kullanılmıştır [19]. Açık erişimli internet veri tabanından elde edilen deneysel veriler ile literatürde derlenen ilgili veriler uyum göstermektedir ve kabul edilen değer aralıkları içinde yer almaktadırlar. 18 farklı doku arasındaki dağılım (dispersiyon) davranışı 0.5 - 20 GHz frekans aralığında logaritmik ölçekte incelenmiştir ( $\text{Log}_{10}(0.5e^9 \text{ Hz}) = 8.69 \text{ Hz}$ ,  $\text{Log}_{10}(20e^9 \text{ Hz}) = 10.30 \text{ Hz}$ ). Bağıl dielektrik katsayısının frekansa bağımlı doğrusal değişimi sayesinde güç yasasına uygunluğunu gösteren frekans aralığı ise 9 - 20 GHz olarak belirlenmiştir ( $\text{Log}(9e^9 \text{ Hz}) = 9.95 \text{ Hz}$ ,  $\text{Log}(20e^9 \text{ Hz}) = 10.30 \text{ Hz}$ ). Belirlenen bu aralıkta,

$$S(\omega) = \frac{c}{\omega^a} \quad (7)$$

ilişkisinde her iki tarafının logaritması alınarak,

$$\log S(\omega) = \log c - a \log \omega \quad (8)$$

doğrusal ilişkisi elde edilebilir. Burada, logaritmik ölçekteki frekans  $\eta = \log \omega$  ve logaritmik spektrum  $L(\eta) = \log(S(\omega))$  şeklinde yeniden yazıldığında

$$L(\eta) = \log c - a\eta \quad (9)$$

doğrusal denklemi oluşturulur. Bu denklem için hata terimi

$$\epsilon = \sum_i |L(\eta_i) - \hat{L}(\eta_i)|^2 \quad (10)$$

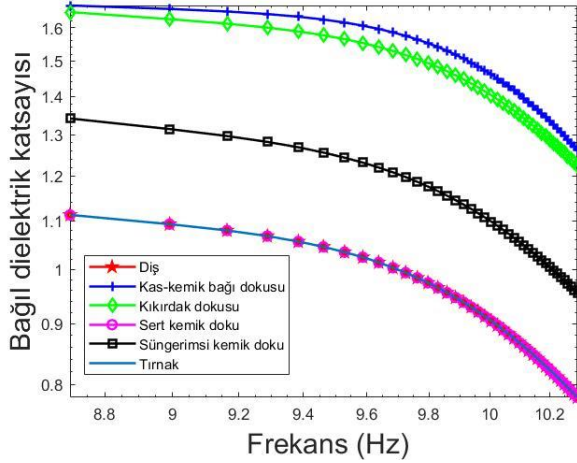
şeklinde ifade edilir. Bu terim  $c$  ve  $a$ 'ya göre enküçüklendiğinde, log-log spektrumda doğrusal uydurma problemine dönüşür. Uydurulan doğrunun eğimi üstel ölçek değerinin kestirimidir.

Dokuların güç yasası bağımlılığı doğrunun eğimi hesaplanarak incelenmiştir. Dağılım yalnızca güç parametresi  $\alpha$  tarafından modellenmediğinden dokular arasında görülen eğim farkının aynı zamanda gevşeme zamanını belirten  $\tau$  ile de ilişkili olduğu kabul edilmiştir [20].

