

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİMDALI**

**PIEZOELEKTRİK MALZEMELER YARDIMIYLA  
RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ**

**Hazırlayan  
İkram BÜYÜKKESKİN**

**Danışman  
Doç. Dr. Sezai Alper TEKİN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Ocak 2018  
KAYSERİ**

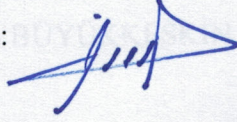


## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

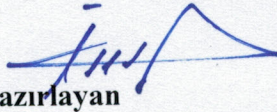
İkram BÜYÜKKESKİN

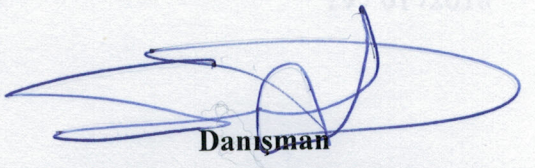
İmza :



Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı  
Prof. Dr. Hüseyin YARICI

Doç. Dr. Sezai Alper TEKİN danışmanlığında İbrahim BÜYÜKKESKİN tarafından hazırlanan “Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi” adlı bu çalışmaya, jüri üyesi tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak “Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi” adlı yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

  
**Hazırlayan**  
İkram BÜYÜKKESKİN

19/01/2018  
  
**Danışman**  
Doç. Dr. Sezai Alper TEKİN

Danışman : Doç. Dr. Sezai Alper TEKİN

Üye : Doç. Dr. Murat Sertel GENÇ

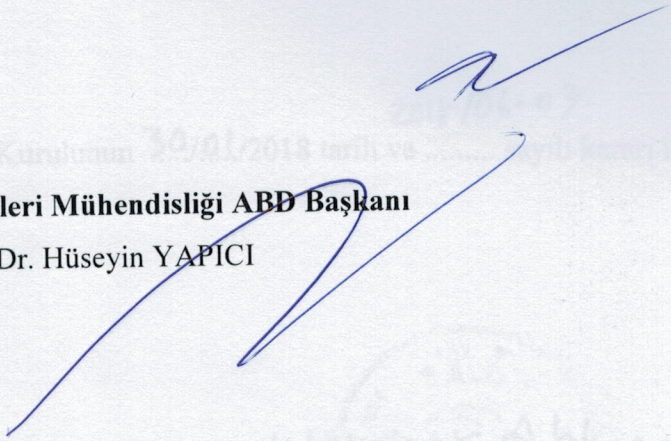
Üye : Yrd. Doç. Dr. Oğuz ÖZSOĞUK

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 30/01/2018 tarih ve ... kararı ile onaylanmıştır.

**Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı**

Prof. Dr. Hüseyin YAPICI



Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

**Doç. Dr. Sezai Alper TEKİN** danışmanlığında **İkram BÜYÜKKESKİN** tarafından hazırlanan “**Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

19 / 01 / 2018

**JÜRİ:**

Danışman : Doç.Dr. Sezai Alper TEKİN

Üye : Doç.Dr. Mustafa Serdar GENÇ

Üye : Yrd.Doç.Dr. Onur ÖZSOLAK

**ONAY:**

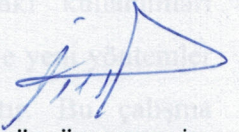
Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun <sup>2018/06-07</sup> 30/01/2018 tarih ve ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince yardımları ve bilimsel katkılarıyla bana yol gösteren kıymetli danışmanım Doç.Dr. Sezai Alper TEKİN hocama, yüksek lisansa başladığım günden bu yana desteklerini esirgemeyen Doç.Dr. Mustafa Serdar GENÇ hocama, emeği geçen bölümümüzdeki diğer hocalarıma, deneylerimiz sırasında yardımlarını esirgemeyen araştırma görevlisi arkadaşlarıma, beni yetiştirip bu günlere getiren anne babama, evlendiğimiz günden bu yana öğrenci bir kocaya gösterdiği sabır ve desteklerinden dolayı sevgili eşime teşekkürü bir borç bilirim.

  
İkrâm BÜYÜKKESKİN

Ocak 2018, Kayseri

# PIEZOELEKTRİK MALZEMELER YARDIMIYLA RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ

İkram BÜYÜKKESKİN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2018  
Danışman: Doç.Dr. Sezai Alper TEKİN

## ÖZET

Artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için bilindik elektrik enerjisi üretim metotları dışında alternatif ve çevreci yöntemler araştırılmaktadır. Piezoelektrik malzemelerden enerji üretimi de yeni yöntemlerden biridir. Yapısı ve çalışma prensipleri itibariyle düşük miktarda elektrik üretebilen bu malzemelerin hâlihazırdaki kullanımları çoğunlukla sensör amaçlıdır. Bu malzemeler verimlerinin artırılması ve yeni yöntemler uygulanması ile elektrik üretici olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışma piezoelektrik malzemeler kullanarak rüzgâr enerjisinden elektrik üretmeyi amaçlayan bir projeden yola çıkılarak yapılmıştır. İmal edilen bir prototip ile bu metodun uygulanabilirliğini deneysel olarak incelenmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile 2 farklı yapıda rüzgâr sapı ve bu saplar ile piezoelektrik üreteçlerin yerleştirileceği bir tabanlık imal edilmiştir. Hazırlanan deney düzeneği rüzgâr tüneline yerleştirilerek, farklı rüzgâr hızlarında düşük ve yüksek türbülanslı akıslarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Sapların rüzgâr karşısında yapmış olduğu salınım ile tabana yerleştirilen piezoelektrik malzemelere baskı uygulanması amaçlanmıştır. Bunun sonucunda yuvarlak ve 4 köşeli sap yapılarının düşük ve yüksek türbülanslı akıslarda farklı hızlardaki elektrik üretimi incelenmiştir. Sonuç itibariyle, üretilen elektrik piyasada bulunan farklı uygulama ve amaçlar için hazırlanmış piezoelektrik üreteçleri kullanmamızdan ve ölçü aletlerinden kaynaklanan sıkıntılardan dolayı çok düşük değerlerde kalmıştır. Ancak piezoelektrik malzemelerin farklı tasarım ve uygulamalarla verimliliklerinin artırılabilceği ve standart rüzgâr türbinlerinin kullanılmadığı türbülanslı alanlarda kullanılabilceği gözlenmiştir. Bu avantajlarından dolayı piezoelektrik malzemelerden elektrik üretiminin gelecek vadeden bir yöntem olduğuna ve farklı uygulamalar denenerek daha iyi sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Piezoelektrik, piezoseramik malzemeler, rüzgâr enerjisi, rüzgâr tüneli, elektrik üretimi.

# **ELECTRICITY PRODUCTION FROM WIND ENERGY WITH PIZOELECTRIC MATERIALS**

**İkram BÜYÜKKESKİN**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences  
M.Sc. Thesis, January 2018  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sezai Alper TEKİN**

## **ABSTRACT**

Besides the known electric energy production methods in order to meet the increasing energy needs, alternative and environmental methods are being investigated. Energy production from piezoelectric materials is also one of the new methods. The current uses of these materials which can produce electricity in low quantities due to their structure and working principle are mostly for sensor purposes. With the implementation of new methods and increasing the efficiency of these materials, they are started to be used as the electric generator. This study was carried out from a project aimed at generating electricity from wind energy using piezoelectric materials. The applicability of this method was investigated experimentally with a prototype manufactured. By means of a 3-D printer, windstalk in 2 different building sand a platform which piezoelectric generators we replaced with together these stalks were manufactured. Experiments were carried out in low and high turbulent flows at different wind speeds by placing the prepared experimental setup on the wind tunnel. It was aimed to apply pressure to the piezoelectric material placed on the basin by the oscillation of the wind stalks against the wind. As a result, the power generation at different speeds in the low and high turbulent flows of the circle shaped and four-cornered wind stalk structures was investigated. Consequently, because of using piezoelectric generators for different applications and purposes in the electrical market, the electricity produced remained at very low levels. However, it was observed that efficiency of piezoelectric materials with different designs and applications can be increased and these materials can be used in turbulent fields where standard wind turbines cannot be used. Due to these advantages, it was concluded that electricity production from piezoelectric materials is a promising method and by experimenting with different applications, better results can be achieved.

**Keywords:** Piezoelectric, piezoceramic materials, wind energy, wind tunnel, electricity production.

## İÇİNDEKİLER

### PIEZOELEKTRİK MALZEMELER YARDIMIYLA RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK .....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
ONAY .....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiv
GİRİŞ .....	1

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Piezoelektrik Nedir? .....	2
1.2. Piezoelektrik Tarihi .....	3
1.3. Piezoelektrik Malzemeler .....	4
1.3.1. Polikristal Yapıya Sahip Piezoelektrik Seramikler .....	4
1.3.2. Temel Piezoelektrik Mineraller ve Özellikleri.....	5
1.3.2.1. Kuvars (SiO <sub>2</sub> ).....	5
1.3.2.2. Turmalin .....	7
1.3.2.3. Baryum Titanat, Kurşun Zirkonat/Titanat(PZT) .....	8
1.4. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları .....	9

1.4.1. Elektrik Üretimi .....	9
1.4.2. Ölçüm İşlemleri .....	10
1.4.3. Güç Ultrasonu Uygulamaları .....	13
1.4.4. Bilimsel Çalışmalarda Kullanımları .....	14
1.4.5. Pompalama ve Dozajlama İşlemleri .....	16
1.5. Literatür Çalışması .....	20

## 2. BÖLÜM

### DENEYSEL YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Giriş .....	23
2.2. Deneysel Yöntem .....	23
2.3. Deney Ekipmanları .....	24
2.3.1. Piezoelektrik Üreteçler .....	24
2.3.2. Tabanlık ve Sapların İmalatı .....	25
2.3.3. Rüzgâr Tüneli .....	26
2.3.4. Ölçüm Cihazları .....	28

## 3. BÖLÜM

### RÜZGÂR TÜNELİ TESTLERİ

3.1. Test Düzenineğinin Hazırlanması .....	29
3.2. Piezoelektrik Üreteçlerin Akım Ölçümü Testleri .....	29
3.2.1. Yuvarlak Sap Yapısına Ait Akım Ölçümleri .....	29
3.2.2. 4 Köşeli Sap Yapısına Ait Akım Ölçümleri .....	32
3.2.3. Yuvarlak Sap Yapısı Ağırlık Eklenmiş Akım Ölçümleri .....	35
3.2.4. Yuvarlak Sap ve 4 Köşeli Sap Akım Ölçümleri Kıyaslaması .....	36
3.2.5. Akım Ölçümü Tekrarları .....	37

<b>3.3. Piezoelektrik Üreteçlerin Voltaj Ölçümü Testleri .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.1. 4 Köşeli Sap Yapısına Ait Voltaj Ölçümleri .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.2. Yuvarlak Sap Yapısına Ait Voltaj Ölçümleri.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3. Yuvarlak ve 4 Köşeli Sap Yapısına Ait Voltaj Ölçümleri Kıyaslaması.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. Piezoelektrik Üreteçlerin Güç Üretimleri.....</b>	<b>44</b>
<b>3.5. Çift Katlı Piezoelektrik Üreteçlerle Güç Üretimi Denemesi .....</b>	<b>47</b>

## **4. BÖLÜM**

### **SONUÇLAR ve ÖNERİLER**

<b>4.1. Sonuçlar .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Öneriler .....</b>	<b>52</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>54</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>57</b>
<b>EK 1.....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>58</b>

## KISALTMALAR VE SİMGELER

<b><u>Sembol</u></b>	<b><u>Anlam</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
AC	Alternatif akım	-
ADP	Amonyum dihidrojen fosfat	-
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu	-
BaTiO <sub>3</sub>	Barium titanat	-
Bi	Bizmut	-
DC	Doğrusal akım	-
DESY	German Electron Synchrotron	-
DPT	Dipotasyum tartarat	-
EADS	Avrupa Havacılık ve Uzay Ajansı	-
EDT	Etilen diamin tartarat	-
ESWL	Ekstrakorporal şok dalga litotripsi	-
ESWT	Yüksek enerjili şok dalgaları	-
	Hızlandırıcı	-
KDP	Dihidrojen fosfat	-
La	Lantan	-
LP	Lityum fosfat	-
MIT	Amerikan Massachusetts Institute of Science and	
NaKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> 4H <sub>2</sub>	Rochelle tuzu	-
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi	-
Nb	Niyobyum	-
Nd	Neodyum	-
Ni	Nikel	-
PCB	Baskılı devre kartları	-
PZT	Kurşun zirkonat titanat	-
SiO <sub>2</sub>	Kuvars	-
	Technology	-
TESLA	Tera Elektron Volt Enerjisi Süper İletken Doğrusal	
TTM	Tarama problu mikroskop	-
XEFL	Parçacık hızlandırıcısının adı	-
ZnO	Çinko oksit	-

<b><u>Sembol</u></b>	<b><u>Anlam</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
P	Güç	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
V	Voltaj	V
I	Akım	$\mu\text{A}$
A	Dairenin alanı	$\text{cm}^2$
$\Pi$	Pi sayısı	-
r	Yarıçap	cm



**TABLULAR LİSTESİ**

Tablo 2. 1. Kullanılan piezoelektrik malzemenin özellikleri.....	24
Tablo 2. 2. Rüzgar tüneli hız tespit tablosu.....	27



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Yumuşak ve sert piezoelektrik malzemeler.....	9
Şekil 1. 2. Ayakkabı tabanına yerleştirilen piezoelektrik malzemeler.....	21
Şekil 1. 3. Abu Dabi’de planlanan Windstalk projesi.....	22
Şekil 2. 1. Piezoelektrik malzeme internet görseli ve siparişin son hali.....	24
Şekil 2. 2. Tabanlık ve sap tasarımlarına ait SolidWorks çizimleri.....	25
Şekil 2. 3. 3 boyutlu yazıcıda tabanlık ve sapların imalatı.....	26
Şekil 2. 4. Deneylerin gerçekleştirildiği rüzgar tüneli.....	27
Şekil 2. 5. Ölçüm cihazları.....	28
Şekil 3. 1. Rüzgar tüneli deney düzeneği.....	30
Şekil 3. 2. Düşük türbülanslı akışta yuvarlak sap akım ölçümü.....	30
Şekil 3. 3. Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak sap akım ölçümü.....	31
Şekil 3. 4. Düşük ve yüksek türbülanslı akışta maksimum akım üretimi kıyaslaması ...	32
Şekil 3. 5. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap akım ölçümü.....	33
Şekil 3. 6. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap akım ölçümü(AC).....	33
Şekil 3. 7. AC ve DC akım ortalama değerler kıyaslaması.....	34
Şekil 3. 8. Düşük türbülanslı akışta 4 köşeli sap akım ölçümü.....	34
Şekil 3. 9. Ağırlık eklenmiş yuvarlak sap akım ölçümü deney düzeneği.....	35
Şekil 3. 10. Yuvarlak kule ağırlık eklenmiş akım ölçümleri kıyaslaması.....	36
Şekil 3. 11. Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak ve 4 köşeli sap akım kıyaslaması .....	36
Şekil 3. 12. Eski ve yeni akım ölçümü deney düzeneği.....	37
Şekil 3. 13. Yüksek türbülanslı akışta akım ölçümleri kıyaslaması.....	38
Şekil 3. 14. Düşük türbülanslı akışta akım ölçümleri kıyaslaması .....	38
Şekil 3. 15. Düşük türbülanslı akışta 4 köşeli sap maksimum voltaj değerleri.....	39
Şekil 3. 16. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap maksimum voltaj değerleri.....	40
Şekil 3. 17. 4 köşeli sap düşük ve yüksek türbülanslı akış voltaj ölçümü kıyaslaması ..	40
Şekil 3. 18. Düşük türbülanslı akışta yuvarlak sap maksimum voltaj değerleri.....	41
Şekil 3. 19. Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak sap maksimum voltaj değerleri .....	41
Şekil 3. 20. Yuvarlak sap düşük ve yüksek türbülanslı akış voltaj ölçümü kıyaslaması.	42
Şekil 3. 21. Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak ve 4 köşeli sap voltaj ölçümü.....	43
Şekil 3. 22. Düşük türbülanslı akışta yuvarlak ve 4 köşeli sap voltaj ölçümü.....	43

Şekil 3. 23. Güç analizlerinde kullanılacak akım değerleri .....	44
Şekil 3. 24. Güç analizlerinde kullanılacak voltaj değerleri .....	44
Şekil 3. 25. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap maksimum güç üretimi tablosu. ....	45
Şekil 3. 26. 4 köşeli sap yapısının piezoelektrik üreteçlere baskı yapan kısmı. ....	45
Şekil 3. 27. 1cm <sup>2</sup> 'de üretilen maksimum güç tablosu.....	46
Şekil 3. 28. Piezoelektrik üreteçlerin dış görünüşü ve boyutları.....	47
Şekil 3. 29. Çift katlı piezoelektrik üreteç deney düzeneği.....	48
Şekil 3. 30. Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin voltaj ölçümü sonuçları .....	49
Şekil 3. 31. Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin akım ölçümü sonuçları.....	49
Şekil 3. 32. Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin güç analizleri.....	50

## GİRİŞ

Bilindiği üzere rüzgâr enerjisi, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak yıllardır kullanılmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalar, projeler ve patent başvuruları da bu enerji kaynağının önümüzdeki yıllarda toplam enerji üretiminde daha hatırı sayılır yerlere geleceğini göstermektedir[1]. Türkiye de rüzgâr enerjisi açısından verimli bir coğrafyaya sahiptir. Rüzgâr enerjisi açısından hâlihazırdaki kurulmuş santraller ve planlanan santraller ile ilerleyen dönemde rüzgâr enerjisi önemli bir yere sahip olacaktır[2]. Ancak kurulan rüzgâr türbinlerinde zaman içerisinde az da olsa kuş ölümleri, mikro ölçekte çevre ve iklim değişiklikleri gibi olumsuz etkiler gözlemlenmiştir[3, 4]. Ancak gelişen teknolojiler neticesinde maliyetleri düşürmek için çalışmalar yapılmaktadır[5]. Ayrıca hâlihazırdaki elektrik üretim metodlarının verimliliğini artırmak üzerine de araştırma ve geliştirmeler yapılmaktadır[6]. Yenilenebilir ve çevreci bir kaynak olan rüzgâr enerjisi bu çalışmaların merkezinde bulunmaktadır. Piezoelektrik malzemeler kullanarak rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi de geliştirilen yeni metotlardan biridir. Bu çalışma içerisinde piezoelektrik malzemelerin tanıtımı yapılmış ve bunlardan elektrik üretimi konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan prototip ve deneyler ile de elektrik üretimi konusunda fikir sahibi olunmaya çalışılmıştır.

