



Plazma Deşarjı Sırasında Ortaya Çıkan Akustik Verilerin İşlenmesi ve Karakterizasyonu

Processing and Characterization of Acoustic Signals Emitted During Plasma Discharge

Gizem Dilara EKİMCİ, Mehmet Akif ÖZDEMİR,
Bartu YEŞİLKAYA ve Mazlum UNAY
Biyomedikal Mühendisliği Bölümü
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
İzmir, Türkiye
gizemdilara.ekimci@ikc.edu.tr, makif.ozdemir@ikc.edu.tr,
bartu.yesilkaya@ikc.edu.tr, mazlum.unay@ikc.edu.tr

Utku Kürşat ERCAN ve Aydın AKAN
Biyomedikal Mühendisliği Bölümü
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
İzmir, Türkiye
utkuk.ercan@ikc.edu.tr, aydin.akan@ikc.edu.tr

Özetçe— Plazma, maddenin dördüncü hali olarak tanımlanmakta ve atmosferik basınçta, yüksek elektrik alan altında ve oda sıcaklığında (soğuk) üretilebilmektedir. Bu çalışmada, plazma deşarjı esnasında ortaya çıkan akustik verilerin elektriksel sinyal olarak kayıt edilmesi, bu sinyallerin farklı algoritmalar ile işlenerek, plazma ses karakteristiklerine göre farklı malzemeler ve farklı frekanslar üzerinde ses sinyal değişiminin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca plazma güç kaynağının çalışma esnasındaki ses değişimleri ile elektriksel iletkenlik arasında bir korelasyon olup olmadığının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler — Atmosferik soğuk plazma; ses işleme; plazma ses karakteristikleri; iletkenlik ve plazma deşarj sesi ilişkisi

Abstract— Plasma is defined as the fourth state of matter and can be produced at atmospheric pressure, under high electric field and at room temperature (cold). In the present study, the conversion of the sound data into electrical signals obtained during the generation of plasma discharge and the processing of these signals with different algorithms are aimed to evaluate the sound signal variation on different materials and different frequencies according to the plasma sound characteristics. It is also aimed to determine whether there is a correlation between the sound changes during operation of the plasma device and the electrical conductivity.

Keywords — Atmospheric cold plasma; audio signal processing; plasma sound characteristics; correlation of conductivity and plasma discharge sound

I. GİRİŞ

Irving Langmuir, 1928'de plazmayı tanımlamıştır [1]. Plazma, maddenin dördüncü hali olarak tanımlanmakta ve atmosferik basınçta, yüksek elektrik alan altında ve oda sıcaklığında (soğuk) üretilebilmektedir. Tıbbi plazmalar

oldukça yeni ve hızla gelişmekte olan bir alan olup, yeni terapötik çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir [2],[3]. Atmosferik soğuk plazmaların, kan pıhtılaşmasından, diş beyazlatılmasına, dezenfeksiyon etkinliğinden, yara iyileşmesine kadar pek çok farklı biyomedikal uygulamaları literatürde belirtilmiştir. Bunun yanında plazmanın farklı sağlıklı hücreler üzerinde yıkıcı etkiler göstermeden kanser hücre hatları üzerinde apoptozu indükleyerek kanser tedavisine yönelik selektif etkinliği olabileceği gösterilmiştir. Söz edilen uygulamaların bazıları için dünyada klinik testlere başlanılmış olup, yakın zamanda klinik kullanıma gireceği düşünülmektedir [2].

Sıcak plazmaların uzun zamandır endüstride metal kesme, kaynak gibi kullanımları ve düşük basınçlı soğuk plazmaların da yarı iletken endüstrisinde kullanımı mevcuttur. Atmosferik soğuk plazmaların çeşitli biyomedikal etkinliklerinin ortaya konmasıyla, fiziksel plazmaların terapötik amaçlı kullanımına yönelik olarak, hızla gelişen ve multidisipliner olan tıbbi plazma yeni bir alan ortaya çıkmıştır [2],[4].