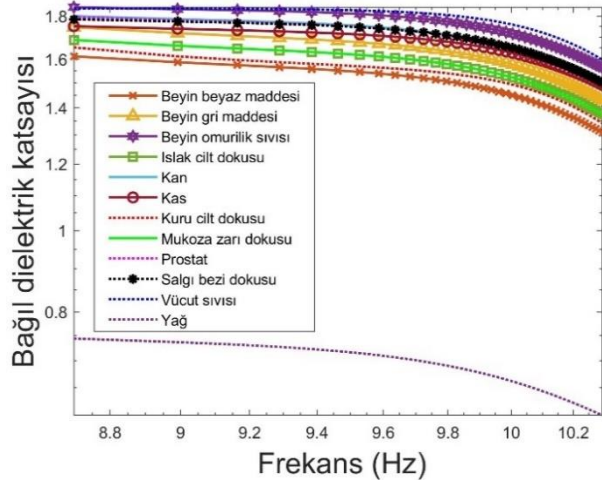
## 3. Bulgular

Dış, kas-kemik bağı, kırık, sert kemik, süngerimsi kemik doku ve tırnak sert dokularının 0.5 - 20 GHz frekans aralığındaki bağıl dielektrik katsayıları Şekil 2 ile logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Beyin beyaz/gri maddesi, beyin omurilik sıvısı, kan, kas, cilt, mukoza zarı, prostat, salgı bezi, vücut sıvısı ve yağ yumuşak dokularının 0.5 - 20 GHz frekans aralığındaki bağıl dielektrik

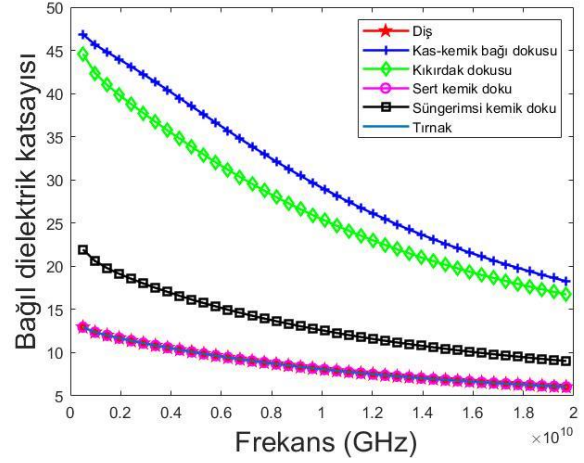
katsayıları ise Şekil 3 ile logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Sert ve yumuşak dokulara ait dielektrik özelliklerin değişimi incelendiğinde frekansa göre farklı dağılım gösterdikleri gözlemlenmiştir. Ek olarak, 0.5 – 20 GHz frekans aralığında yumuşak ve sert dokuların bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimleri güç yasasından bağımsız olarak Şekil 4 ve Şekil 5 ile gösterilmiştir.



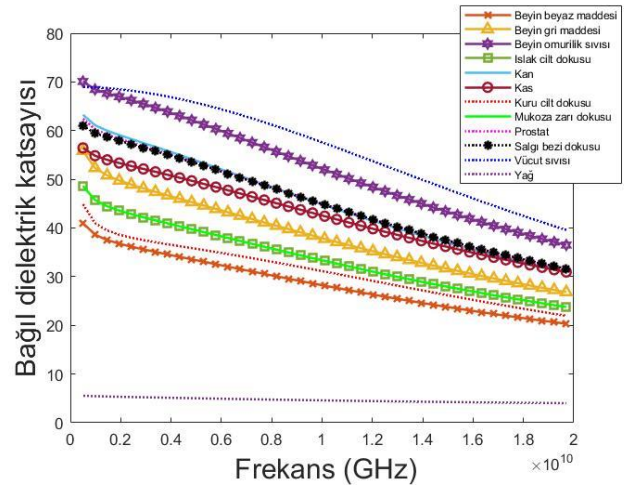
Şekil. 2: Altı farklı sert dokunun bağıl dielektrik katsayılarının logaritmik ölçüde dağılım davranışları.



Şekil. 3: On iki farklı yumuşak dokunun bağıl dielektrik katsayılarının logaritmik ölçüde dağılım davranışları.



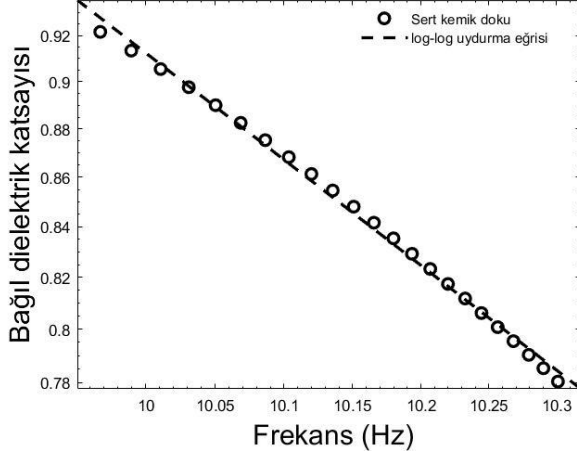
Şekil. 4: Altı farklı sert dokunun bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimleri.