# 1. BÖLÜM

## GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 1.1. Piezoelektrik Nedir?

Kelime kökeni olarak Yunanca'dan türetilmiş olan piezo “sıkıştırmak, basınç uygulamak” demektir. Piezoelektrik özelliği ise bazı kristal yapıdaki malzemelere mekanik basınç uygulanması neticesinde malzemenin elektrik alanını ya da elektrik potansiyelini değiştirme yeteneğidir. Bu durum malzemenin içindeki polarizasyon yoğunluğundaki değişimle alakalıdır. Malzeme kısa devre değilse, etki eden basınç malzemede bir voltaj meydana getirerek elektrik üretilmiş olur. Bu tipteki kristallerin çeşitli yönlerden sıkıştırıldıklarında voltaj üretirler. Bu durumun terside mümkündür. Piezoelektrik etkinin tam tersi bir durum kuvars ve bazı seramiklerin özel biçimlerinde görülür. Bu tür maddelerin iki farklı yüzü arasında elektrik yüklerinin olmasından dolayı bu yüzler üstüne iki elektrod yerleştirilirse arasında potansiyel bir fark ölçülebilir. Uygulanan basınçla meydana gelen elektrik yüklerinin yüzeysel yoğunluğu doğru orantılıdır. Sonuç olarak piezoelektrik etki ve tersi, mekanik kuvvetin elektriksel etkiye doğrudan dönüşmesini sağlar.

Piezoelektrik teknolojisi tıp alanında, makine mühendisliği uygulamalarında, otomotiv sektöründe ve yarı iletken teknolojisi gibi yüksek teknoloji pazarlarında kullanılmaktadır. Günlük yaşamda gözlük, mücevher temizliği ve diş taşı temizliği gibi alanlarda kullanılan ultrasonik titreşim üreteçlerinde de piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzeme tabanlı ultrasonik sensörler araçlarda park etmeye yardımcı olan park sensörlerinde mesafe ölçümü için kullanılabilirler. Hamilelerde doğumdan önceki kontrollerde bebeğin kalp atışlarını izlemek için piezoelektrik malzemelerden imal edilen cihazlar kullanılmaktadır. Ayrıca yeni geliştirilen uygulamalarla elektrik üretimi içinde kullanılabilirler.

## 1.2. Piezoelektrik Tarihi

1880 yılında *Pierre* ve *Jacques Curie* tarafından, turmalin, rochelle tuzu ve kuvars gibi kristaller üzerinde baskının yarattığı elektrik yükünün etkileri üzerine çalışmalar sırasında piezoelektrik etki keşfedilmiştir. "Piezoelektriklik" terimi ise 1881 yılında *W. Hankel* tarafından önerilmiştir. *Gabriel Lipmann* tarafından temel termodinamik ilkeleri ile ters etkisi matematiksel olarak açıklanmıştır[7]. Daha sonraki yıllarda piezoelektriklik bir laboratuvar merakı olarak kalmıştır. 1910 yılında *Woldemar Voigt* tarafında *Lehrbuchder*'de yayınlanan *Kristallphysik* adında kristal fizik üzerine bir ders kitabında piezoelektrik özelliği olan kristaller sınıflandırıp, piezoelektrik sabitlerinin yayınlanmasıyla bu konuya olan ilgi daha da artmıştır[8]. 1917'de *Paul Langevin* ve arkadaşları piezoelektrik malzemeler kullanarak bir ultrasonik deniz altı dedektörü geliştirmişlerdi. Bu başarı piezoelektrik malzemelerin su altı uygulamaları ile diğer ultrasonik sensörler, mikrofonlar ve ivmeölçerler için de kullanılabilceğini ortaya koymuştur.1935'te *Busch* ve *Scherrer* potasyum dihidrojen fosfatın(KDP) ve izotoplarının piezoelektrik özelliğini keşfetmiştir. KDP ailesi ilk keşfedilen büyük piezoelektrik ve ferroelektrik ailesidir. 1940-1943 yılları arasında *Wainer*, *Salmon*, *Ogawa*, *Wul* ve *Golman* barium titanatın( $BaTiO_3$ ) olağandışı çok yüksek dielektrik sabiti özelliğinin olduğunu bulmuşlardır. Bu keşiften sonra  $BaTiO_3$ 'ün bileşimsel modifikasyonlarının sıcaklık kararlılığı ve yüksek gerilim çıkışının daha iyi olduğu görüldü. 1950'lere gelindiğinde *Jaffe* ve arkadaşları kurşun zirkonat titanat(PZT) sisteminin güçlü piezoelektrik etkileri olduğunu sergilemişlerdir.1965'ten itibaren ise birçok Japon şirketi piezoelektrik seramikler için temel olarak kabul edilen PZT bazlı üçlü katı çözeltiler ve bunların kompozisyonlarını geliştirmeye odaklandı. Japonlar geliştirdikleri malzemeleri ve türevlerini tıbbi uygulamalarda, iletişim alanında, askeri uygulamalarda ve otomotiv alanında kullanarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Diğer uluslar da bugünkü çalışmalarında Japonlar tarafında geliştirilen PZT tabanlı piezoelektrik seramikleri kullanırlar. Ayrıca 1971'de *Jaffe* ve arkadaşlarının piezoelektrik seramikler üzerine yayınladıkları kitap hala piezoelektrik üzerine en çok başvurulan eserlerden biridir. 1980'lerde *Cross* ve *Penn State*, PZT sisteminde piezoelektrik sabitlerinin yeterliliğini formüle etmek için sürekli çaba harcamış ve bir seri bildiri ile belgelenmiştir[9].

### 1.3. Piezoelektrik Malzemeler

Sürekli kutuplaşma özelliği gösteren asimetric iyonsal kristaller, üzerlerine basınç uygulanırsa kutupları arasındaki uzaklık azalarak yüzeylerindeki yük birikimi değişir. Bu nedenle iki uç arasında gerilim farkı doğar ve bu anda bir iletkenle birleşirse akım akar. Bu sayede mekanik etki elektriksel bir karşılığa dönüşmüş olur. Tam tersi bir durumda benzer kristallerin iki ucu arasına gerilim uygulandığında uçlardaki yük yoğunluğu değişir. Manyetik alan yönünde dipol moment artar ve neticede kristalin boyu büyür. Manyetik alanın doğrultusu değişirse aynı işaretli yükler birbirini iter ve kristalin boyu küçülür. Sonuç olarak elektriksel etki mekanik bir büyüklüğe dönüşmüş olur. Kristallerin gösterdiği bu durum piezoelektrik özellik olarak adlandırılır. Piezoelektrik özellik gösteren malzemelerde yerel kutuplar(dipoller) rastgele yönlendirilmiş haldeyken net bir kutuplaşma(polarizasyon) görülmez. Bu durumdaki malzemenin kutuplanması(poling) için güçlü bir doğru akım altında olması gerekir. Yüksek simetrikli kübik paraelektrik kristal yapının distorsiyona uğrayarak kendiliğinden bir dipol oluşumu gerçekleşmesi için daha düşük simetrikli kristal yapılara dönüşmesi gerekir. Böyle kendiliğinden dipol içeren malzemelere, dipollere ters yönde bir elektrik alanı uygulanarak, özelliği değişebilen malzemelere ferroelektrik malzeme denir. Bu nedenle tüm ferroelektrik malzemeler, tersinir etki nedeniyle aynı zamanda piezoelektriktir[10]. Piezoelektrik etki tek kristal polar eksenli şu maddelerde bulunur: kuvars( $\text{SiO}_2$ ), rochelle tuzu( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), kadminyum sülfat, turmalin, lityum sülfat, çinko oksit( $\text{ZnO}$ ), baryum titanat( $\text{BaTiO}_3$ ) ve kurşun zirkonat titanat(PZT). Amonyum dihidrojen fosfat(ADP), etilen diamin tartarat(EDT), dipotasyum tartarat(DPT) ve lityum fosfat(LP) gibi suni kristallerde az da olsa piezoelektrik etki görülür. Bu tür malzemeler ise piezoelektrik kristal yapımı için kullanılırlar[11].

#### 1.3.1. Polikristal Yapıya Sahip Piezoelektrik Seramikler

Kuvars, turmalin ve rochelle tuzu gibi doğal monokristal malzemelerin piezoelektrik etkisi nispeten küçüktür. Baryum titanat( $\text{BaTiO}_3$ ) ve kurşun zirkonat titanat(PZT) büyük yer değiştirmeleri sergiler ya da daha büyük elektrik gerilimleri indüklerler. PZT piezoelektrik seramik malzemeler birçok varyasyon halinde mevcuttur. Bu seramikler aktüatör veya sensör uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. PZT seramikler nikel(Ni), bizmut(Bi), lantan(La), neodyum(Nd) ve niyobyum(Nb) iyonlarıyla piezoelektrik ve dielektrik parametrelerini daha iyi ortaya çıkarır. Curie sıcaklığı

altındaki sıcaklıklarda PZT kristallerinin kafes yapısı çarpık ve asimetric hale gelir. Bu piezoelektrik teknoloji için gerekli olan dipollerin ve tetragonal kristalin fazların oluşumunu sağlar. Curie sıcaklığının üzerinde piezoseramik malzemeler piezoelektrik özelliklerini kaybeder[12].

### 1.3.2. Temel Piezoelektrik Mineraller ve Özellikleri

Çalışmamızın temelinde yer alan piezoelektrik malzemelerin yapı taşları olan minerallerin temel özellikleri, buldukları yerler, kullanım alanları gibi yönleriyle daha detaylı olarak bu bölümde tanıtılacaktır.

#### 1.3.2.1. Kuvars( $\text{SiO}_2$ )

Kuvars, saf silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) kristallerinin diğer adıdır.  $2.65 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığı ve 7 Mohs sertliği olan bu maddelere doğada çok rastlanır. Günümüzde alternatif tıpta tedavi için kullanılan kuvars, eski dönemlerde sihir yapmak için bile kullanılmıştır. Ayrıca endüstriyel uygulamalarda da birçok kullanımı vardır. Kuvars denildiğinde tek bir taş değil, geniş bir taş ailesi akla gelmektedir. Çok sayıda çeşidi olan kuvars mineralleri artık kendi özel adlarıyla tanınmaktadır. Bunlardan bazıları sitrin, ametist ve krizopraz'dır. Kuvars genelde kristal yapıda olsa da gözle görünmeyen kristal yapıları da vardır. Bu türleri yarısaydam ve donuk özellikte bulunmaktadır. Kristal yapıda olanlar kuvarslar ise camsı özellikte kolay kırılabilen yapıdadırlar. Çoğunlukla beyaz renkte olan kuvars taşı, içine karışan maddelere göre sarı, yeşil, mavi, pembe, kahverengi ve siyah renkte de olabilirler.

Kuvars taşı dünyadaki tüm iklim koşullarında oluşabildiği için tüm dünya yüzeyinde yaygın şekilde ve bol miktarda bulunabilen değerli taşlardan biridir. Metaformik ve tortul bir kayaç olan kuvars, mekanik ve kimyasal tepkimelere karşı oldukça dayanıklıdır. Türünün en değerlisi olan mavi kuvarsın dünyadaki en önemli kaynakları Brezilya'daki iken, Madagaskar ve Afrika'nın birçok bölgesinde de kuvars yatakları bulunmaktadır. Türkiye'de farklı çeşitlerde kuvars yatakları olsa da dumanlı kuvarsın siyah türü ve en güzeli olan 'Morion' Türkiye'de çıkartılır. Balıkesir Dursunbey'de ametist kristalleri çıkartılırken, Aydın'da hafif ve şeffaf dumanlı kuvars ile dağ kristali(şeffaf kuvars) madenleri bulunmaktadır. Mersinbeleni Köyü'nde tarladan topladıkları dumanlı kuvarsları satarak 30 yıldır geçimini sağlayan insanlar vardır.

Değerli taş olarak nitelendirilen kuvars, çok çeşitli alanlarda kullanılır. Yapısındaki %99 oranındaki billurlaşmış silis kristali, sanayide ve endüstriyel alanda ham madde olarak kullanılan ve çok tüketilen bir malzemedir. Kumlarda bol miktarda yer alan kuvarsın saf olmayanları içlerinde bir miktar demir de bulundurur. Özellikle cam sanayisinde beyaz kum olarak adlandırılan kuvars mineralleri kullanılır. İçindeki yabancı minareler kuvarsın şeklinin ve renginin bozulmasına neden olur. Bundan dolayı kuvarsın saflığı ne kadar yüksek olursa, üretilen cam da o oranda kaliteli olur. Kuvarsın diğer kullanım alanları şunlardır: alt yapı hizmetlerinde ve sanayide kullanılan CTP borularda, inşaat sektöründeki kullanılan harç malzemelerinde ve ısı yalıtımı için kullanılan cam elyafın ham maddesi olarak kullanılır. Zemin düzenlemesinde yüksek su geçirme özelliği ile yüzey sularının drenajına yardım ettiği için halı saha, golf ve hipodrom gibi spor alanlarında kuvars kumu kullanılır. Su ve benzeri diğer sıvıların filtreleme arıtma işlemlerinde kuvarsın geçirgenlik özelliği ucuz ve etkin bir yöntem olarak kullanılır. Alternatif tıp yöntemi olarak da kuvars fiziksel, metafiziksel ve psikolojik birçok rahatsızlıkta tedavi edici yöntem olarak insanlar üzerinde kullanılır.

**Bilinen bazı kuvars taşları ve özellikleri şunlardır:**

*Necef kristal (dağ kristali)*, diğer bir adı da 'kristal kuvars' olan bu mineral adını Irak'ın Necef şehrinden alır. Mücevher taşı olarak ve süs eşyaları olarak kullanılan bu kristal içinde hava kabarcıkları barındırır. Önceki dönemlerde ise mühür, tespah ve bardak imalatında kullanılmıştır. Necef taşından yapılmış 17. yüzyıla ait bir avize ve maşrapa Topkapı Sarayı Müzesi'nde sergilenmektedir.

*Sütlü kuvars*, diğer bir adı da beyaz kuvarstır. Sütlü beyaz renkte olup, doğada en çok bulunur. Seramik ve porselen imalatı için sanayi de kullanılır.

*Pembe kuvars*, volkanik kayaların içerisinde kütleler halinde veya tek parça kristal halde bulunur. Şeffaf ve pembe renkli olurlar. Pembe rengi içindeki titanyum ve manganez mineralleri verir. Ülkemizde Giresun-Şebinkarahisar çıkarılan bu tür, günümüzde takı yapımında kullanılsa da Roma döneminde devlet mühürleri imalatında kullanılmıştır.

*Yeşil kuvars (prasiolite)*, doğada nadir görülen bir türdür. Rengi yeşil veya şeffaftır. Eski dönemlerde broş yapımında kullanılmıştır.

*Dumanlı kuvars*, çok kıymetli bir taştır. Yapısı şeffaf ve kristal şeklinde olup kahverengi ya da griye yakın renktedir. Süs eşyası olarak veya dekoratif yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Aydın bölgesinde Koçarlı ve Karacasu yakınlarında dumanlı kuvars yatakları bulunmaktadır.

*Ametist*, koyu renkleri daha değerli olsa da menekşe ve mora yakın renkleri de vardır. Ülkemizde Fatsa, Aşkale ve Gölköy civarlarında ametist kaynakları mevcuttur.

*Sitrin*, adını limon manasındaki Fransızca 'citron' kelimesinden alır. Limonlu veya sarı kuvars olarak da bilinen bu mineral, doğada genellikle limon sarısı, portakal veya kırmızı renkte bulunur. Kristal yapıda olsa da diğer türlerden farkı şeffaf olmamasıdır. Eski dönemlerde yılan sokmasından zehirlenmemek için kullanılan bu kuvars çeşidinin en değerlileri Brezilya'da bulunur[13].

### **1.3.2.2. Turmalin**

Turmalin adı, Sri Lanka resmi dilindeki turamali kelimesinden türemiştir ve renkli taş anlamına gelir. Bir grup değişik kimyasal özelliklere sahip borosilikat mineraline verilen ortak addır. Genel formülü karmaşık kimyasal yapısı nedeniyle belirlenemeyen bu mineral halkalı silikatların üyesidir ve romboedrik kristal sistemine dâhildir. Kristalleri uzun prizmalar şeklinde olup simetri merkezi yoktur. 7-7.5 Mohs sertliği ve  $2.98-3.20\text{g/cm}^3$  özgül ağırlığı sahiptir. Bu kristaller güçlü piezoelektrik ve piroelektrik özellikler barındırır. Doğada genellikle granitik pegmatitlerde, pegmatitleri çevreleyen kayalarda, çeşitli şist ve gnays türlerinde bulunur. Turmalin genellikle renksiz, şeffaf, opak, mavi, pembe, yeşil ve siyah renklerde bulunur. Süs taşı olarak kullanılan çok sayıda turmalin çeşidi vardır. Piezoelektrik özelliği nedeniyle turmalin tıbbi ultrason alanında diş taşı temizlemek için kullanılan cihazlarda, böbrek taşı kırma işlemlerinde ve ortopedi alanında kullanılan ESWT tedavisinde kullanılır. Ayrıca mikrofon, hız ölçer ve radarlarda kullanılmaktadır. Afganistan, Tanzanya, Madagaskar ve Brezilya dünyadaki başlıca turmalin rezervine sahip ülkelerdir. Bunların dışında Elba Adası, Meksika, Rusya, ABD, Birmanya, Sibiryaya, Sri Lanka, Nijerya ve Zambiya da turmalin rezervi bulunan diğer yerlerdir. Manisa, Yozgat, Şebinkarahisar ve Gümüşhane illerinin bazı bölgeleri de Türkiye'deki farklı tip turmalin rezervine sahip bölgelerdir. Malzeme bilimleri açısından akıllı yapılarda kullanılabilecek turmalin, genellikle süs taşı olarak kullanılmaktadır[14].