Atmosferik soğuk plazma bir elektrik alan altında üretilmektedir. İki elektrot arasında bir elektrik alan oluşturulduğunda elektronlar enerjiyi çevredeki daha ağır gaz moleküllerinden daha hızlı almakta ve sıcaklıkları, ortam gazı ısınma fırsatı bulmadan binlerce derecelere kadar ulaşmaktadır. Sonuç olarak ortam gazı oda sıcaklığında kalmakta ve enerji alarak ısınan elektronların da soğumasına yardımcı olmaktadır [2]. Plazma üretim sürecinde süperoksit, hidrojen peroksit, OH radikalleri, singlet oksijen, nitrik oksit, ozon ve peroksinitrit gibi farklı reaktif oksijen ve nitrojen türleri (reactive oxygen species = ROS, reactive nitrogen species = RNS) gibi plazmanın farklı biyomedikal

uygulamalarında gözlemlenen etkiye sebep olduğu bildirilen moleküller açığa çıkmaktadır [2],[3],[5].

Soğuk iyon oluşum sınırlarında, ses hızının nötral gaz moleküler sıcaklığıyla ilişkisi (1)'de gösterilmiştir [6],[7].

$$c_{ses} = \sqrt{\frac{\gamma RT_{gaz}}{M}} \quad (1)$$

Nötral parçacıkların ve iyonların hızlarındaki dalgalanmalar hem ses dalgaları hem de dalgalı bir elektrik alan üretmekte, aynı zamanda yerel ses basıncı seviyesine katkıda bulunmaktadır. Plazma üretim bölgesinde nötraller ve iyonlar arasındaki fark, elektrik gücü kapatıldığında plazma gazının genişlediği ve elektrik enerjisini kaybettiği için elektromanyetik alandaki elektrik enerjisini absorbe ettiği bilinmektedir. Nötr gaz enerjisi kazanarak, plazma hacmindeki elektron-nötr enerji transferinden radikallerin ve metastabil türlerin oluşturulmasına izin verirken, elektron-nötr reaksiyon akustik bir kaynak olarak işlev görür. Plazma oluşum sürecindeki serbest haldeki iyonların dalgalanması sonucu plazma güç kaynağının sesi oluşmaktadır [8].

Bu çalışmada amaç, plazma deşarjı esnasında ortaya çıkan ses sinyallerinin kaydedilmesi, bu sinyallerin farklı sinyal işleme algoritmaları ile işlenerek plazma ses karakteristiklerine göre farklı malzemeler ve farklı frekanslar üzerinde ses sinyal değişiminin değerlendirilmesidir. Plazma güç kaynağının çalışma esnasındaki ses değişimleri ile elektriksel iletkenlik arasında bir korelasyon olup olmadığının belirlenmesidir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

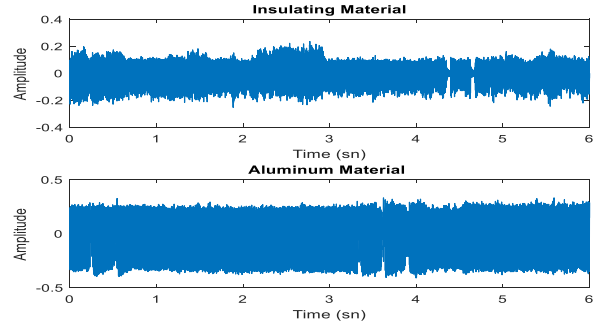
Çalışmada özel olarak mikro saniye darbeleri güç kaynağı kullanılarak, dielektrik bariyer deşarj hava plazma 20 kV voltaj ve deneye bağlı olarak değişen aşağıda belirtilen frekans değerlerinde plazma üretilmiştir. Plazma deşarjı esnasında ses kaydı alabilmek ve etkili uzaklığı belirleyebilmek için denemeler yapılmıştır. Optimum uzaklık cihazın merkezinden 18 cm uzak bir mesafe olarak belirlenmiştir ve alınan tüm ölçümler, çalışmanın seyri ve doğruluğu için bu değer kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm için kullanılan ses kayıt cihazı 48 kHz örnekleme frekansında kayıt almaktadır. Ayrıca cihazın 2 tanesi gürültü azaltıcı etkili olmak üzere toplamda 3 adet mikrofonu mevcuttur.

İlk adım olarak plazma güç kaynağı farklı frekanslarda çalıştırarak plazma ses karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla plazma alüminyum plaka üzerinden deşarj edilirken ses kaydı alınmıştır. Plazma güç kaynağı voltajı 20 kV'a ayarlanmış ve 5 farklı frekans değerinde ölçüm alınmıştır. Ölçüm alınan frekans değerleri sırası ile; 5000 Hz, 2500 Hz, 1000 Hz, 500 Hz ve 250 Hz'dir.