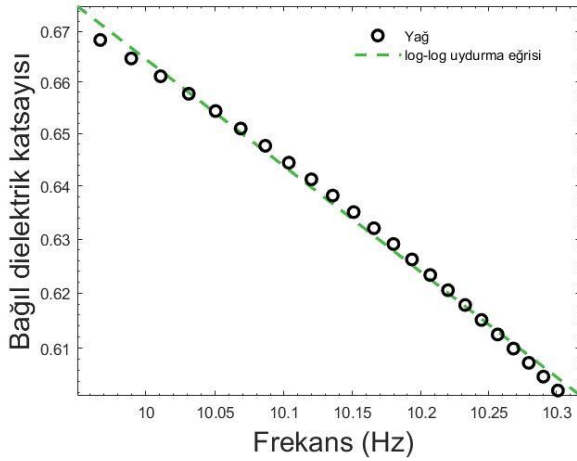
Şekil. 5: On iki farklı yumuşak dokunun bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimleri.

Frekansa bağımlı dielektrik özellik değişimleri doğrusal olan sert dokuları temsilen sert kemik dokunun ve yumuşak dokuları temsilen yağ dokusunun bağıl dielektrik katsayı dağılımlarına oturtulan doğrular Şekil 6 ve Şekil 7 ile gösterilmiştir. Bu doğrunun meyil yönünü gösteren sayısal ifade ise eğim değerleriyle belirtilmiştir.





Şekil 6: Sert kemik dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılım davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.



Şekil 7: Yağ dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılım davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.

On sekiz farklı dokunun farklı frekanslardaki bağıl dielektrik katsayıları Tablo 1 ile gösterilmiştir. Bağıl dielektrik katsayısının güç yasasına uygunluğunu göstermek için incelenen 9-20 GHz frekans aralığında, bulunan eğim değerleri ise Tablo 2 ve Tablo 3 ile gösterilmiştir. Bağıl dielektrik katsayısının eğim kestirimiyle bulunan sonuçlara bakıldığında sert dokular için ortalama eğim değeri  $-4,95 \pm 0,19$  sapmayla hesaplanmışken yumuşak dokunun eğim değerlerinin ortalama ve standart sapması ise  $-3,28 \pm 0,15$  olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, doğru uydurma hatasının sert dokular için ortalama değeri  $7.28E-05$  iken, yumuşak dokular için bu değer  $1.83E-04$  olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1: Yumuşak ve sert dokuların farklı frekanslardaki bağıl dielektrik katsayısı değerleri.

	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
<b>Yağ</b>	500000000	5.54
	10055000000	4.59
	20000000000	4.00
<b>Salgı bezi dokusu</b>	500000000	60.96
	10055000000	45.06
	20000000000	31.59
<b>Prostat</b>	500000000	62.45
	10055000000	45.15
	20000000000	31.64
<b>Mukoza zarı dokusu</b>	500000000	48.62
	10055000000	33.46
	20000000000	23.76
<b>Kuru cilt dokusu</b>	500000000	44.91
	10055000000	31.23
	20000000000	21.96
<b>Kas</b>	500000000	56.44
	10055000000	42.68
	20000000000	30.95
<b>Kan</b>	500000000	63.25
	10055000000	45.01
	20000000000	31.01
<b>Islak cilt dokusu</b>	500000000	48.62
	10055000000	33.46
	20000000000	23.76
<b>Beyin omurilik sıvısı</b>	500000000	70.09
	10055000000	52.32
	20000000000	36.50

<b>Beyin gri maddesi</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	55.83
	10055000000	38.03
	20000000000	26.83
<b>Beyin Beyaz maddesi</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	41.00
	10055000000	28.34
	20000000000	20.33
<b>Vücut sıvısı</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	68.98
	10055000000	57.77
	20000000000	39.59
<b>Sert kemik doku</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	12.94
	10055000000	8.10
	20000000000	6.03
<b>Diş</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	12.94
	10055000000	8.10
	20000000000	6.03
<b>Kas kemik bağı dokusu</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	46.84
	10055000000	29.22
	20000000000	18.27
<b>Kıkırdak dokusu</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	44.60
	10055000000	25.55
	20000000000	16.73
<b>Süngerimsi kemik doku</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	21.95
	10055000000	12.63
	20000000000	9.02
<b>Tırnak</b>	Frekans [Hz]	Bağıl Dielektrik Katsayısı
	500000000	12.94
	10055000000	8.10
	20000000000	6.03

Tablo 2: Bağıl dielektrik katsayısı için eğim kestirimleri.