### 1.3.2.3. Baryum Titanat, Kurşun Zirkonat/Titanat(PZT)

Baryum titanat'tan imal edilen seramiklerde piezoelektrik etki yüksek statik elektrik alanı etkisi altındayken rastlanabilmektedir. Piezoelektriksel özelliğinin ortaya çıkmasını baryum titanat'ın yapısal bazı özellikleri engellemektedir. Bu nedenle piezoelektrik özelliğe sahip başka seramiklere de ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan araştırmalar neticesinde kurşun titanat/zirkonat sisteminde piezoelektrik özellik bulunmuştur. PZT olarak adlandırılan bu yeni materyal baryum titanat'tan daha çok tercih edilmektedir. Kolay sinterlenebilmesi, çeşitli kompozisyonlar içerisinde diğer bileşiklerle uyumlu olması, piezoelektrik özelliğinin baryum titanat'tan daha yüksek olması ve ondan daha dayanıklı güçlü olması sebebiyle tercih edilmektedir[15].

Modifiye kurşun zirkonat/titanat(PZT) ve baryum titanat bazlı geniş bir piezoelektrik seramik malzemesi seçeneği vardır. Yumuşak ve sert piezo seramik olmalarına, dipollerin veya alanların hareketliliğine, dolayısıyla polarizasyon ve depolarizasyon davranışlarına göre farklı uygulamalarda kullanılabilirler. Aktüatör uygulamaları için düşük polariteli ters alan kuvvetlerine sahip yumuşak piezoelektrik seramikler tercih edilir. Sert PZT malzemeleri ise öncelikle yüksek güçlü akustik uygulamalarda kullanılır. Buna ek olarak özellikle ultrasonik transdüserler (enerji çeviriciler) olarak kurşunsuz piezoseramikler bir aktüatör malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yumuşak piezoelektrik malzemeler, piezo aktüatörler ve sensörler için idealdir. Ferroelektrik olarak yumuşak piezoseramik malzemeler nispeten düşük alan kuvvetlerinde bile oldukça kolay polarize edilebilir. Bunun nedeni kendileri için tipik olarak kabul edilen yüksek alan hareketliliğidir. Yumuşak PZT malzemelerin avantajları, büyük piezoelektrik yük katsayısı, orta titreşimlilik ve yüksek bağlaşım faktörleridir. Yumuşak piezoelektrik seramikler mikro konumlandırma ve nanopozisyon için aktüatörler için önemli elemanlardır. Bunlar dışında geleneksel titreşim dedektörlerinde, akış veya seviye ölçüm için kullanılan ultrasonik sensörlerde, nesne tanımlama veya izlemede, elektro-akustik uygulamalar için ses transdüserlerinde ve mikrofonlarda yumuşak piezoelektrik malzemeler kullanılabilirler[12].

Sert PZT malzemeler yüksek elektriksel ve mekanik gerilime maruz kalabilirler. Bu koşullar altında özellikleri değişmez. Bu malzemelerin avantajları büyük piezoelektrik bağlama faktörleri, yüksek mekanik özellikler, yüksek mekanik yükler ve çalışma alanı

kuvvetleri altında çok iyi çalışabilmeleridir. Düşük dielektrik kayıpları, rezonans modunda bileşenin yalnızca içten düşük ısıtılmasıyla sürekli kullanımını kolaylaştırır. Uygulama alanı olarak ultrasonik dönüşüm cihazlarında yüksek performans gösteren malzemelerdir. Ayrıca yüksek güçlü akustik uygulamalar sert piezoelektrik malzemelerin özelliklerinden yararlanılmaktadır. Uygulama alanlarına örnek olarak, ultrasonik temizleme (tipik olarak kHz frekans aralığı içinde), malzemelerin işlenmesi (ultrasonik kaynak, yapıştırma, delme vb.), ultrasonik işlemciler (sıvı ortamları dağıtmak için), tıbbi sektör (ultrasonik tartar çıkarma, cerrahi aletler) ve sonar teknolojisinde sert PZT piezoelektrik seramiklerden faydalanılmaktadır[12]. Sert ve yumuşak piezoelektrik malzeme örneklerine ait görseller Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1. 1. Yumuşak ve sert piezoelektrik malzemeler[12].

#### 1.4. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları

Bu bölümde piezoelektrik malzemeler kullanılarak imal edilen veya imal edilebilecek cihaz ve sistemleri detaylı olarak tanıtılacaktır.

##### 1.4.1. Elektrik Üretimi

Piezoelektrik malzemeler, mekanik titreşimlerin elektrik dalgasına veya elektrik dalgalarının mekanik titreşimlere çevrildiği elektromanyetik çeviricilerde kullanılmaktadır. Son yılların önemli buluşlarından olan tarama problu mikroskoplardan olan TTM’de uç boyutta devinimini sağlayan en önemli parçalarını piezoelektrik seramikler oluşturmaktadır. Ayrıca radyo vericilerinin frekans kontrollerinde, telefon iletişimindeki dalga filtrelerinde, kristal mikrofonlarda, gemilerde derinlik ve hedef

bulmaya yarayan sonar cihazlarında kullanılmaktadır. Hırsız alarmı olarak kullanılan ultrasonik ses üreteçleri ve ultrasonik cihazlarda, otomatik kapı açıcıları ve uzaktan kumanda araçları gibi birçok uygulamada piezoelektrik malzeme kullanılmaktadır. Bu çalışmanın esası olan piezoelektrik malzemelerden elektrik üretimi konusunda da birçok çalışmalar yapılmaktadır[16]. Havacılık sanayinde Airbus, Rolls-Royce, EADS ve Thales gibi Avrupa'nın önde gelen firmaları destek verdiği "Clean Sky" projesinde piezoelektrik üreteçlerden faydalanılmaktadır. Yerli havacılık sanayinde çalışan mühendislerimizin de üniversitelerle ortak yürüttüğü projelerle hava araçlarında piezoelektrik malzemelerden elektrik üretme çalışmaları vardır[17]. Vücuda giyilebilen elbise türevi cihazlarla veya ayakkabı tabanına yerleştirilerek yapılan uygulamada, hareket ettikçe uygulanan basınç neticesinde elektrik üretimi başarılmıştır[18]. Benzer uygulamalar yayaların veya araçların geçtiği zeminlere piezoelektrik malzemeler döşenerek de yapılabilir ve başarılı sonuçlar elde edilecektir. Ayrıca insan vücudundaki hareketli eklemlere dışarıdan veya implant şeklinde konumlandırılarak yapılan çalışmalar da vardır.

#### **1.4.2. Ölçüm İşlemleri**

Piezoseramik bileşenler, algılama görevlerinde ultrasonik sensör olarak kullanılabilir. Ultrasonik sensörler insanın işitme eşiği aşan yüksek frekanslı ses gönderir ve nesnelere üzerinde yansıyan sinyalleri alır. Yankı sinyallerinin gidiş dönüşü esnasında geçen süre elektronik olarak işlenir ve metrolojide farklı uygulamalar için kullanılabilir. Piezoseramik bileşenler ile temassız ölçüm işlemleri yani hava ultrasonu için de kullanılabilirler. Hava ultrasonu için ultrasonik sensörler, piezoseramik disklerin veya plakaların radyal titreşimini mesafe veya konum ölçmek için kullanılır. Ayrıca ultrason ile yayılma zamanı ölçümü de yapılabilir. Ölçüm metodu, yayılım süresi ölçümü prensibine dayanır. Kullanılan ultrasonik sensörler kısa aralıklarla yüksek frekanslı akustik darbeler göndererek çalışırlar. 40-500kHz ses dalgası havada taşınır ve nesnelere yansır. Gönderilen ile yansıyan sinyali alma arasındaki yayılma süresinin ölçümü, cismin uzaklığının elektronik olarak ölçülmesini sağlar. Hava ultrasonu konteynerlerdeki seviye ölçümlerinde, tahıl asansörlerinde, test tüplerinde, ambalaj endüstrisindeki mesafe ve konum ölçümlerinde, otomobillerde park mesafesi kontrolünde ve güvenlik endüstrisinde nesne gözlemine kadar geniş bir uygulama

yelpazesinde kullanılabilirler. Piezoelektrik sensörler kullanılarak, siloların içindeki sıvı veya katı maddelerin temassız seviye ölçümleri yapılabilir.

Piezoseramik sensörler kullanılarak elde edilen ultrasonik güç vasıtası ile gaz kabarcıkları tespiti yapılabilir. Dışarıdan hava ya da gaz girişi olmayan ortamlarda genellikle sürekli bir akış gereklidir. Dozlama, dolum sistemleri ve tıbbi uygulamalarda köpük veya kabarcık tespiti için ultrasonik geçiş süresi ölçüm teknikleri piezoelektrik sensörlerle yapılabilirler. Bu işlem sürekli devam eden akışlarda akış yönüne karşı ultrasonik darbelerin karşılıklı iletim ve alımı prensibine dayanır. Sensor sürekli bir kalite kontrolü sağlar. Böylece temas olmadan sıvı içindeki hava ya da gaz kabarcıkları algılanır.

Medikal, eczacılık ve gıda işleme gibi tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda, piezoelektrik ultrason teknolojisi kullanılmaktadır. Bu sensörler diyaliz makineleri, infüzyon pompaları veya transfüzyon(kan alış verişi) izlemek için kullanılır. Hava kabarcığı dedektörleri, kalp ve akciğer makinelerinde kabarcıksız akış sağlamak için kullanılır. Manyetik rezonans(salınım) görüntüleme alanında, endüstriyel uygulamalardaki dozajlama ve dolum sistemleri için kontrol ve düzenleme işlemlerinde piezoelektrik teknolojilerden faydalanılır.

Metrolojide piezoseramik kuvvet sensörleri kullanılmaktadır. Kuvvet veya ivme sensörünün merkez kısmı sismik kütleyle bağlı piezoelektrik seramikten yapılmış bir diskidir. Sistem komple hızlandırılmışsa, bu kütle piezoseramik diskin mekanik deformasyonunu artırır ve böylece ölçülebilir gerilimi artar. Sensörler geniş bir frekansta ve dinamik aralıkta farklı ivmeleri algılayarak, tüm ölçüm aralığı boyunca neredeyse doğrusal bir yanıt sergilerler. Piezoseramik kuvvet sensörleri, dinamik gerilme, sıkıştırma ve kesme kuvvetlerinin ölçümü için uygundur. Çok yüksek sertlikte tasarlanabilirler ve son derece dinamik kuvvetleri de ölçebilirler. Çok yüksek çözünürlüklere sahiptirler. Buna ek olarak piezoseramik bileşenler dönen makine parçalarındaki titreşimleri yani makinenin yere düzgün basıp basmadığını, doğru çalışıp çalışmadığını anlamak için kullanılır. Otomotiv sektöründeki çarpışma testleri yapılırken kaza detektörlerinde dengesizlikleri tespit etmek için titreşim detektörü olarak kullanılırlar.

Dolum seviyeleri, dalgıç dönüştürücüler veya çatal ayar sensörleri kullanılarak da ölçülebilir. Bu yöntemde piezoseramik elemanları seviye anahtarı olarak kullanılmaktadır. Ölçüm yapılacak kabın farklı seviyelerine bu elemanlar yerleştirilirler. Piezoseramik dönüştürücüler, ölçülecek ortama temas ettiğinde rezonans frekansı kayar. Bu sayede ölçüm seviyesi tespit edilmiş olur. Bu yöntem çok güvenilirdir ve dolum ortamının türüne bağlı değildir.

Kontaksız ultrasonik akış ölçümünde piezoseramik debi sensörleri ile de akış ölçümü yapılmaktadır. Birçok alanda akış hızının ölçülmesi ve kontrol süreçleri çok önemlidir. Modern bina hizmetlerinde su, sıcak su veya ısıtma enerjisi tüketimi kayıt altına alınır. Böylece hem arz hem de fatura kontrol edilir. Kontaksız ultrasonik akış hızı ölçümünde iki temel ölçme işlemi vardır. Bunlar yayılma zamanı ölçümü ve doppler prensibi olarak adlandırılır. Yayılma süresi ölçümü iletim ve akış yönüne karşı ultrasonik darbelerin alınmasına dayanmaktadır. İki piezoseramik dönüştürücü hem verici hem de alıcı olarak çalışır. Akustik bir yoldaki akış yönüne çapraz olarak düzenlenmiştir. Doppler prensibinde ise sıvı parçacıklar tarafından yansıtılan ultrasonik dalgaların faz ve frekans kaymaları değerlendirilir. Aynı piezoseramik dönüştürücü tarafından yayılan, alınan ve yansıyan dalga perdesi arasındaki frekans kayması sayesinde akış hızı belirlenir. Piezoseramik sensorlar akış hızının ölçümünü yapabildiği gibi bazı maddelerin konsantrasyonunun tespitini de yapılabilir. Endüstriyel otomasyonda, özellikle kimya endüstrisinde hacim ölçümü madde miktarlarının ağırlığının ölçülmesinin yerini alabilir.

Araçlarda park mesafe kontrolünü sağlamak için ultrasonik yakınlık sensörleri kullanılır. Otomobillerdeki aktif park uzaklığı kontrolleri ve çevreye olan mesafeyi belirlemek için genellikle ultrasonik sensörleri kullanır. Bu amaçla ultrasonik sinyaller gönderilir ve alınırlar. Elde edilen verileri kontrol ünitesine gönderen birkaç ultrasonik piezoseramik dönüştürücü sensör ile engel arasındaki mesafeyi ultrasonik sinyalin yayılma zamanına göre hesaplar. Algılayıcıların sayısı ne kadar yüksek olursa, ölçüm sonucu o kadar hassas ve güvenilir olur[19]. Bu sensörler aracı kullanan sürücünün görmediği noktalardaki cisimleri algılayarak kazaları ve maddi hasarları önlemektedir. Özellikle geri giderek yapılan park manevralarında aniden aracın arkasından geçen yayaları tespit etmek için çok önemlidir. Bu durum can güvenliği açısından çok önemlidir. Bu sensörler sürüş güvenliğini artırırken, ilerleyen dönemlerde otonom sürüşe katkı sağlayacak önemli bir özelliktir.

### 1.4.3. Güç Ultrasonu Uygulamaları

Piezoseramikler güç ultrason frekans aralığında (20-800kHz) ultrasonik dalgalar oluşturmak için kullanılabilir. Bu işlemler tartar çıkarma veya litotripsi(böbrek taşı kırma) gibi farklı teşhis ve tedavi uygulamalarında kullanılabilirler. Yüksek güç ultrason yöntemi ile endüstriyel ultrasonik temizleme işlemleri de yapılabilir. Mikro seviyede temizleme sistemlerinde temizlenecek olan yüzey üzerinde en küçük yapılara bile zarar vermemek zor bir iştir. Ultrasonik sistemler, 700kHz ile 3MHz arasında çalışma frekanslarına uygundur. Bu sistemlerle kir parçacıklarını temizleme işlemi, çok yüksek basınç ya da çok yüksek sıcaklıkla zarar görebilecek hassas yüzeylere zarar vermeden nanometre aralığında güvenilir şekilde uygulanabilir. Ultrasonik temizleme sistemi temel olarak üç bileşenden oluşur: Elektronik ultrasonik jeneratör, temizlik ihtiyacına uygun olarak seçilebilecek ultrasonik bir piezoseramik osilatör ve uygun bir temizleme sıvısı. Çalışma prensibi olarak ultrasonik jeneratör, dönüştürücünün çalışma frekansına karşılık gelen bir frekansta(50-60Hz) verilen alternatif voltajı dönüştürür. Dönüştürücü daha sonra çevredeki sıvı salınmasına neden olan mekanik akustik salınımları elektrik enerjisine dönüştürür. Her salınım, dönüştürücüde genişleme veya daralmaya neden olur. Bu durum akışkan içinde aşırı basınçlı faz veya alçak basınçlı faz meydana getirir. Sıvının çok düşük bir çekme gücü olması nedeniyle düşük basınç aşamasında küçük boşluklar sıvı içinde meydana gelirler. Bu kavitasyon kabarcıkları aşırı basınç aşamasında çöker. Kavitasyon kabarcıkları temizlenecek yüzeyde çöker ve kir parçacıklarının çıkarılmasını sağlar.

Piezoseramik motorlar doğrudan tahrikle çalışırlar. Debriyaj veya dişli gibi klasik motordaki mil tabanlı tahrik sistemlerinin, mekanik bileşenlerinin olması maliyet ve güvenilirlik açısından zayıf yönleridir. Bu bileşenler özellikle minyatür sistemlerdeki aşınmaya karşı oldukça hassastırlar. Ultrasonik piezomotorlar ise bir kuplaj elemanı vasıtasıyla hareket ettirebilirler. Önceden gerilmiş bir piezoseramik aktüatör, start motoru vardır. Bu aktüatör yüksek frekanslı salınımlarla hareket eder. Bu tahrik prensibi son derece dinamik bir başlatma ve durma davranışı sergiler. Birkaç dakikada 100mm/s hıza ulaşabilir. Piezoseramik aktüatörler durağan haldeyken ve güç düştüğünde sürücünün kendi kendine kilitlenmesini sağlar. Sonuçta güç tüketmez, ısınmaz ve konumu mekanik olarak sabit tutar. Akü tarafından çalıştırılan veya ısıya duyarlı düşük çalışma devirlerine sahip uygulamalarda bu piezoseramik aktüatörlerden yararlanılır.