TABLO I. Alüminyum plaka ile farklı frekans değerlerinde alınan ölçüm sinyallerinin frekansa bağlı değişen toplam enerjileri.

Frekans Değeri (Hz)	Sinyalin Toplam Enerji Değeri (J)
250	4792,01
500	6124,45
1000	7477,21
2500	12923,49
5000	13231,56

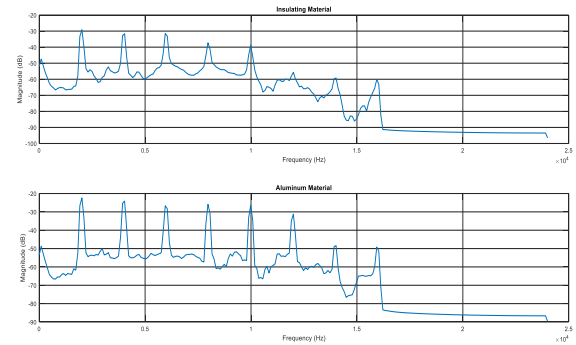
Bir sonraki adımda malzeme bazlı plazma ses karakteristikleri incelenmiştir. Plazma ses karakteristiklerini inceleyebilmek için alüminyum plaka ve yalıtkan plaka (Polistren plaka) kullanılmıştır.



Şekil 1. Yalıtkan plaka ve alüminyum plaka ile alınan ölçümlerin genliklerinin zamana bağlı değişim grafikleri.

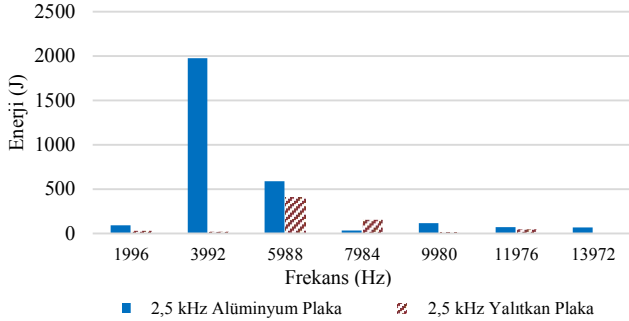
Alüminyum plaka ve yalıtkan plaka plazma güç kaynağının deşarj alacağı yüzeye sabitlenmiş, plazma güç kaynağı voltaj değeri 20 kV, frekans değeri 250 Hz'e ayarlanarak 10 saniye boyunca ses kaydı alınmıştır.

Tüm ölçümler için, ses kayıt cihazı aracılığıyla alınan ses kayıtları MATLAB® sayısal analiz program ile çeşitli dijital sinyal işleme algoritmaları kullanılarak anlamlı hale getirilmiştir. Alüminyum plaka ile kaydedilen ses sinyallerinin enerjilerinin, yalıtkan plakaya göre daha yüksek enerjiye sahip olduğu saptanmıştır. Şekil 1 incelendiğinde alüminyum plaka ses sinyal genliklerinin, yalıtkan plakaya göre yüksek olduğu görülmektedir. Alüminyum malzemesinin ses sinyalinin toplam enerjisi 5788.9 J iken yalıtkan plakanın ses sinyalinin toplam enerjisi 1064.5 J'dür.



Şekil 2. Yalıtkan plaka ve alüminyum plaka ile alınan ölçümlerin Welch yöntemi ile elde edilen Güç Spektral Yoğunluğu grafikleri.

Welch yöntemi güç spektral yoğunluğunu iyileştirilmiş periyodogramların ortalamasını olarak kestirir [9]. Şekil 2'de plazma ses sinyallerinin Welch yöntemi kullanılarak ses sinyallerinin frekans bileşenleri elde edilmiştir. Elde edilen sinyallerin toplam enerjileri Tablo I'de gösterilmiştir. Tablo I'de görüldüğü üzere plazma güç kaynağının frekansı arttırıldıkça ses sinyalinin toplam enerjisinin arttığı tespit edilmiştir. Ses sinyallerinin genlikleri incelendiğinde frekansın artmasıyla beraber sinyal genliklerinde de artış olduğu ayırt edilebilmektedir.