<b>Sert Dokular</b>	<b>Eğim</b>	<b>Doğru Uydurma Hatası</b>
Diş	-5.10	3.35E-05
Kas-kemik bağı dokusu	-4.98	1.85E-04
Kıkırdak dokusu	-4.67	1.02E-04
Sert kemik doku	-5.10	3.35E-05
Süngerimsi kemik doku	-4.75	4.96E-05
Tırnak	-5.10	3.35E-05

Tablo 3: Yumuşak dokuların bağıl dielektrik katsayısı için eğim kestirimleri.

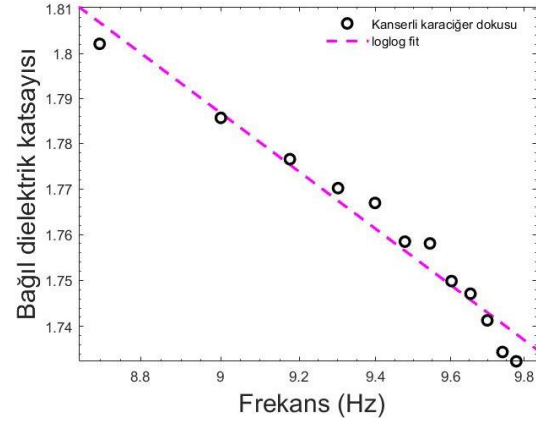
<b>Yumuşak Dokular</b>	<b>Eğim</b>	<b>Doğru Uydurma Hatası</b>
Beyin beyaz maddesi	-3.44	1.44E-04
Beyin gri maddesi	-3.32	1.66E-04
Beyin omurilik sıvısı	-3.14	1.87E-04
Islak cilt dokusu	-3.38	1.57E-04
Kan	-3.39	1.87E-04
Kas	-2.94	1.57E-04
Kuru cilt dokusu	-3.52	2.89E-04
Mukoza zarı dokusu	-3.38	1.57E-04
Prostat	-3.22	1.78E-04
Salgı bezi dokusu	-3.22	1.77E-04
Vücut sıvısı	-3.17	3.67E-04
Yağ	-3.18	9.88E-06

#### 4. Tartışma ve Sonuçlar

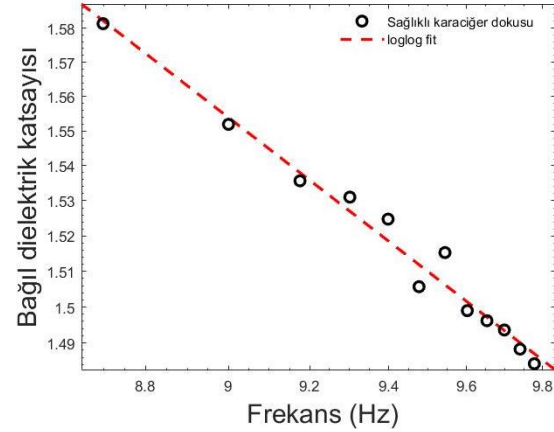
Bağıl dielektrik katsayısının belirli bir frekans aralığındaki eğim kestirimleri kıyaslandığında yumuşak ve sert biyolojik dokular arasında belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Dielektrik özelliklerin açık uçlu koaksiyel prob tekniği ile ölçümünden elde edilen veriler, bu dokular arasındaki belirgin farklılığı doğrudan gösterebilmekte yetersiz kalabilmektedir. Dokuların farklı frekanslardaki bağıl dielektrik katsayıları incelendiğinde değerlerin frekans arttıkça azalmakta olduğu görülmektedir. Düşük miktarda su içeren dokuların dielektrik davranışı niceliksel olarak yüksek miktarda su içeren dokularinkine benzerdir. Ancak bağıl dielektrik sabitinin değerleri biraz daha düşüktür. Ayrıca düşük su miktarı içeren dokularda da frekansa bağlı değişen büyük varyasyonlar vardır. Su ihtiva eden dokular yüksek bir dielektrik katsayısına sahip olduğundan, dokunun bağıl dielektrik katsayısı, dokunun su oranındaki küçük değişimlerle birlikte önemli ölçüde değişecektir. Bu nedenle dokular ihtiva ettiği su miktarına bağlı olarak ayrıştırılabilmektedir. Fakat, bazı sert ve yumuşak dokular bağıl dielektrik özellik olarak yüksek farklılık gösterememektedir. Dielektrik özelliklerin güç yasası bağımlılığı bu hususta önemli bilgiler sunmaktadır. Bu sayede hesaplanan eğim değerleri arasında yapılabilecek sınıflandırma ile kemikleşmeye sebebiyet veren genetik bozuklukların ve kemik dokusu içeren tümörlü dokuların teşhisi için kullanılabilir mikrodalga yöntemlerinin geliştirilebileceği öngörülmektedir.