Ters piezoelektrik etki ile böbrek taşlarının kırılması sağlanır. Ekstrakorporal şok dalga litotripsi(ESWL) veya kontaklı böbrek taşının parçalanması yönteminde, saniyede birkaç milyon kez tekrarlanabilen kısa akustik şok dalgaları ile böbrek taşlarının parçalanması sağlanır. Çalışma şekli bir taraftaki akustik sınır katmanlarına kuvvet uygulamak üzerine kurulmuştur. Öte yandan kavitasyon dokuda oluşur ve sekonder efektle sınır tabakalarında yerel olarak sınırlı gerilme ile sonuçlanır. Bütün bu kuvvetler birleştiğinde böbrek taşları gibi gevrek malzemelerin tahrip edilmesini sağlar. Yüksek enerjili şok dalgaları(ESWT) kemik ve eklem hasarı ile iltihaplarının tedavisi gibi ortopedik uygulamalarda kullanılabilir. Burada şok dalgaları iyileşme sürecinde uyarıcı etkilere sahiptir. Şok dalgalarını üretmek için piezoelektrik elemanlar kullanılır. Yönlendirilmiş bir dalga oluşturmak için birçok piezoseramik eleman küresel bir kapak üzerine yerleştirilir ve eş zamanlı olarak uyarılır. Bu sayede 100MPa'yakadar basınç genlikleri, tam olarak sınırlı bir alan üzerine uygulanabilir. Bu sistemler düşük enerji aralığında bile yüksek tekrarlanabilirlik ve iyi ölçüm kapasitesine sahiptir.

Sonar teknolojisi ve hidroakustik sistemlerde piezoseramik bileşenler özellikle deniz uygulamaları için ölçüm ve pozisyon bulma görevlerinde kullanılırlar. Askeri uygulamalar için geliştirilen yüksek çözünürlüklü sonar sistemleri artık sivil uygulamalarda da kullanılmaktadır. Hâlâ kullanılan denizaltı konumlandırma sonarlarının yanı sıra derinlik ölçümleri, balık sürülerinin yerini belirleme, sığ sularda yüzey altı ölçümü veya sualtı iletişimi için piezoseramik bileşenler kullanılmaktadır. Çok çeşitli piezoseramikler kullanılarak imal edilen basit disk veya plakalar sayesinde transdüserlerden oluşan sonar dizileri ile ultrasonik dalganın doğrusal bir yön izlemesini sağlayan farklı uygulamalar vardır[19].

#### **1.4.4. Bilimsel Çalışmalarda Kullanımları**

Piezoseramik bileşenler modern bilimlerde sürücü veya ultrasonik dönüştürücü olarak güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır. Uzay çalışmalarında, laboratuvarlarda ve sinkrotronlar (parçacık hızlandırıcılar) gibi büyük ölçekli araştırma tesislerindeki birçok uygulamada piezoseramikler kullanılmaktadırlar. Bu uygulamalar sayesinde piezoseramik malzemelerin manyetik alanlar, kriyojenik(çok düşük sıcaklıklarda) ortamlarda veya ultra yüksek vakum gibi aşırı koşullar altında bile güvenilir şekilde

çalıştıkları kanıtlanmıştır. Ayrıca piezoseramik komponentlerin bulunduğu sürücüler endüstride yüksek hassasiyetli ölçüm ve test sistemlerinde kullanılırlar.

Atomik kuvvet mikroskobu(AFM) kullanılan piezoseramik bileşenler alt nanometre aralığına kadar çözünürlükte topografik görüntülere izin verir. AFM yönteminde ölçüm ucu tanımlanmış bir yörüngede numune yüzey çizgisi boyunca taşınır. Çok ince bir ölçüm ucuyla nesnenin yüzeyi arasındaki kuvvetleri ölçer. Bunu yaparken pikometre aralığına kadar yanal çözünürlük kapasitesinde yüzeyin topografyası hakkında bilgi verir. Ek olarak yapışma, sertlik ve viskozite gibi başka numune özelliklerini de belirleyebilir. Bir konsol ve gerçek AFM ucu içeren tarama elemanı, piezoseramik tüp aktüatörleriyle son derece dinamik bir şekilde hareket ettirilir. Piezoseramik tüp aktüatörler X, Y ve Z hareketi için geleneksel tripod mimarisinin yerine geçer. Bu piezoseramik tarama tüplerinin yüksek hareket kabiliyeti karar verme açısından çok büyük avantajdır. Hareketleri katı hal etkilerine dayandığından birkaç mikrosaniyelik yanıt sürelerinde, birkaç pikometrenin altında bir konum çözünürlüğü elde edebilirler. Yer değiştirme çözünürlükleri birkaç mikron arasında değişmektedir. Atom kuvvet mikroskobunun temassız modunda(nc-AFM) gerçekleştirilen dinamik çalışmalar için diskler veya plakalar gibi piezoseramik elemanlar, ölçme ucunda dinamik titreşime neden olmak için konsola iliştilirler. AFM ucu yüzeyden birkaç nanometre yukarıda kalır ancak dokunmaz. Bu yöntem atomik yapıların bile resimlerini oluşturmak için kullanılabilir. DESY(German Electron Synchrotron)'daki parçacık hızlandırıcısı XEFL, rezonatörler(ses ayarlayıcıları) veya boşluklar olarak adlandırılan süper-iletken ivme yapılarına dayalı ivme teknolojisini kullanmaktadır. Doğrusal çarpıcı TESLA(Tera Elektron Volt Enerjisi Süper İletken Doğrusal Hızlandırıcı) için geliştirilen bu teknoloji çok küçük bir giriş kesitine ve yüksek ışık enerjisine sahip bir parçacık demetinin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bir diğer önemli faktör ise ivme alanının gücünü sürekli olarak yüksek seviyede tutmaktır. Çok tabakalı piezoseramik aktüatörler rezonatörün dış duvarında yaklaşık 4Kelvin'de doğrudan çalışırlar. Bu sıcaklıklarda aktüatör yer değiştirmesi oda sıcaklığından daha düşüktür. Radyasyona maruz kalan bu kriyojenik ortamda aktüatörler yaklaşık 20 yıllık uzun bir kullanım süresi boyunca çalıştırılabilirler. Uzun süreler boyunca, sık tekrarlanan periyotlarda güvenilir ölçümler yapabilmek, bu tür çok yüksek maliyetli projeler için aranan olmazsa olmaz çok önemli bir özelliktir.

NASA, Mars araştırmalarında kullanacağı cihazlarda piezoseramikleri kullanmaktadır. Piezoseramik aktüatörler NASA uzay görevinde kullanılmadan önce kapsamlı yeterlilik testlerinden geçmektedir. Özellikle kullanım süresi test edilmiştir. Bu aşamada piezoseramik malzemeler testlerden 100 milyar( $10^{11}$ ) devir performansında özelliklerinden hiç bir şey kaybetmeden geçebilmişlerdir. Bu performans Mars kullanım için onaylanmış bir ömürdür. Farklı ölçümleri yapacak olan sensörler, kimyasal ve mineralojik testleri Mars kayaları üzerinde yürütmektedir. Uygun kaya örnekleri tedarik etmek için de önce kaya tozu sıralanmalıdır. Bu amaca uygun olarak tozdan homojen parçacık boyutları elde etmek veya yoğunluğa göre bir ayırma elde etmek için 0.9-2.2kHz aralığında farklı genliklerde ve frekanslarda çalkalanırlar. Bu işlem çok tabakalı piezoseramik aktüatörler tarafından yapılır. Belli bir frekansta malzeme seçimi ve beslemesi için gerekli salınımları gerçekleştirirler. Çok tabakalı piezoseramik aktüatörler seramik yalıtımlarıyla alan koşullarında mutlak sıfır ve aşırı vakum altında ideal bir şekilde çalışmaya uygundur. Böyle bir ortamda güvenilirlikleri büyük ölçüde bozabilecek sentetik materyaller kullanılamazlar. Bu sentetik malzemeler çok uzun sürelerde hassas ve tekrarlanabilir ölçümler için uygun değildirler. Bu nedenle bu malzemelerin yerine piezoseramik malzemeler tercih edilmektedirler[19].

#### **1.4.5. Pompalama ve Dozajlama İşlemleri**

Piezoseramik elemanları küçük sıvı veya gaz hacimlerini birkaç yüz mililitreden, birkaç nanolitreye kadar güvenilir ve hassas bir şekilde pompalamakta ve ölçmektedir. Membran veya peristaltik hortum pompaları gibi farklı pompa türleri, farklı tahrik ilkeleri ile harekete geçirilirler. Piezoseramik elemanlar mobil araçlardaki küçük laboratuvar uygulamalarında mükemmel bir şekilde kullanılabilirler. Nanolitre veya pikolitre ölçme aygıtları için kullanılan sürücüler, birkaç kHz'e kadar yüksek çalışma frekanslarında çalışmalı ve aynı zamanda damlama, nebulizasyon veya uydu oluşumu olmaksızın küçük damlacıklar oluşturmak için gereken kinetik enerjiyi üretebilmelidirler. Piezoseramik valfleri bunun için çok uygundur. Valfler doğrudan değiştirebilirler ve hacim değişimlerini kapanma yayı veya esnek boruya karşı bile tespit edebilirler. Son derece gelişmiş mikrometreleme teknolojisinde de piezoelektrik malzemeler kullanılabilirler. Ölçüm görevleri sadece geleneksel diyaframlı pompalar ile gerçekleştirilemez. Piezoseramik mikrovalfler yüksek kuvvet gerektiren, viskoz sıvıların ölçülmesi gerektiğinde tercih edilen bir çözümdür. Damlacık boyutuna ve

gerekli diyafram yer değiştirmesine bağlı olarak, doğrudan piezoseramik aktüatörler veya kaldıraçlı sistemler kullanılabilirler.

Piezoseramik mikro-dispenserler(dağıtıcılar) mililitre veya mikrolitre gibi küçük hacimlerin kontrol edilmesi gerektiği zamanlarda dağıtım ve ölçüm görevleri için kullanılabilirler. Günümüzde mikrolitre veya nanolitre aralığındaki hacimlerde ince damlacıklar üreten prosesler, genellikle temassız olarak çalışmaktadır. Diğer bir deyişle damlacıklar şekillerini kaybetmeden bir altlıktan çıkmakta ve daha sonra alt katman üzerinde çarpmaktadır. Bu tarz uygulamalar profesyonel geniş formatlı yazıcılarda büyük bir pazar olan injet teknolojisinde kullanılmaktadırlar. Yüksek kaliteli mürekkepler tek tek noktalar üretmek için püskürtücülerden kâğıda 1-100pikolitre arasında tanımlanmış hacim damlaları olarak gönderilirler. Endüstriyel üretimlerde yarı iletken çiplerin ambalajlanması ve monte edilmesinde, ayrıca baskılı devre kartlarının(PCB) imalatında tam ölçülü damlacıklara dayanan teknikler kullanılmaktadır.

Biyoteknoloji, tıbbi teknoloji ve teşhis konusundaki nanolitre seviyesindeki ölçümler oldukça karmaşık sistemlerdir. Farklı özelliklere sahip pek çok sıvı, mikroarray uygulamalarında, laboratuvar test sistemlerinin üretiminde ve aktif maddelerin araştırılmasında hassas dozlarda kullanılmaktadırlar. Bu tür ortamlarda bir yandan da çapraz bulaşmanın önlenmesi gerekmektedir. Öte yandan kullanılan teknoloji ortamın viskozitesi, yüzey gerilimi ve dozlama hızı dikkate alınarak mükemmel damlacıklar üretebilmelidir. Örneğin ilaç taramasında güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçların elde edilmesi için darbe veya damlama ile buğulanma ve uydu oluşumu önlenmelidir. Tüm bu hassas işlemler için piezoseramikler en uygun materyallerdir.

Ultrasonik piezoseramik dönüştürücülerle homojen aerosol üretimi yapılmaktadır. Solunum sistemi hastalıklarının tedavisinde genellikle ilaçların doğrudan ultrasonik nebulizatörler vasıtasıyla uygulanması gerekir. Geleneksel olarak basınçlı hava, inhalasyon solüsyonunu küçük damlacıklara atomize eder. Alternatif bir yöntem olarak piezoseramik teknolojisi yardımı ile minik damlacıklar üretilebilmektedir. Piezoseramiklerden özel olarak şekillendirilmiş diskler ultrasonik transdüserler gibi davranırlar ve100kHz'den daha fazla frekansta birkaç bin delik bulunan paslanmaz çelik bir diyaframı titreşimlerle harekete geçirirler. Bu özellikle homojen aerosoller üretmek

için kullanılır ve hassas dozajlama için oldukça avantajlıdır. Yüksek kaliteli ilaçların üretiminde bu yöntem kullanılabilir. Bu sayede oluşabilecek yan etkiler de azalır. Ayrıca piezoseramik teknolojisi geleneksel sistemlere kıyasla ilaçların atomize edilmesi için gereken zamanı%50'ye kadar düşürür. Bu da özellikle kronik solunum yolu hastalığı olan hastalarda yaşam kalitesinde bir artış anlamına gelmektedir. Bu durum hastanın günlük yaşamındaki aktivitelere de olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

Tıp mühendisliği uygulamaları ile gelen özel hijyen şartları bile piezoseramikler tarafından sağlanmaktadır. Aerosol jeneratörlerinin profesyonel sterilizasyonu için piezoseramik güç ultrasonu uygulanır. Ultrasonik işlemler insanlar için gürültülü olsa da piezoseramik bileşenlerinin düşük güç tüketimi bu uygulamanın pille bile yapılabilmesine izin verir.

Mikrodiyaframlı pompalar için sürekli akış ve değişken akış oranları sağlayabilen kompakt sürücüler gerekmektedir. Küçük hacimler nedeniyle pompalama çevrimi başına yüksek akış hızlarını elde etmek için 10kHz'e kadar devir oranı gerekir. Bir mikrodiyaframlı pompa, piezoseramik çalıştırıcıyla birlikte pompa tahrikini oluşturan bir valf ünitesi ve pompa diyaframı içerir. Ölçülen miktarlar mili, mikro, nano ve pikolitre aralığında olabilirler. Piezoseramik mikro pompalar minik miktarda sıvı ve gazın güvenilir bir şekilde ölçülmesini gerektiren laboratuvar ortamları, tıbbi teknolojiler, biyoteknoloji, kimyasal analizler ve proses mühendisliği gibi alanlarda kullanılırlar. Mikrodizrak pompaları ve mikrometrik vanalarda ise disk şeklindeki piezoseramik aktüatörlere diyafram direk olarak saptırmak için monte edilebilirler. Bir diyafram veya bir piston, doğrudan bir piezoseramik çalıştırıcıya bağlanırsa daha büyük çarpmalar ve kuvvetler elde edilebilirler. Kompakt boyutları ve düşük enerji gereksinimleri nedeniyle bu ölçüm cihazları laboratuvar uygulamaları için uygundur. Piezoseramik sürücüler valflerin açılıp kapatılması için de kullanılabilirler. Bu uygulamalardaki piezoseramik ürünler, diyafram valfleri, bükme aktüatörleri, büyük dinamikler ve kuvvetler için önceden yüklenmiş piezoseramik istifli aktüatörler ve yüksek geri basınçlı çok hassas ölçmeyi gerçekleştiren piezoseramik kollar olarak sıralanabilirler. Otomotiv endüstrisinde kullanılan yakıt enjeksiyon sistemlerindeki mikro ölçme valflerinde de çok katmanlı piezoseramik aktüatörler kullanılabilmektedirler.

Sıvılar veya gazlar düzgün bir şekilde ölçüleceği zaman ve mümkün olduğunca az titreşimli pompalar kullanmak gerekir. Bu tip pompalarda hortumun harici mekanik deformasyon istenmez. Pompa yönü aktüatörlerin kontrolü ile belirlenir. Tahrik elemanı güç ve boyut gereksinimlerine bağlı olarak düşük profilli piezoseramik bükme elemanlarından, kompakt piezoseramik aktüatörlerinden veya piezoseramik istifli aktüatörlerden seçilebilir. Bükme aktüatörleri ağırlıklı olarak düşük geri basınçlı uygulamalarda kullanılır. Düşük viskoziteli sıvıların yapıları yapılan işlemler buna örnek olarak verilebilir.

Tıbbi teknolojiler hızlı, güvenilir ve enerji tasarruflu olması gereken sürücü bileşenleri gerektirir. Bu alanlarda ilerleme mini cihazların artması ile mümkündür. Piezoseramik sürücüler tam olarak bu özellikleri taşır. Kullanılan piezoseramik komponentler ve aktüatörler uygulamalara göre farklılık gösterebilir. Basit diskleri kullanan ultrasonik uygulamalar kozmetikte, tıbbi diş temizliğinde ve ölçme görevlerinde kullanılmaktadır. Mobil tıbbi cihazlarda kullanılan uygulamalar ise bir hastanın yaşam kalitesini belirgin bir şekilde iyileştirebilir. Özellikle vücuda yerleştirilen sistemler neredeyse görünmezdir. Bu tip implante edilebilen tıbbi cihazların uygulama alanları olarak ilaç ölçen pompalardan işleme sistemlerine kadar birçok uygulama sayılabilir. Hepsinin ortak noktası düşük enerji tüketen minik sürücüler kullanmalarıdır. Çok katmanlı piezoseramik aktüatörler, özellikle de bender aktüatörler, implante edilebilir tıbbi ürünler için son derece uygundur. Çünkü bunlar son derece kompakt boyutlarda üretilebilirler.