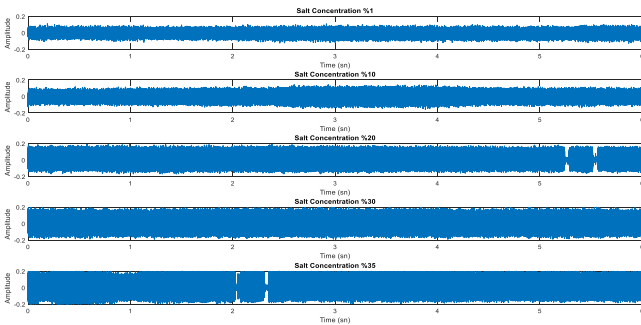
Şekil 3. Alüminyum ve yalıtkan plakaların plazma ses harmonikleri.

Farklı frekans değerlerinde uygulanan plazmadan elde edilen ses sinyallerinin Fourier Dönüşümleri ile frekans uzayında güç değerleri elde edilmiştir. Şekil 4' de görüldüğü gibi ses sinyalleri tüm frekans değerlerinde harmonikler şeklinde karakteristik özellik göstermiştir. Bu harmonikler, sabit plazma frekansının oluşturduğu farklı ses sinyallerinde, aynı frekans değerinde oluşmuştur. Harmonikler arası uzaklığın plazma frekansına göre artmış olduğu Tablo II' de görülmektedir. Aynı plazma frekansında iki harmonik arası mesafe sabit kalmıştır. Örneğin Tablo II' de görüldüğü gibi plazma frekansı 250 Hz iken plazma ses sinyalinin iki harmoniği arasındaki değişim sabit ve 243 Hz olmuştur.

TABLO II. Değişen plazma frekansına göre ses harmonikleri frekans değerleri.

Harmonik Frekansı (Hz)	Plazma Frekansı (Hz)
243	250
475	500
907	1000
1996	2500
3327	5000

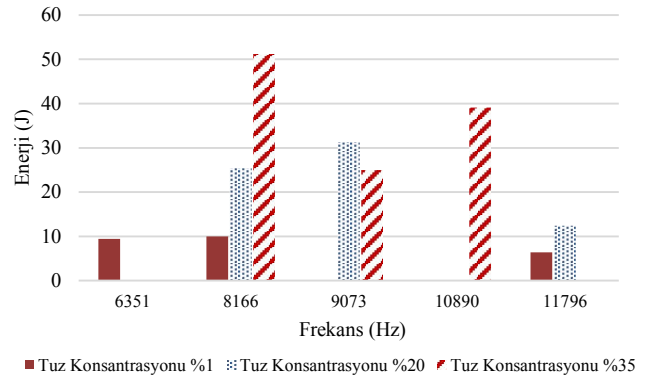
Yapılan analizler sonucunda malzeme iletkenliğinin artması ile plazma ses sinyalinin toplam enerjisinin arttığı hipotezi ortaya konulmuştur. Bu hipotezi test edebilmek adına farklı tuz konsantrasyonlarında plazma ses karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir.



Şekil 4. Farklı tuz konsantrasyonlarında (%%35, %30, %20, %10 ve %1) hazırlanmış olan agarların plazma sesinin genlik-zaman değişim grafiği.

Bu sebeple %35, %30, %20, %10 ve %1 sodyum klorür konsantrasyonlarında agar çözeltisi hazırlanmıştır. Farklı tuz

konsantrasyonlardaki agarlar hazırlandıktan sonra petri kaplarına dökülmüş ve soğumaya bırakılmıştır. Agarlar tamamen soğuyup katı hale geçtikten sonra farklı konsantrasyonlardaki agarlardan 1x1x1 cm olacak şekilde kesitler alınmıştır. Alınan bu kesitler 20 kV voltaj ve 1000 Hz frekans değerlerinde elde edilen hava dielektrik bariyer dışarı plazma ile muamele edilmiş ve muamele esnasında ses kaydı yukarıda tarif edildiği şekilde alınmıştır. Ayrıca iletkenliğin artan tuz konsantrasyonu ile beraber arttığını gösterebilmek adına agar ile aynı konsantrasyonlarda (%35, %30, %20, %10 ve %1) ultra saf su ile tuz çözeltileri hazırlanmıştır. Çözeltilerin dirençleri ölçülmüştür. Ölçülen dirençler ve iletkenlik arasındaki ilişki Tablo III' de gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı tuz konsantrasyonundaki agarlardan elde edilen ses sinyallerinin en yüksek enerjili 3 harmoniği.