Bu makale kapsamında bir ön çalışma sunulmuş ve normal ve sertleşmiş doku örneklerine ilişkin ölçüm sonuçları bulunmamaktadır. Aynı şekilde literatürde yumuşak doku ossifikasyonuna ilişkin dielektrik özellik verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle subulan tekniğin performansını gerçek ölçümler ile değerlendirmek amaçlı kanserli ve sağlıklı malin ve sağlıklı karaciğer dokularından elde edilmiş bağıl dielektrik özellikler kullanılmıştır [21]. Karaciğer dokusu ölçümleri her bir sınıfta 96 adet ölçüm olacak şekilde ayrılmış ve bağıl dielektrik katsayılarına ait eğim değerleri hesaplanmıştır. Böylece her bir ölçüme ilişkin eğim değeri makine öğrenmesi algoritmalarına verilerek sınıflandırma yapılmıştır. Eğim değerleri kategorik özelliğe sahip olduğundan, makine öğrenme algoritması uygulanırken en temel sınıflandırma modellerinden biri olan lojistik regresyon kullanılmıştır. Eğim parametresi veri olarak tanımlandığında %80 üzerinde doğruluk elde edilmiştir. Makine öğrenme algoritmalarında üç sınıf ayırımında doğruluğu yükseltmek amaçlı eğim parametresinin parametre olarak kullanılabilirliği ön görülmektedir [21-22]. Makine öğrenme algoritmaları kullanılmadan sadece açık uçlu prob ile toplanan dielektrik özellik ölçümüne dayalı doku karakterizasyon doğruluğunun ise %70'e kadar düşebileceği bilinmektedir.

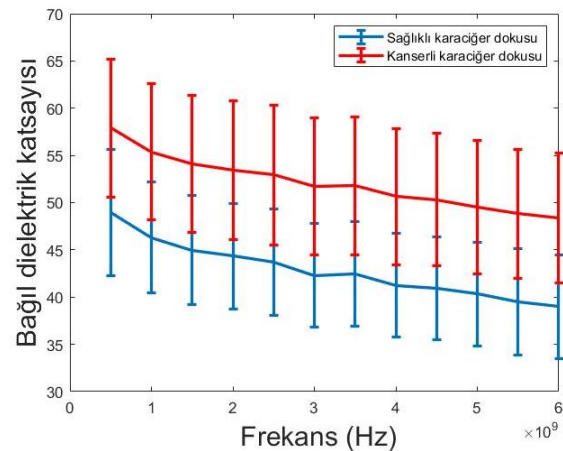
Sağlıklı karaciğer dokusunun bağıl dielektrik katsayısının ortalama eğim değeri  $-0.50 \pm 0.14$  sapma ile hesaplanmışken, kanserli karaciğer dokusunun eğim ve sapması  $-0.38 \pm 0.07$  olarak hesaplanmıştır. Kanserli ve sağlıklı dokuya ilişkin örnek eğim kestirim değerleri Şekil 8 ve Şekil 9 ile verilmiştir. İki tip karaciğer dokusunun 0.5 - 6 GHz aralığında bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimi ise Şekil 10 ile gösterilmiştir. Bu kapsamda, dielektrik özelliklerin ayırt edici derecede farklılık göstermediği koşullarda eğim enformasyonunun değişken olarak doku kategorizasyonunda tek başına ya da diğer parametrelere ek olarak kullanılabilirliği ve sistem hatalarından kaynaklı hataları kompanse edebileceği öngörülmüştür.