Modern endüstride uyarlamalı sistemlerin geliştirilmesi giderek daha da önem kazanmaktadır. Algılayıcı ve aktüatör özelliklerine sahip akıllı malzemeler bunlardandır. Bu malzemelerin darbe, basınç ve eğilme yükleri gibi değişen çevresel koşullarını algılayıp ona göre tepki vermeleri gerekir. Piezoseramikleri bu adaptif materyal grubuna aittir. Yüksek frekanslı titreşimleri izlemek ve sönümlemek için kullanılabilirler. Piezoseramik çok amaçlı DuraAct Yama Dönüştürücüler bunlardan biridir. Bunlar elektriksel teması sağlamak için elektrik iletken materyal ile kaplanmış ve daha sonra sünek bir polimer kompozit içine gömülü ince bir piezoseramik film üzerine kuruludur. Normal olarak kırılabilir piezoseramik elemanlar bu sayede mekanik olarak önceden yüklenir ve elektrik yalıtımı yapılır. Daha sonra sadece birkaç milimetrelik eğilme ile bile kavisli yüzeylere uygulanabilirler. Dönüştürücüler,

bileşenin kendisinde titreşimler veya kontur deformasyonları tespit edebilirler. Üretim esnasında ilgili alt tabakaya yapıştırabilir veya farklı bir yapıya entegre edilebilirler. Kontur değişiminin derecesi substrat özelliklerine ve nanometreden milimetre aralığına kadar değişen oranlara bağlıdır. Dinamik strese maruz kaldığında dahi bu tasarım yüksek hasar toleransı, güvenilirlik ve  $10^9$  devrinden daha uzun ömür sağlar. Transdüserler ve katı hal aktüatörler herhangi bir hareketli parça içermediğinden, aşınma ve kusurlara karşı dayanımları yüksektir[19].

### 1.5. Literatür Çalışması

Literatür taraması yapılırken bu çalışmanın temeli olan enerji üretiminden, dolayısıyla enerji ihtiyacından yola çıkılmıştır. Enerji kaynakları tükenir ve yenilenebilir olmak olarak 2 sınıfa ayrılabilir. Kömür, petrol, doğalgaz gibi enerji kaynakları tükenir enerji olarak sayılırken; jeotermal, biyomas, rüzgâr, güneş ve gel-git enerjisi gibi kaynaklar yenilebilir enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır[20]. Yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının olumlu ve olumsuz yönleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda, yenilenemeyen kaynakların çevreye verdiği zararlar ve yenilebilir kaynakları kullanmanın gelişmiş ülkelerin ekonomisine verdiği katkılar göz önüne alındığında, yenilenebilir kaynaklara yönelmesinin gerekliliği ortaya konulmuştur[21]. Türkiye ekonomisi ve yenilenebilir enerji projeleri üzerine de çalışmalar yürütülmektedir[22]. Ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar rüzgâr ve güneş enerjisi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada da rüzgâr enerjisinden elektrik üretmek üzerinde alternatif bir yöntemden bahsedildiği için literatür taramasında da rüzgar enerjisi üzerine yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak incelenmiştir. Rüzgâr enerjisi üzerine yapılan çalışmalarda, rüzgâr enerjisinin çevresel etkileri[3,4], Türkiye’de rüzgâr enerjisindeki mevcut durum[2], maliyet analizleri ve teşvikler[5], rüzgâr enerjisinden elde edilen verimleri artırmak için rüzgâr ölçümlerinde yapılması gerekenler[23] ve rüzgâr türbinleri ile ilgili iyileştirmeler[6] üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Piezoelektrik malzemelerle ilgili literatür taraması yapılırken öncelikle piezoelektrik malzemelerin tarihçesi[9], çeşitli piezoelektrik malzemelerin üretim metodları [10,11,24], farklı tipteki piezoelektrik malzemelerin özellikleri[13-15] ve bu malzemelerin kullanım alanlarıyla[12,19,25,26] ilgili çalışmalar incelenmiştir. Kullanım

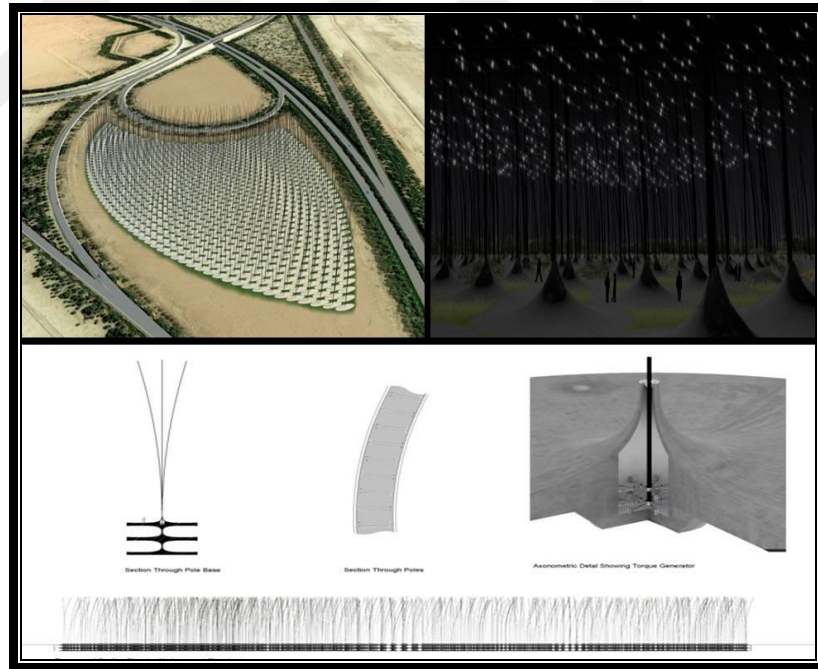
alanları farklılık gösterse de piezoelektrik malzemeler genel itibariyle sensör olarak veya ölçüm işlemlerinde kullanılmaktadırlar. Gelişen teknoloji ile daha düşük güç gereksinimi duyan cihazların çoğalması ve güç depolama elemanlarının geliştirilmesi ile piezoelektrik malzemelerin ürettiği düşük miktarlardaki elektrik güçlerinin bile kullanılabilmesi görülmüştür. Piezoelektrik malzemeleri kullanarak temel amacı elektrik üretmek olan bir projede ayakkabı tabanına yerleştirilen piezoseramik üreteçlerle elektrik üretimi planlanmıştır. Yürürken yapılan baskı sonucu elektrik üretmeyi amaçlayan bu çalışmada bir pili şarj etmeye yetecek kadar elektrik üretmek amaçlanmıştır[18]. Bu çalışma ile ilgili görsel Şekil 1. 2’de verilmiştir.



Şekil 1. 2. Ayakkabı tabanına yerleştirilen piezoelektrik malzemeler[18].

Bu çalışmaya esin kaynağı olan rüzgâr sapları(windstalk) adında bir proje ile bir şehrin enerji ihtiyacının bir kısmını karşılamak üzere piezoelektrik malzemeler kullanılacaktır. Bu projeyi, Birleşik Arap Emirlikleri 2006 yılında yapımına başladığı Abu Dabi yakınlarında Masdar City adını verdiği çevreci bir şehirde kurmayı planlamaktadır. Bu şehrin ilk bölümü 2015’te tamamı ise 2025 yılında bitirilecektir. Masdar Bilim ve Teknoloji Enstitüsü öncülüğünde ve Amerikan Massachusetts Institute of Science and Technology(MIT) katkılarıyla hazırlanan bu şehir, yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak kendi enerjisini üretecek ve hiçbir atık çıkarmayarak çevreyi kirletmeyecektir. Newyork ’daki Atailer DNA firması tarafından yapılan Windstalk Projesi,2010 yılında yapılan bir yarışmayı kazanarak bu çevreci şehir için kullanılacak enerji üretim yöntemlerinden biri olarak kabul edilmiştir[27]. Projede1203 tane direk belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Sap adı verilen bu direklerin yüksekliği55molup,alt tabanları 30cm çapında, üst kısımları ise 5cm çapındadır. 10-20m arasındaki beton

zemine sabitlenen bu saplar karbon fiber takviyeli reçineden yapılacaktır. Ayrıca direklerin üst kısmında üretilen elektriğe bağlı olarak yanan bir lamba bulunmaktadır. Sistemin çalışma prensibi şu şekildedir: Her bir sap piezoseramik disk yığınlarından oluşmuştur. Disklerin arasındaki elektrotlar tepeden tabana kadar kablolar ile birbirine bağlanacaktır. Rüzgâr direği salladığı zaman piezoseramik disk yığınları üzerinde sıkışıp gevşemeye bağlı olarak bir kuvvet oluşur. Oluşan bu kuvvetin yarattığı baskı ile piezoseramikler elektrik üretmiş olur ve elektrotlardan bir akım geçer. Beton tabanlıklarda tork jeneratörünü vardır. Bu jeneratör sallanan direkdeki oluşan kinetik enerjiyi, elektrik enerjisine akım üreten darbe emiciler sayesinde çevirir. Ayrıca sistemin kurulacağı bölgedeki iklim şartları ve su sıkıntısı da düşünülerek, sapların alt kısımları yağmur suyunu depolayacak şekilde tasarlanmıştır. Rüzgârın esmediği anlarda ise üst kısımda biriktirilen bu suyun aşağı doğru hareketi sağlanarak, enerji üretiminde devamlılık sağlamak amaçlanmıştır[28]. Projenin resmi Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1. 3. Abu Dabi’de planlanan Windstalk projesi[28].

Piezoelektrik malzemelerle sağlık alanında yapılan çalışmalarda ise vücudun hareketli kısımlarına yerleştirecek üreteçlerle kalp pili veya kullanılan farklı cihaz ya da protezler için gerekli enerji ihtiyacının karşılanmasına yönelik çalışmalar vardır. Bu tarz uygulamalar hastaların dışarıya bağımlı olmadan daha kaliteli bir yaşam sürdürebilmesi açısından çok önemli çalışmalardır.

## 2. BÖLÜM

### DENEYSEL YÖNTEM VE MATERYAL

#### 2.1. Giriş

Bu çalışmada piezoelektrik üreteçlerin rüzgâr salınımı altındaki elektrik üretme potansiyelleri incelenmiştir. Bunun için 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla üretilen bir prototip bölümümüz bünyesindeki rüzgâr tüneline test edilmiştir.

#### 2.2. Deneysel Yöntem

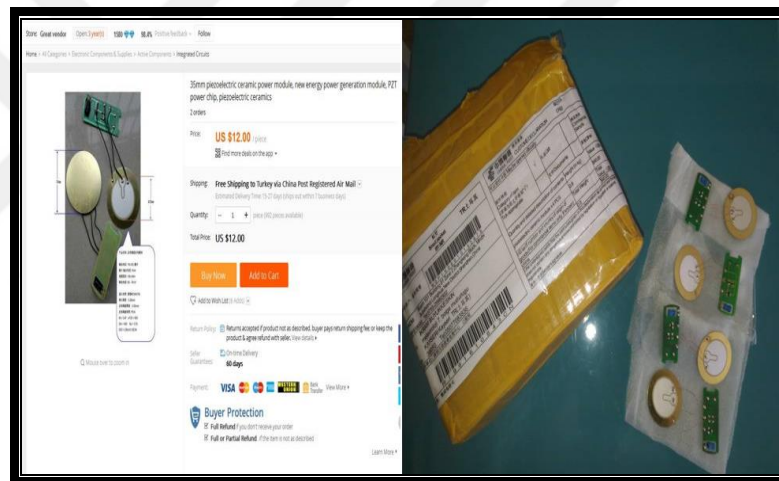
Bu çalışmada piezoelektrik üreteçlerin rüzgâr altında davranışları ve elektrik üretim miktarları incelenmiştir. Bunun için 3 boyutlu yazıcılar ile yuvarlak ve 4 köşeli iki farklı sap yapısı ve bir tabanlılık imal edilmiştir. Tabanlılık üzerinde 90° aralıklar ile açılan 4 adet yuvaya piezoelektrik üreteçler yerleştirilmiştir. Kulelerin alt kısmındaki tırnaklar piezoelektrik malzemenin üretim yapacak kısmına baskı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra bu düzenekleri sırasıyla rüzgâr tüneline yerleştirilmiştir. Piezoelektrik üreteçler rüzgâr tüneline dış kısma yerleştirilen 4 adet avometreye bağlanmıştır. Öncelikle farklı rüzgâr hızlarında düşük türbülanslı akışlar için üreteçlerin akım ve voltaj değerleri ölçülmüştür. Sonrasında kulenin ön kısmına yerleştirilen bir engel ile çubuklara gelen rüzgâr akışının yüksek türbülanslı hale gelmesi sağlanarak farklı rüzgâr hızlarında ölçümler tekrar edilmiştir. Bu işlemler hem yuvarlak hem 4 köşeli saplar için ayrı ayrı yapılmıştır. Farklı rüzgâr hızlarında elde edilen ölçüm değerleri kıyaslanarak, farklı çubuk şekillerinden hangisinin daha verimli olduğu ile düşük ve yüksek türbülanslı rüzgâr akışlarındaki elektrik üretimleri incelenmiştir. Deneyler sonrasında elde edilen veriler incelenerek, ölçülen akım ve voltaj değerlerinden güç analizi yapılmıştır. Güç analizlerinde elde edilen değerler 1 cm<sup>2</sup> 'de üretilen maksimum gücün bulunmasında kullanılmıştır.

## 2.3. Deney Ekipmanları

Bu bölümde deneyler sırasında kullanılan ekipmanlar ve özellikleri görselleriyle birlikte detaylı tanıtılmıştır.

### 2.3.1. Piezoelektrik Üreteçler

Testlerde kullanılmak üzere piezoelektrik üreteçler araştırılırken iç piyasada temin edilebilecek malzemelerin bu çalışma için uygun olmadığı anlaşılmıştır. İhtiyaç duyulan malzemenin rüzgârdan kaynaklanan salınım neticesinde oluşacak fiziksel tepkiye karşılık, bir elektrik enerjisi çıkışı vermesi gerekmektedir. Buna uygun ürünü Çin'den temin edilebilmiştir. Şekil 2.1'de bu ürüne ait görseller verilmiştir.



Şekil 2. 1. Piezoelektrik malzeme internet görseli[29] ve siparişin son hali.

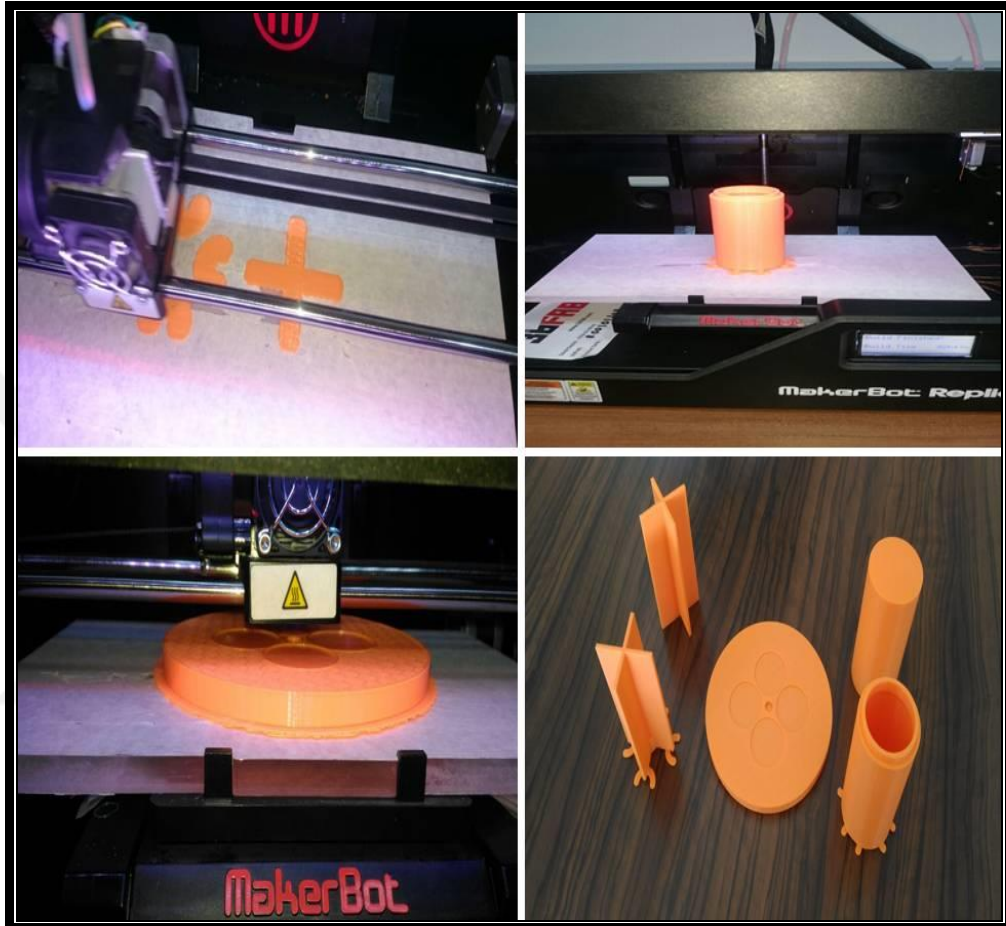
Üreteçlerden 4 tane sipariş edilmiş ve 20 günlük bir süre içinde temin edilebilmiştir. Kullanılan üreteçlerin teknik özellikleri şu şekildedir:

Tablo 2. 1. Kullanılan piezoelektrik malzemenin özellikleri[29].

Ürün adı	Piezoelectric ceramic power module
Boyutları	35mm (çap)
Çıkış Voltajı	15V DC Maximum
Maksimum Çıkış Akımı	5mA
Rezonans Empedans	<90 ohm
Statik Kapasitans	65-79 nF
Alt Tabaka Malzemesi	Brass#CW617N
Bakır kalınlığı	0.26mm
Piezoelektrik Seramik Kalınlığı	0.30mm
Piezoelektrik Seramik Malzemesi	P5-6



SolidWorks çizimleri 3 boyutlu yazıcıya yüklenerek tabanlık ve sap tasarımlarının imalatı tamamlanmıştır. İmalat aşaması ve ürünlerin son haliyle ilgili görseller Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2. 3. 3 boyutlu yazıcıda tabanlık ve sapların imalatı.