Şekil 5' de sabit plazma frekansında, üç farklı tuz konsantrasyonundan elde edilen ses sinyallerinin en yüksek enerjiye sahip üç harmonikleri birlikte gösterilmektedir. Tuz konsantrasyonu daha yüksek olan agarlardan elde edilen ses sinyallerinin enerjisi daha yüksektir. Ayrıca tuz konsantrasyonu daha yüksek olan agardan elde edilen ses sinyallerinin en yüksek enerjiye sahip harmonikleri daha yüksek frekanslarda daha baskın olarak gözlemlenmektedir. Tam tersi şekilde daha düşük tuz konsantrasyonuna sahip agardan elde edilen ses sinyallerinin en yüksek enerjiye sahip olan harmonikleri daha düşük frekanslarda kümelenebilir.

TABLO III. Değişen tuz konsantrasyonu ile beraber direnç, iletkenlik ve sinyalin toplam enerjisinin değişimi.

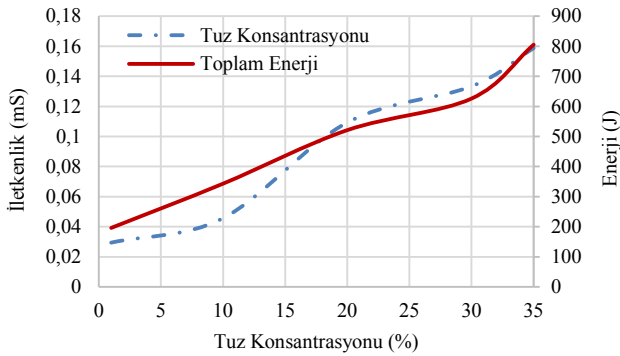
Tuz Konsantrasyonu (%)	Direnç Değerleri (kΩ)	İletkenlik Değerleri (mS)	Toplam Enerji (J)
1	34	0,0029	196,06
10	21,9	0,0457	343,61
20	9,15	0,1093	521,65
30	7,5	0,1333	626,30
35	6,3	0,1587	805,63

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Atmosferik soğuk plazmanın farklı malzemeler üzerinde deşarj süresince oluşan plazma sesleri, çeşitli sinyal işleme

yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Farklı materyaller üzerinde deşarj alınan plazmadan elde edilen ses sinyallerinin farklı enerji seviyelerinde harmonikler şeklinde oluştuğu gözlemlenmiştir. İletkenliği farklı malzemelerden elde edilen ses sinyallerinin farklı enerji seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Değişen iletkenlik ve enerji seviyeleri arasındaki ilişki Şekil 6'de gösterilmiştir. Daha yüksek iletkenliğe sahip malzemelerde ses enerji seviyesi daha yüksek ve ses harmonikleri daha yüksek frekanslarda kümelenmiştir. Ayrıca ses harmonikleri arasındaki frekans mesafesi sabit plazma frekansına göre her zaman sabit aralıkta kalmıştır.

Agar ile yapılan ölçümün verileri değerlendirildiğinde artan tuz konsantrasyonu ile beraber sinyalin toplam enerjisinin arttığı saptanmıştır. Ses kaydı alınırken farklı tuz konsantrasyonları ile beraber plazma güç kaynağının sesinin ve tizlik/baslık durumunun değiştiği kulakla bile ayırt edilebilmiştir. Şekil 5'de yüksek tuz konsantrasyonuna sahip agarlardan elde edilen ses sinyallerinin harmoniklerinin daha yüksek frekanslarda kümelenmesinden dolayı bu seslerin daha tiz olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde daha düşük tuz konsantrasyonuna sahip agarlardan elde edilen ses sinyallerinin harmoniklerinin daha düşük frekans değerlerinde kümelenmesi bu seslerinin daha bas olduğunu göstermektedir. Bu çalışma için geçerli olmak üzere, yüksek tuz konsantrasyonlarında plazma güç kaynağının sesi daha tiz ve deşarj sesi yüksekken, düşük tuz konsantrasyonlarında daha bas ve deşarj sesi daha güçsüz olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca artan tuz konsantrasyonu ile çözelti direncinin düştüğü, böylelikle çözelti iletkenliğinin arttığı yapılan ölçümlerle gözlemlenmiştir.



Şekil 6. İletkenlik-Enerji değişim grafiği.