Şekil 8: Kanserli karaciğer dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılım davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.



Şekil 9: Sağlıklı karaciğer dokusunun bağıl dielektrik katsayısının dağılım davranışı değişimlerinin incelenmesi sonucunda her bir dokunun logaritmik ölçüde eğim kestirimi.



Şekil 10: Sağlıklı ve kanserli sıçan karaciğer dokusunun 0.5-6 GHz aralığında bağıl dielektrik katsayılarının frekansa bağlı değişimi.

#### 4. Kaynaklar

- [1] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2271–2293, Nov. 1996.
- [2] T. Yilmaz, M.A. Kılıç, M. Erdoğan, M. Çayören, D. Tunaoglu, İ. Kurtoğlu, Y. Yaslan, H. Çayören, A. E. Arıkan, S. Teksöz and G. Cancan, "Machine learning aided diagnosis of hepatic malignancies through in vivo dielectric measurements with microwaves," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 61, no. 13, pp. 5089–5102, Jun. 2016.
- [3] H. Sahin, S. Abdullazade, and M. Sancı, "Mature cystic teratoma of the ovary: a cutting edge overview on imaging features," *Insights into Imaging*, vol. 8, no. 2, pp. 227–241, Jan. 2017.
- [4] F. Kikkawa *et al.*, "Diagnosis of squamous cell carcinoma arising from mature cystic teratoma of the ovary," *Cancer*, vol. 82, no. 11, pp. 2249–2255, Jun. 1998.
- [5] B. Cakmak, M. Nacar, N. Aliyev, D. Koseoglu, and Z. Ozsoy, "Mature cystic teratomas: Relationship between histopathological contents and clinical features," *Nigerian Journal of Clinical Practice*, vol. 18, no. 2, p. 236, 2015.
- [6] A. Hackethal, D. Brueggmann, M. K. Bohlmann, F. E. Franke, H.-R. Tinneberg, and K. Münstedt, "Squamous-cell carcinoma in mature cystic teratoma of the ovary: systematic review and analysis of published data," *The Lancet Oncology*, vol. 9, no. 12, pp. 1173–1180, Dec. 2008.
- [7] T. Yilmaz, "Multiclass Classification of Hepatic Anomalies with Dielectric Properties: From Phantom Materials to Rat Hepatic Tissues," *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 530.
- [8] F. S. Kaplan, M. Le Merrer, D.L. Glaser, R. J. Pignolo, R. E. Goldsby, J. A. Kitterman, J. Groppe and E. M. Shore, "Fibrodysplasia ossificans progressiva," *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, vol. 22, no. 1, pp. 191–205, Mar. 2008.
- [9] M. Lazebnik *et al.*, "A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries," *Physics in medicine and biology*, vol. 52, no. 20, pp. 6093–115, 2007.
- [10] C. Gabriel, S. Gabriel, and E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey," *Physics in medicine and biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2231–49, 1996.
- [11] A. La Gioia, E. Porter and I. Merunka, "Open-Ended Coaxial Probe Technique for Dielectric Measurement of Biological Tissues: Challenges and Common Practices," *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, vol. 8, no. 2, p. 40, 2018.
- [12] T. W. Athey, M. A. Stuchly, and S. S. Stuchly, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part I," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 82–86, Jan. 1982.
- [13] M. A. Stuchly, T. W. Athey, G. M. Samaras, and G. E. Taylor, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part II- Experimental Results," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 87–92, Jan. 1982.
- [14] W. Anderson, "Microwave biopsy probe- Anderson, Wendell," Freepatentsonline.com, Apr. 2006.
- [15] P. J. Debye, "Polar molecules," "Chemical Catalog Company, Incorporated, 1929.
- [16] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 9, no. 4, pp. 341–351, Apr. 1941.
- [17] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and Absorption in Dielectrics II. Direct Current Characteristics," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 10, no. 2, pp. 98–105, Feb. 1942.
- [18] A. K. Jonscher, "Dielectric relaxation in solids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 14, pp. R57–R70, Jan. 1999, doi: 10.1088/0022-3727/32/14/201.
- [19] D. Andreuccetti, "Dielectric Properties of Body Tissues: Home page," Ifac.cnr.it, 2018. [Online].
- [20] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2251–2269, Nov. 1996.
- [21] Yilmaz, T. "Microwave Spectroscopy Based Classification of Rat Hepatic Tissues: On the Significance of Dataset". *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 8 (2020): 307-313
- [22] Yilmaz, T. Multiclass Classification of Hepatic Anomalies with Dielectric Properties: From Phantom Materials to Rat Hepatic Tissues. *Sensors* 2020, 20, 530.