### 2.3.3. Rüzgâr Tüneli

Rüzgâr tüneli deneyleri üniversitemizdeki Enerji Sistemleri Mühendisliği bünyesinde bulunan Rüzgâr Laboratuvarında yapılmıştır. Buradaki rüzgâr tüneli emmeli tip, 50x50cm test odasına sahip açık çevrimli bir tüneldir. Tünelin emiş yapan fanının hız kontrolü harici bir kontrol ünitesi yapıyor olup gücü 15kW, devri ise 1500devir/dk'dır. Tünelin test odası şeffaf bir malzeme olan fleksiglass'tan yapılmış olup akış görüntülemeye uygundur. Tünelin diğer kısımları ise metaldendir[30]. Deneyler sırasında şeffaf kısma yerleştirilen saplar ve ölçüm cihazları video kaydına alınmıştır. Daha sonra bu video kayıtları izlenerek ölçüm sonuçları belirlenmiştir. Yapılan

ölçümler farklı rüzgâr hızlarındaki elektrik üretim potansiyelini tespit etmek için kullanılmıştır. Deneylerin gerçekleştirildiği rüzgâr tüneli Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Deneylerin gerçekleştirildiği rüzgâr tüneli.

Rüzgâr tüneline ölçümler için rüzgâr hızı metre/saniye(m/s) cinsinden hesaplanarak kullanılmıştır. Tünelin çalışma sistemi itibariyle kullanılan bir pitot tüpü vasıtasıyla iç basınç ile dış basınç arasındaki farkı hesaplayarak rüzgâr hızını tespit etmektedir. Bu işlem için kullandığımız rüzgâr hızı tablosu Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

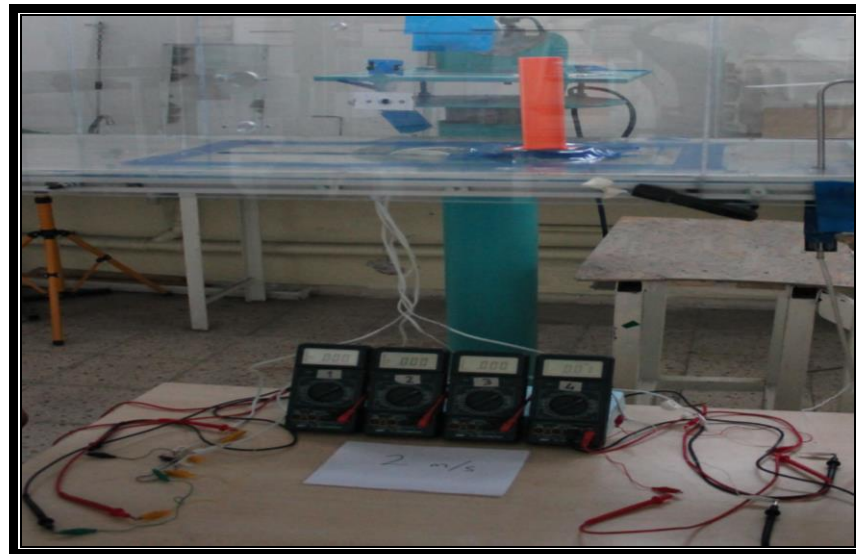
Tablo 2. 2. . Rüzgâr tüneli hız tespit tablosu.

Hız(m/s)	Havanın Yoğunluğu(kg/m <sup>3</sup> )	Çap(metre)	Havanın Viskozitesi	Basınç Farkı(paskal)	Reynolds Sayısı
1	1	0.05	0.0000179	0.5	2793.296089
2	1	0.05	0.0000179	2	5586.592179
3	1	0.05	0.0000179	4.5	8379.888268
4	1	0.05	0.0000179	8	11173.18436
5	1	0.05	0.0000179	12.5	13966.48045
6	1	0.05	0.0000179	18	16759.77654
7	1	0.05	0.0000179	24.5	19553.07263
8	1	0.05	0.0000179	32	22346.36872
9	1	0.05	0.0000179	40.5	25139.6648
10	1	0.05	0.0000179	50	27932.96089
11	1	0.05	0.0000179	60.5	30726.25698

12	1	0.05	0.0000179	72	33519.55307
13	1	0.05	0.0000179	84.5	36312.84916
14	1	0.05	0.0000179	98	39106.14525
15	1	0.05	0.0000179	112.5	41899.44134
16	1	0.05	0.0000179	128	44692.73743
17	1	0.05	0.0000179	144.5	47486.03352
18	1	0.05	0.0000179	162	50279.32961
19	1	0.05	0.0000179	180.5	53072.6257
20	1	0.05	0.0000179	200	55865.92179
21	1	0.05	0.0000179	220.5	58659.21788
22	1	0.05	0.0000179	242	61452.51397
23	1	0.05	0.0000179	264.5	64245.81006
24	1	0.05	0.0000179	288	67039.10615
25	1	0.05	0.0000179	312.5	69832.40223

#### 2.3.4. Ölçüm Cihazları

Ölçüm işlemlerinde 4 ayrı piezoelektrik üreteç için 4 adet avometre kullanılmıştır. Ölçülecek akım değerleri çok küçük mikroamper( $\mu A$ ) seviyesinde olduğu için buna uygun hassasiyette ölçüm cihazları tercih edilmiştir. Rüzgâr tüneli içerisindeki piezoelektrik üreteçler akışları etkilemeyecek şekilde alt kısımlarından kablolarla dışarıdaki ölçüm cihazlarına bağlanmıştır. Ölçüm cihazlarının ekranları test sırasında video kaydına alınmıştır. Daha sonra bu kayıtlar izlenerek, farklı hızlardaki üretimler maksimum, minimum ve ortalama değerler şeklinde belirlenmiştir. Ölçüm düzeneğine ait görsel Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2. 5. Ölçüm cihazları.

## 3. BÖLÜM

### RÜZGÂR TÜNELİ TESTLERİ

#### 3.1. Test Düzeneginin Hazırlanması

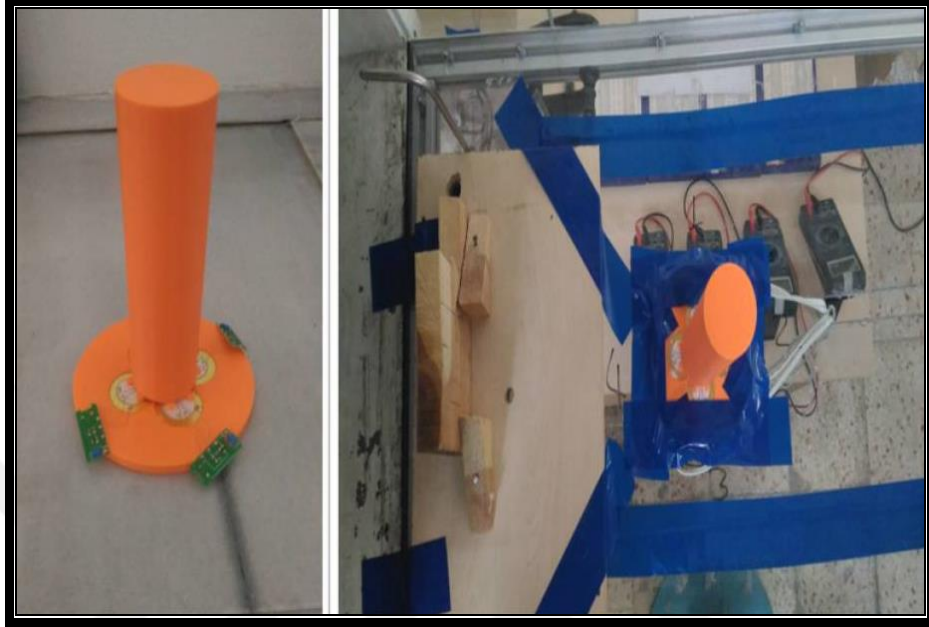
Rüzgâr tüneli testleri için 3 boyutlu yazıcıda hazırlanan tabanlığın üst kısmındaki oyuklara piezoelektrik seramikten imal edilen 4 adet üreteç, yerlerinden oynamaması için az miktarda yapıştırıcı kullanılarak yerleştirilmiştir. Testler için tek bir tabanlık imal edilmiş olup, 4 köşeli ve yuvarlak saplar ayrı ayrı bu tabanlığa yerleştirilerek testler yapılmıştır. Tabanlığın üzerine saplar bir yay vasıtasıyla yerleştirilmiştir. Kullanılan yay sapların rüzgâr karşısında salınımını kolaylaştırırken, rüzgârın kesildiği anlarda başlangıç pozisyonuna dönmesini sağlayacaktır. Yay kullanılarak piezoelektrik üretecin en verimli çalışma şekli olan baskının değişkenliğinin sağlanmış oldu. Yay kullanılmayacak durumlarda, yapılacak daha büyük tasarımlar için mafsal da kullanılabilir. Satın alınan piezoelektrik üreteçlerin üzerlerinde doğrultma devreleri bulunmaktadır. Bu devrelerin çıkışlarına 1m uzunluğunda kablolar bağlanarak rüzgâr tünelinin dışından ölçüm alınması sağlanmıştır. Hazırlanan düzenek rüzgâr tünelinin test odasına izole bantlar vasıtasıyla sabitlenmiş ve kablolar vasıtasıyla üreteçler test cihazlarına bağlanmıştır.

#### 3.2. Piezoelektrik Üreteçlerin Akım Ölçümü Testleri

##### 3.2.1. Yuvarlak Sap Yapısına Ait Akım Ölçümleri

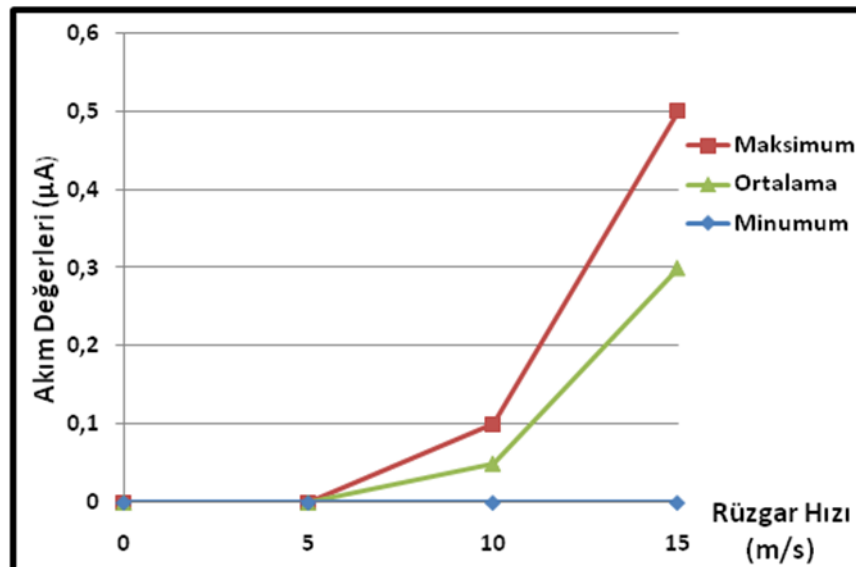
Yuvarlak sap yapısına ait rüzgâr tünelindeki testlere düşük türbülanslı rüzgâr akışlarında başlanmıştır. Hazırlanan deney düzeneği yüksek hızlarda zarar görebileceği için akım ölçümleri için maksimum 15m/s rüzgâr hızı belirlenmiştir. Akım ölçümleri düşük ve yüksek türbülanslı akışlarda rüzgârı karşıdan gören 2 numaralı piezoelektrik üreteç

üzerinden yapılmıştır. Ölçümler avometre cihazının doğrusal akım(DC) kısmında yapılmıştır. Deney düzeneğine ait görseller Şekil 3.1’de verilmiştir.



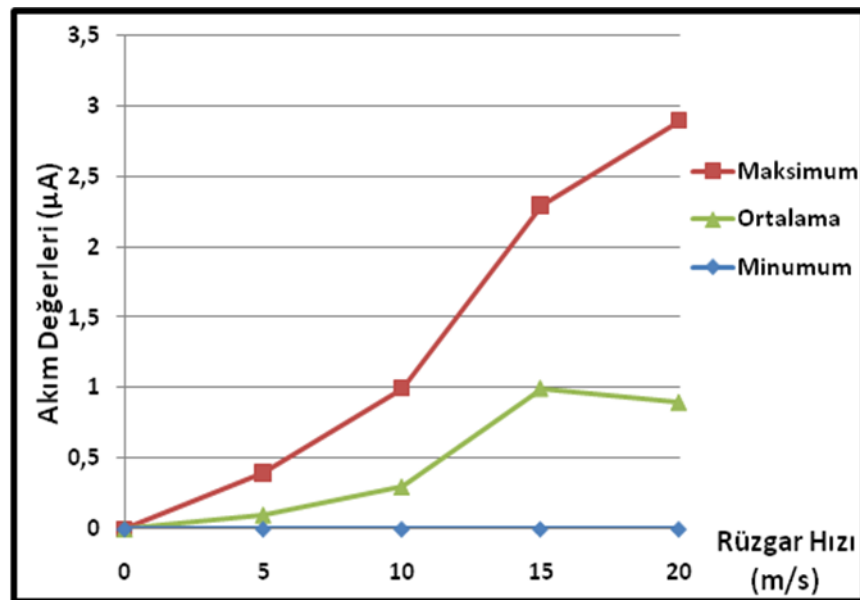
Şekil 3. 1.Rüzgâr tüneli deney düzeneği.

Ölçümler sırasında ölçü aletindeki değerler video kaydına alınarak maksimum, minimum ve ortalama değerler tespit edilmiştir. Düşük türbülanslı akıslarda yuvarlak sap yapının tek piezoelektrik üretece yaptığı baskı neticesinde üretilen akım değerleri Şekil3.2’de gösterilmiştir. Ölçümlerde rüzgâr hızları metre/saniye(m/s), akım değerleri de mikroamper( $\mu\text{A}$ )’dir.



Şekil 3. 2. Düşük türbülanslı akışta yuvarlak sap akım ölçümü.

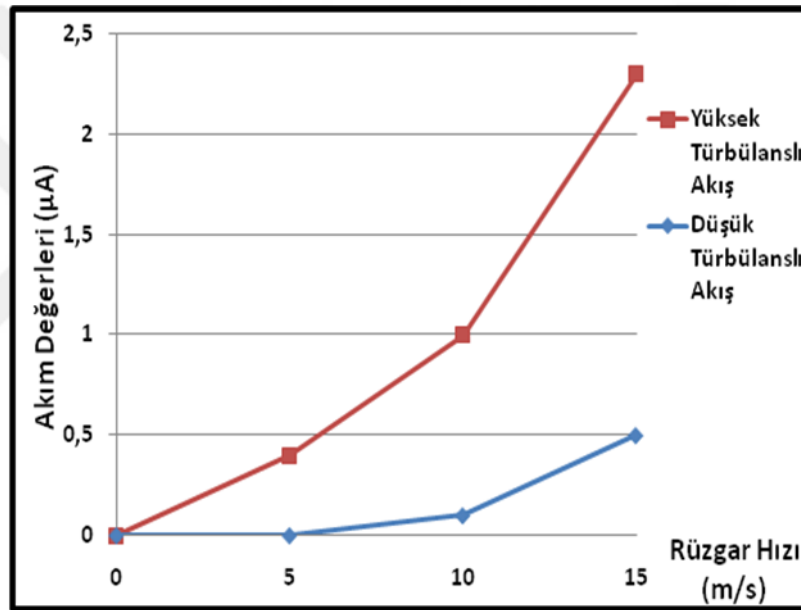
Düşük türbülanslı akışlardan sonra yüksek türbülanslı akışlarda ölçümlere devam edilmiştir. Rüzgâr tüneline yüksek türbülanslı akış elde edebilmek için rüzgârın geldiği kısma bir engel koyarak akışların yüksek türbülanslı olması sağlanmıştır. Engel 12cm yüksekliğinde dikdörtgen bir tahta parçasıdır. Engel prototipten 24cm'lik bir uzaklığa yerleştirilmiştir. Bu uzaklık seçiminde rüzgâr türbinlerinin verimli çalışma aralıkları göz önüne alınmıştır. Rüzgâr türbinlerinin verimli çalışabilmeleri için h yüksekliğinde bir engelden en az 10h uzaklığında bir mesafeye kurulmaları gerekmektedir[31]. Bu çalışmadaki amaçlardan birisi de piezoelektrik üreteçlerle rüzgâr sayesinde elektrik üretiminin, rüzgâr türbinlerine göre artı ve eksilerini gözlemleyebilmektir. Bu nedenle türbinlerin verimli çalışamayacağı alanlarda projemizin davranışlarını gözlemleyebilmek için engel 2h gibi bir uzaklığa konularak testlere devam edilmiştir. Testler sonucunda yüksek türbülanslı akışlara ait akım ölçümü değerleri Şekil3.3'de gösterilmektedir. Yüksek türbülanslı akışlarda koyduğumuz engel sayesinde rüzgâr tek bir yönden değil, etkisini biraz daha dağıtacak şekilde farklı yönlerden prototipe etki etmektedir. Bu durumda düzeneğimizin dayanımının daha fazla olacağı düşünülerek 20m/s rüzgâr hızına kadar testlere devam edilmiştir.



Şekil 3. 3.Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak sap akım ölçümü.