Plazma oluşum sürecindeki elektrik alan, karşı elektrotun daha yüksek bir elektriksel iletkenliğe sahip olmasıyla beraber artış göstermektedir. Bu durum da cihaz deşarjı esnasında yüksek ses çıkmasına sebep olmaktadır.

Literatürde kanserli dokuların elektriksel iletkenliklerinin sağlıklı dokulara göre önemli ölçüde yükseldiği bildirilmiştir [10]. Yukarıda bahsedildiği gibi iletkenlik değişimi ile plazma güç kaynağının sesi ve ses sinyalinin toplam enerjisi arasında mutlak bir ilişki vardır. Yapılması hedeflenen çalışmalarda atmosferik soğuk plazmanın bir tarayıcı olarak kullanılması hedeflenmekte ve doku yüzeyini tararken değişen ses sinyallerine göre doku paternini çıkarabilmesi ve kanserli dokuyu bulunduğu konum ve şekil olarak saptayabilmesi

hedeflenmektedir.

Atmosferik soğuk plazma sterilizasyondan kanser tedavisine kadar birçok farklı alanda uygulanmaktadır ve kullanım alanları gün geçtikçe artış göstermektedir. İnsan veya hayvan dokusunda kullanılan plazma güç kaynağının direkt olarak canlı üzerinde kullanılabilmesi için optimizasyonu gereklidir. Plazma karakteristiklerinin ve sistem bozukluklarının içsel değişkenliği nedeniyle plazmaların tekrarlanabilir ve etkili çalışması için geri besleme kontrolü önem arz etmektedir. Göreceli olarak küçük değişikliklerin bile plazma güç kaynağının çalışması sırasında dikkate değer değişikliklere neden olabileceği, bir plazma tedavisinin güvenliğini ve etkinliğini tehlikeye soktuğu gösterilmiştir [11]. Plazma güç kaynağının çalışması esnasında alınacak olan ses sinyallerinin değişimleri ve bu değişimlere göre yapılacak geri beslemeler sonucunda cihaz maksimum verimle çalışabilir. Bunun yanında canlı ile yapılacak çalışmalar için dokuya zarar vermeden çalışmayı mümkün kılabilir. Bu çalışma sonucunda plazma sesinin doku karakteristiği tespiti için kullanılabilir olabileceği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] I. Langmur, "Oscillations in Ionized Gases," vol. 14, pp. 627-637, 1928.
- [2] G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, "Applied plasma medicine," *Plasma Processes and Polymers*. 2008.
- [3] S. G. Joshi *et al.*, "Nonthermal dielectric-barrier discharge plasma-induced inactivation involves oxidative DNA damage and membrane lipid peroxidation in Escherichia coli," *Antimicrob. Agents Chemother.*, 2011.
- [4] G. Lloyd, G. Friedman, S. Jafri, G. Schultz, A. Fridman, and K. Harding, "Gas plasma: Medical uses and developments in wound care," *Plasma Processes and Polymers*. 2010.
- [5] U. K. Ercan, J. Smith, H. F. Ji, A. D. Brooks, and S. G. Joshi, "Chemical Changes in Nonthermal Plasma-Treated N-Acetylcysteine (NAC) Solution and Their Contribution to Bacterial Inactivation," *Sci. Rep.*, 2016.
- [6] V. J. Law, C. E. Nwankire, D. P. Dowling, and S. Daniels, "Acoustic Emission within an Atmospheric Helium Discharge Jet," *Int. J.*, no. June, pp. 1-4, 2010.
- [7] M. Fitaire and T. D. Mantei, "Some Experimental Results on Acoustic Wave Propagation in a Plasma," vol. 464, no. 1972, 2013.
- [8] V. J. Law, A. Chebbi, F. T. O. Neill, and D. P. Dowling, "Resonances and patterns within the kINPen-MED atmospheric pressure plasma jet," no. November 2013, pp. 3-10, 2014.
- [9] A. Alkan and A. S. Yılmaz, "Kapasitör Anahtarlama Sonucu Oluşan Geçici Salınımların Frekans ve Zaman Frekans Domeninde Analizi," *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı*, 2007.
- [10] S. Haltiwanger, "The electrical properties of cancer cells," *Wind Power*, 17.06, 2010.
- [11] D. Gidon, B. Curtis, J. A. Paulson, D. B. Graves, and A. Mesbah, "Model-Based Feedback Control of a kHz-Excited Atmospheric Pressure Plasma Jet," vol. 7311, no. c, pp. 1-9, 2017.