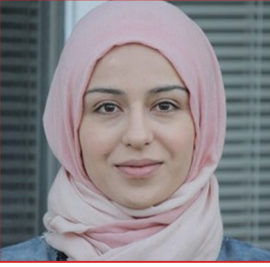


## Seda KESKİN



Seda KESKİN, Acıbadem Üniversitesi Tıp Mühendisliği bölümü Lisans eğitimini 2019 yılında üçüncülük derecesiyle tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Biyomedikal Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2017 yılında Polonya Wrocław'daki University of Physical Education'da Erasmus stajını yaparak ampüte ve engelli hastalar için deneysel nörofizyolojik ve nöro görüntüleme araştırmalarını incelemiştir. 2018-2019 yılları arasında Acıbadem Üniversitesi Biyomedikal Görüntüleme, Araştırma ve Geliştirme Grubu TÜBİTAK 1003 - Lisans Bursiyeri ve TÜBİTAK 2209/A Programı Baş Araştırmacısı olarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Şuan, Bıçakçılar Medical Devices şirketinde Ürün Yöneticisi Yardımcısı olarak çalışmaya devam etmektedir.

## Tuba YILMAZ



Tuba YILMAZ, lisans derecesi ile İstanbul Teknik Üniversitesinden 2007 yılında, yüksek lisans derecesi ile Mississippi Eyalet Üniversitesinden 2009 yılında ve doktora derecesini Queen Mary, Londra Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun olmuştur. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde Doktor Öğretim Üyesi ve Marie Skłodowska Curie Araştırma Desteği ile görev yapmaktadır. Daha önceinde ise Mitos Medical Teknolojiler şirketinde Araştırma Departmanında bir yıl geçirdi. 2013-2014 yılları arasında Dr. Yılmaz, Utah Eyalet Üniversitesinde (USU) Doktora Sonrası Araştırma Görevlisi olarak bulundu. Dr. Yılmaz, Eta Kappa Nu Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Onur Derneği üyesidir. 2017 yılında URSI Genç Bilim Adamı Ödülünü almıştır. Araştırma alanları arasında giyilebilir ve implante edilebilir antenler, RF algılama, dielektrik spektroskopi, evrimsel optimizasyon teknikleri, kablosuz güç aktarımı ve mikrodalga görüntüleme yer almaktadır.

## Prof. Dr. Tayfun AKGÜL



Prof. Dr. Tayfun AKGÜL, lisans ve yüksek lisans derecelerini, sırasıyla 1985 ve 1988 yıllarında İTÜ Elektronik ve Haberleşme Bölümü'nde tamamladı. Doktorasını 1994 yılında Pittsburgh Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde bitirdi. 1986 - 1988 arası TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Enstitüsü'nde, Eylül 1988'den itibaren Çukurova Üniversitesi'nde çalışmaya başladı. 1989-1994 arasında Pittsburgh Üniversitesi'nde doktora çalışması yaptı. 1996'da Çukurova Üniversitesi'nde Doçent oldu. 1997-1999 tarihleri arasında Drexel Üniversitesi'nde bulundu. 1999-2002 arasında TÜBİTAK-MAM'da Başuzman Araştırmacı unvanıyla çalıştı. Temmuz 2002'den itibaren İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır. İTÜ ARIS Lab (Advanced Research on Images and Signals-İleri Sinyal ve Görüntü İşleme) adlı araştırma laboratuvarının kurucusu ve yöneticisidir.