Ölçüm sonuçları ve grafiklerden görüldüğü üzere yüksek türbülanslı akışlarda elde edilen akım değerleri, düşük türbülanslı akışlarda elde edilen değerlerden çok daha yüksektir. Bunun nedeni piezoelektrik üreteçlerin çalışma prensibidir. Bu üreteçler sabit

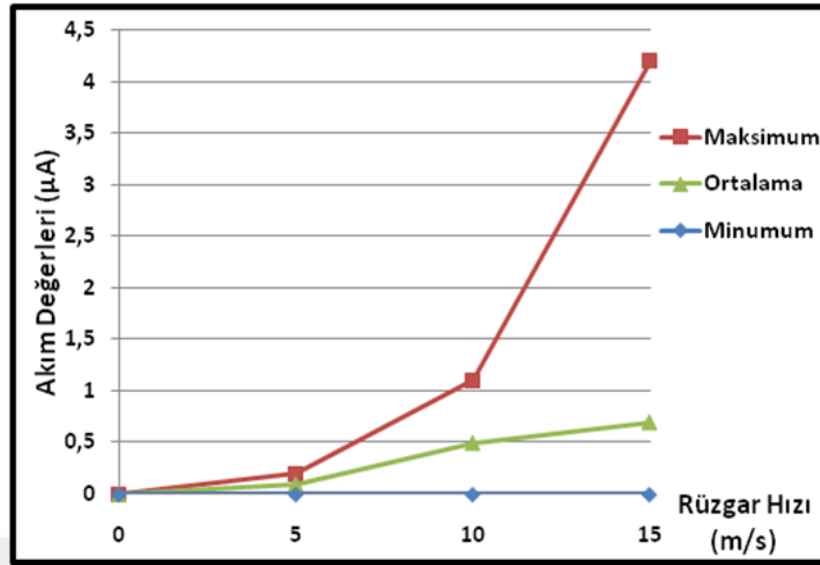
bir baskı altında düşük değer verirken, sürekli değişen artıp azalan baskılar neticesinde daha yüksek değerler vermektedir. Bu duruma piezoelektrik malzemelerin potansiyel fark oluşturma ve geri eski haline dönme süreleri neden olmaktadır. Ayrıca kullandığımız üreteçlerin doğrultma devrelerindeki kondansatörlerin dolma boşalma süreleri de eklendiğinde, tam olarak başlangıç şartlarına dönülmeden yapılan her salınım ve baskı üretilen akım değerlerinin daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Yuvarlak sap yapısının tek piezoelektrik üreteçten elde ettiği maksimum akım değerleri, düşük ve yüksek türbülanslı akışlardaki üretim farkının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3. 4. Düşük ve yüksek türbülanslı akışta maksimum akım üretimi kıyaslaması.

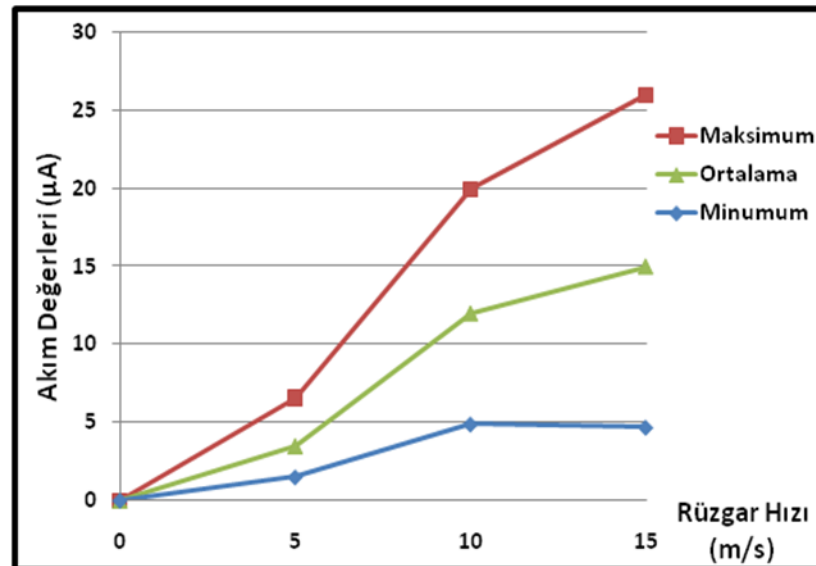
### 3.2.2. 4Köşeli Sap Yapısına Ait Akım Ölçümleri

Yuvarlak sap yapısına ait akım ölçümlerinden sonra, test düzeneğinin tabanlığı ve piezoelektrik üreteçler sabit kalacak şekilde sadece sap yapısı 4 köşeli sap ile değiştirilerek yeni ölçümler yapılmıştır. Sap yapısını değiştirmekteki amaç rüzgâr akışlarında köşeli bir yapı ile yuvarlak bir yapının aerodinamik farklılığının akım oluşumlarına nasıl bir katkı sağlayacağını araştırmaktır. Daha önceki testlerde en son engel koyarak yüksek türbülanslı akış düzeneği kullanıldığı için, 4 köşeli sap yapısında da öncelikle yüksek türbülanslı akışlardan başlanmıştır. Yüksek türbülanslı akışlara ait akım üretimi ölçümleri avometre cihazının DC kısmında yapılmış olup, sonuçlar Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3. 5. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap akım ölçümü.

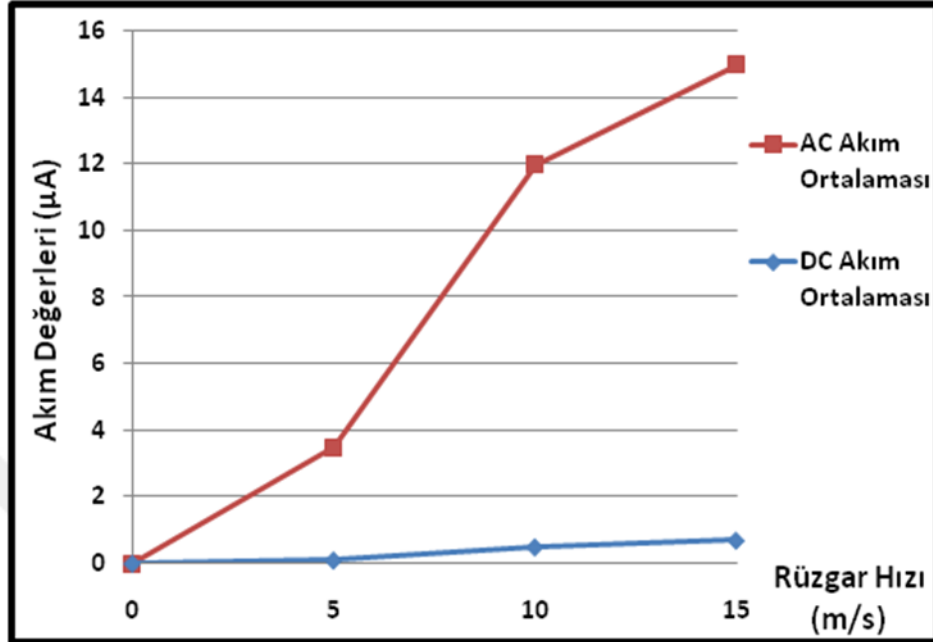
Ölçümler sırasında değerlerin anlık olarak çok fazla değişmesinden dolayı ölçüm aletinin doğrusal akım(DC) kısmında yapılan ölçümlerin çok sağlıklı olmadığı görülmüştür. Bu nedenle ölçümler için avometre cihazının alternatif akım(AC) kısmı kullanılarak testler tekrar edilmiştir. Yüksek türbülanslı akışlarda 4 köşeli sap tek piezoelektrik üreteç için yapılan ölçüm tekrarları Şekil3.6'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap akım ölçümü(AC).

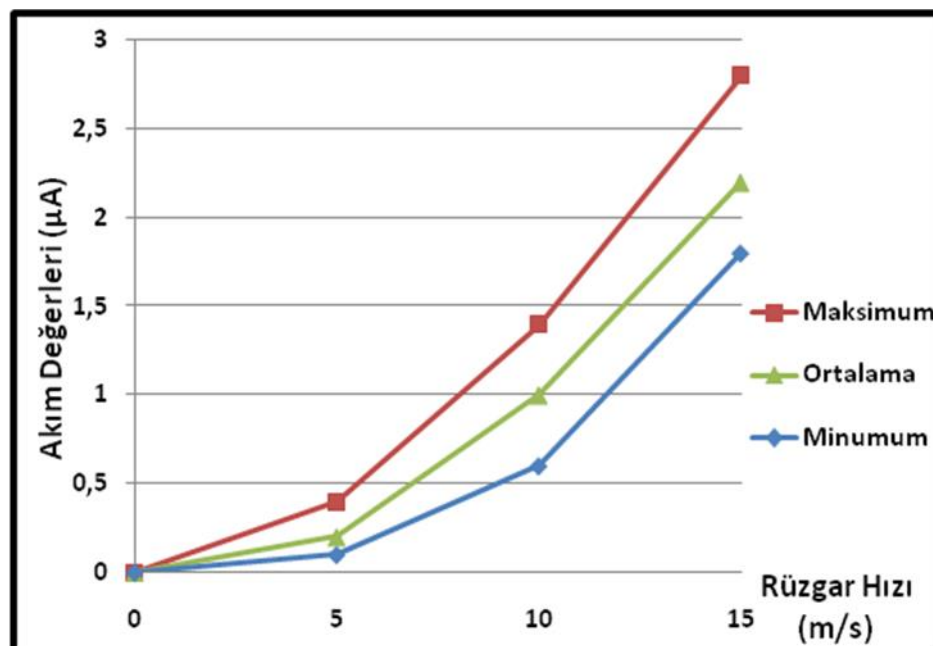
Yapılan ölçüm tekrarıdan sonra AC ve DC ölçümler arasında çok ciddi farkların olduğu görülmüştür. AC ve DC akım ölçümlerinin ortalama değerlerinin kıyaslaması

Şekil3.7’de görülmektedir. Bu nedenle bundan sonraki ölçümlere avometre cihazının AC kısmında devam edilmiştir.



Şekil 3. 7. AC ve DC akım ortalama değerler kıyaslaması.

4 köşeli sap yapısı için yüksek türbülanslı akım ölçümlerinden sonra düşük türbülanslı akışlar için testlere devam edilmiştir. Testlerin ölçümleri avometre cihazının AC kısmında yapılmış olup sonuçlar Şekil3.8’de gösterilmiştir.

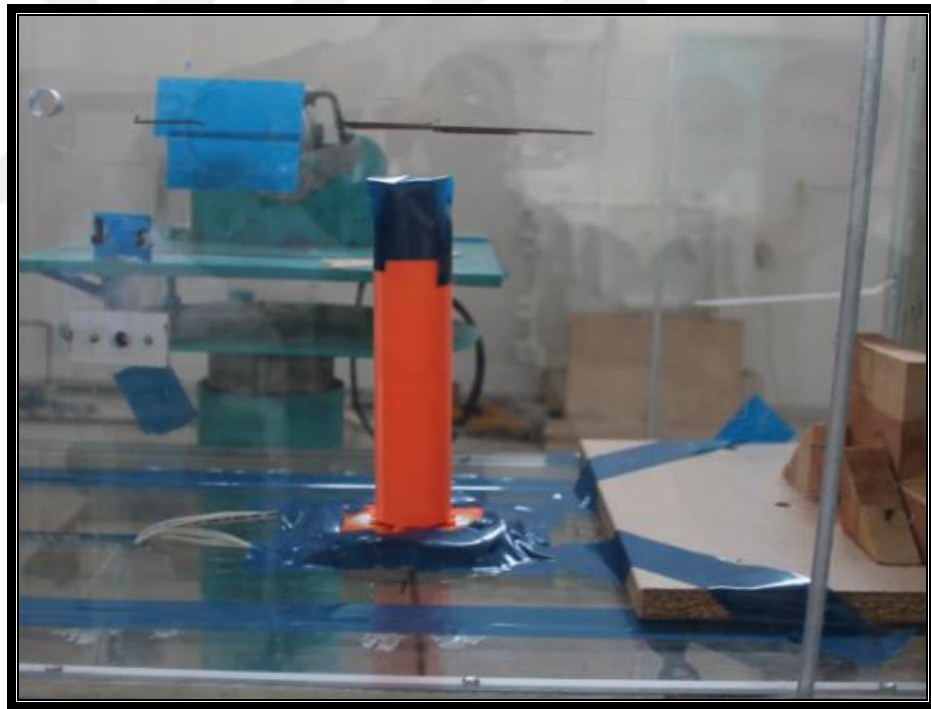


Şekil 3. 8.Düşük türbülanslı akışta 4 köşeli sap akım ölçümü.

4 köşeli sap yapısında da yuvarlak sap yapısında olduğu gibi yüksek türbülanslı akışlarla düşük türbülanslı akışlar arasındaki akım üretimi değerlerinde neredeyse 10 katına varan farklar oluşmuştur. Bunun nedeni daha öncede izah ettiğimiz gibi piezoelektrik üreteçlerin çalışma prensipleridir.

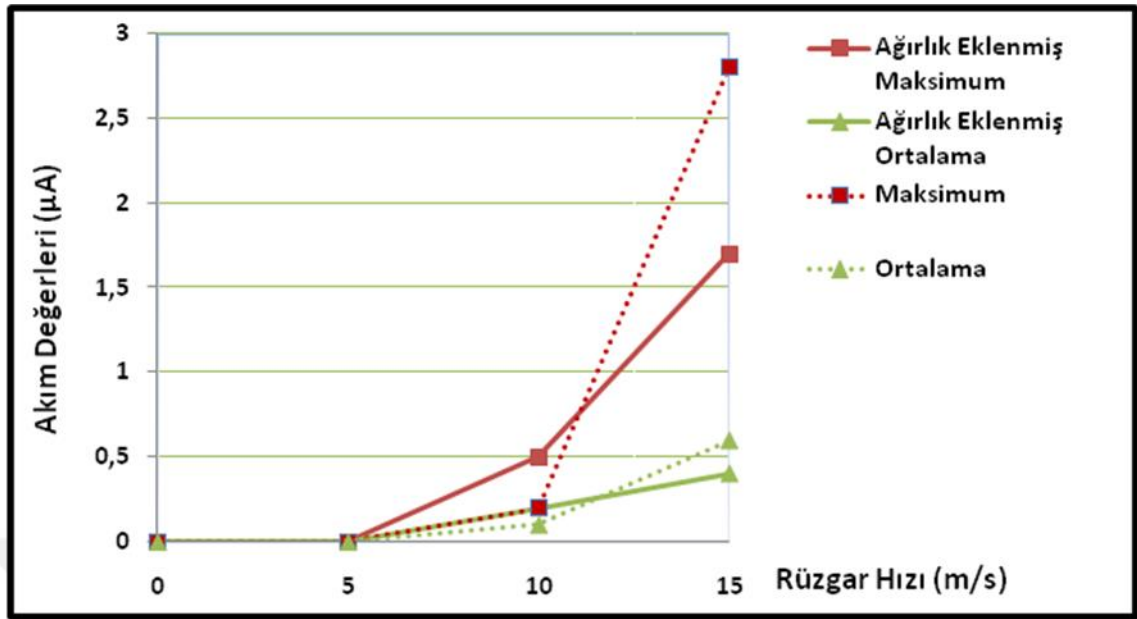
### 3.2.3. Yuvarlak Sap Yapısı Ağırlık Eklenmiş Akım Ölçümleri

Deneysel sırasında imal edilen sap yapısının, piezoelektrik üreteçlere baskı yapmak için yeterince ağır olmayabileceği değerlendirilmiştir. Yuvarlak sap yapısının üzerine rüzgâr akışını etkilemeyecek şekilde 200gr'lık bir ağırlık bağlayarak düzenek biraz daha ağırlaştırılmıştır. Tüm üreteçlerden değer alabilmek için yüksek türbülanslı rüzgâr akışında farklı hızlarda ağırlık eklenmiş sap yapısında akım ölçümleri tekrarlanmıştır. Bu düzeneğe ait resim Şekil 3.9'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 9. Ağırlık eklenmiş yuvarlak sap akım ölçümü deney düzeneği.

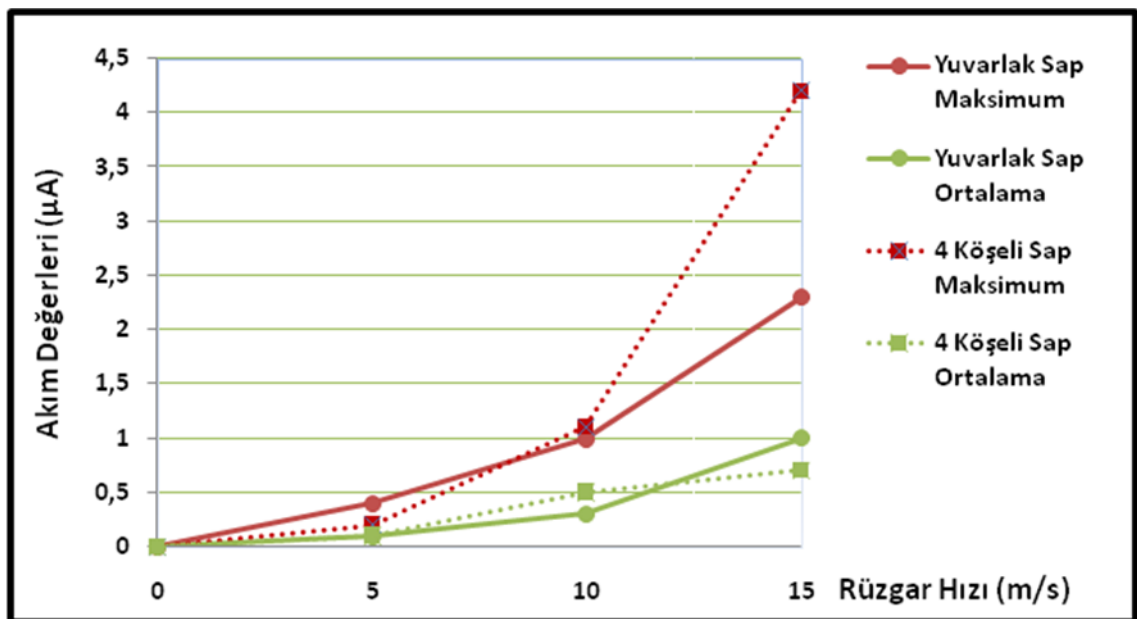
Ağırlık eklenmiş yeni düzenek sonrasında akım ölçümlerinde ortalama ve maksimum değerler için 10m/s rüzgâr hızında bir miktar artış sağlanmış olsa da 15m/s hıza çıkıldığında ağırlık eklenmemiş sapa ait değerlerin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden bundan sonraki ölçümlere ağırlık eklemekten devam edilmiştir. Şekil 3.10'de ağırlık eklenmiş ve eklenmemiş akım ölçümü sonuçlarının kıyaslaması görülmektedir.



Şekil 3. 10. Yuvarlak kule ağırlık eklenmiş akım ölçümleri kıyaslaması.

### 3.2.4. Yuvarlak Sap ve 4 Köşeli Sap Akım Ölçümleri Kıyaslaması

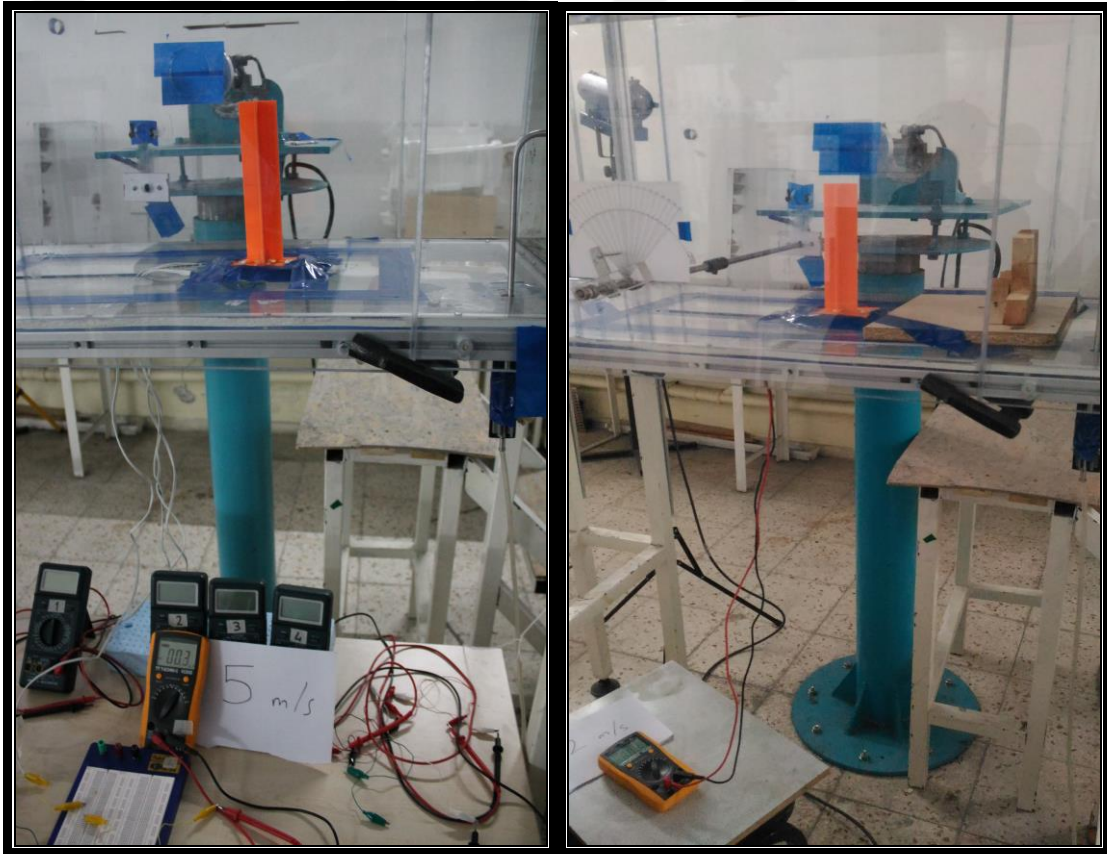
Deneyle sonuçunda yuvarlak sap yapısı ile 4 köşeli sap yapısının rüzgâr karşısındaki davranışlarının, akım üretimine katkısı ölçümler sonucuna göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında maksimum ve ortalama değerler için 4 köşeli sap yapısının daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Bu ölçümlere ait değerler Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3. 11. Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak ve 4 köşeli sap akım kıyaslaması.

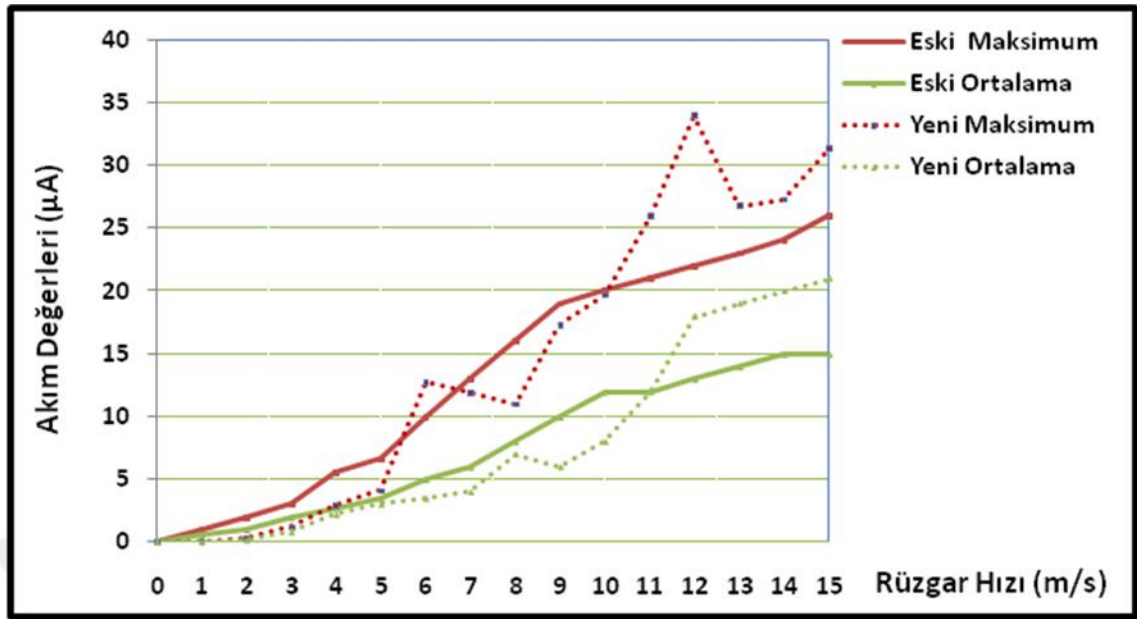
### 3.2.5. Akım Ölçümü Tekrarları

Yapılan testler sonucunda elde edilen akım değerlerinin, üreteçlerin kapasitelerinin çok altında kaldığı gözlemlenmiştir. Teknik verilerine göre üreteçler 5miliamper(mA) akım değerlerine çıkabilecekken ölçümler sonucunda maksimum 56,3mikroamper( $\mu$ A) değerleri ölçülebilmiştir. Ölçülen değerler çok küçük olduğu için kullanılan kabloların iç dirençleri gibi faktörlerin sonuçları etkileyebileceği düşünülerek yeni bir düzenek kurulmuştur. Bu düzende ölçüm yapabilmek için rüzgâr tünelinin dışına çıkan 1 metre uzunluğunda kablolar iptal edilerek sadece avometre cihazının probrarı kullanılmıştır. Bu sayede oluşabilecek kayıpların en aza indirilmesi planlanmıştır. Eski ve yeni düzeneklere ait fotoğraflar Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



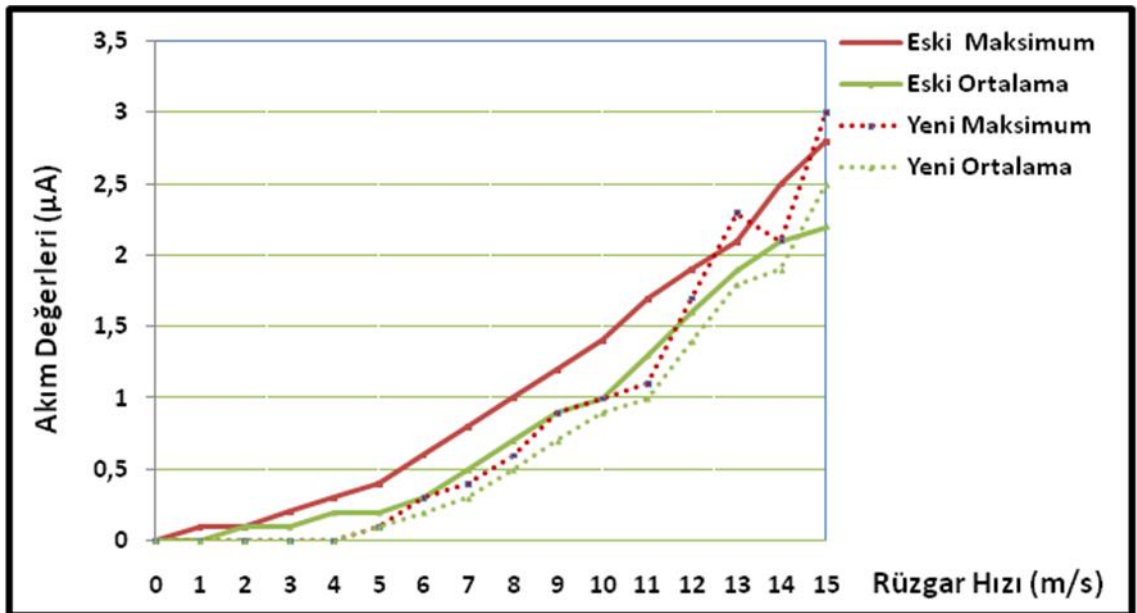
Şekil 3. 12. Eski ve yeni akım ölçümü deney düzeneği.

Yeni ölçümler yüksek türbülanslı akışta rüzgârı karşıdan alan 2 numaralı tek piezoelektrik üreteç üzerinden, 4 köşeli sap yapısı ile yapılmıştır. Elde edilen değerler ve önceki değerler Şekil 3.13’da verilmiştir. Ölçümler avometrenin AC kısmında yapılmıştır.



Şekil 3. 13. Yüksek türbülanslı akışta akım ölçümleri kıyaslaması.

Ölçüm sonuçlarının eski değerlerle kıyaslaması yapıldığında maksimum değerlerde 9m/s rüzgâr hızından sonra bir artış gözlemlenmiştir. Ortalama akım değerleri de 11m/s rüzgâr hızından sonra artış görülmektedir. Bu belirtilenlerden daha düşük hızlarda ise ölçülen değerler birbirine yakın seyretmiştir.



Şekil 3. 14. Düşük türbülanslı akışta akım ölçümleri kıyaslaması.

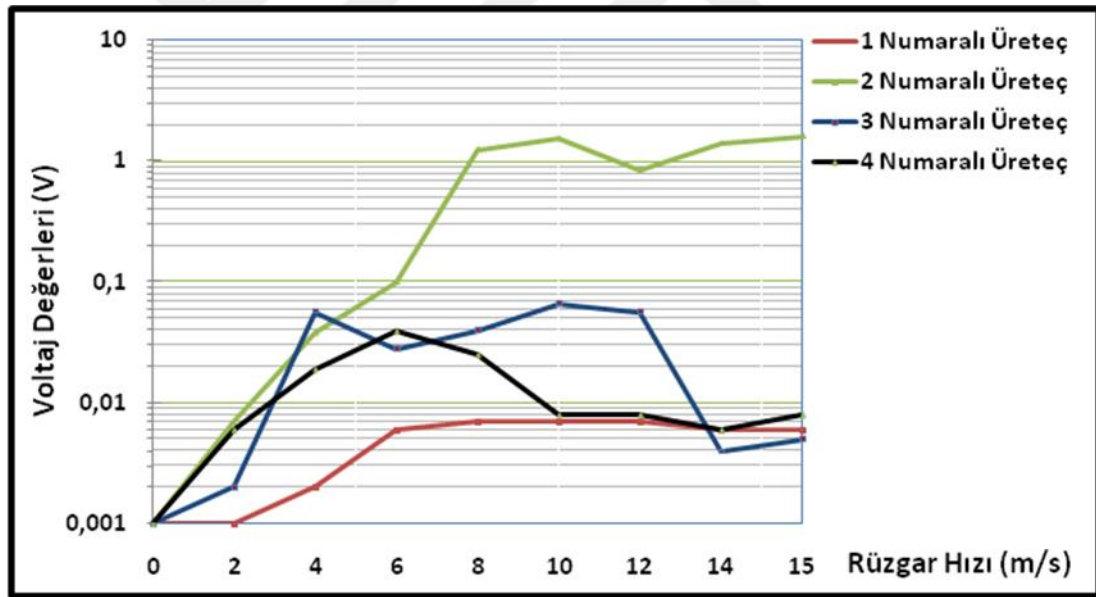
Şekil 3.14'de düşük türbülanslı akışlardaki ölçüm sonuçları değerlendirildiği zaman 14m/s rüzgâr hızından sonra ölçüm düzeneğinin değiştirilmesinin sonuçları olumlu

yönde etkilediği gözükse de daha düşük hızlarda eski sonuçlar daha yüksektir. Kabloları kısaltmalar kayıpları azaltma yönündeki çalışmalar olumlu sonuç verse de üreteçlerin kataloğunda yer alan teknik verilere ulaşılammıştır. Bunun nedenleri tezimizin sonuçlar kısmında daha detaylı değerlendirilecektir.

### 3.3. Piezoelektrik Üreteçlerin Voltaj Ölçümü Testleri

#### 3.3.1. 4 Köşeli Sap Yapısına Ait Voltaj Ölçümleri

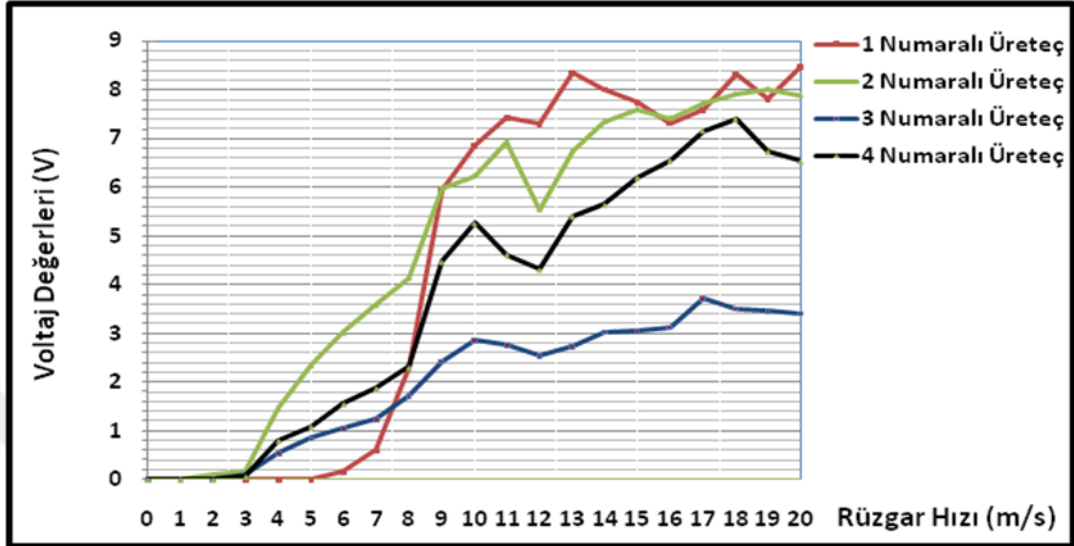
Voltaj ölçümleri akım ölçümü ile aynı test düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Her piezoelektrik üreteç için ayrı ayrı bağlanan ölçüm cihazları ile önce düşük türbülanslı rüzgâr akışlarında sonra yüksek türbülanslı akışlarda farklı hızlarda ölçümler yapılmıştır. Şekil 3.15’de düşük türbülanslı rüzgâr akışında 4 köşeli sap yapısına ait maksimum voltaj ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 3. 15. Düşük türbülanslı akışta 4 köşeli sap maksimum voltaj değerleri.

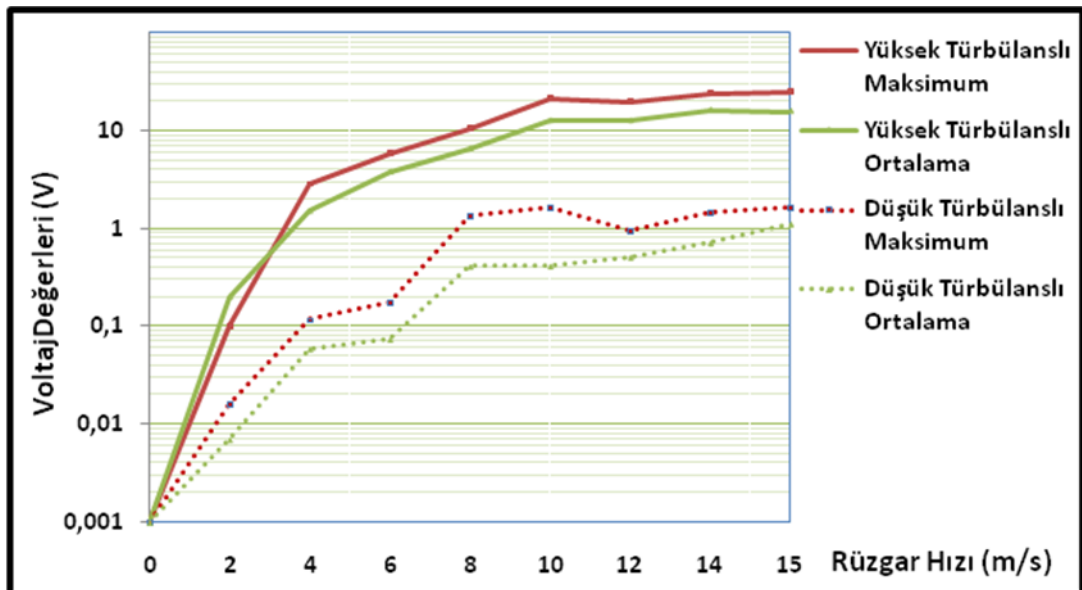
Düşük türbülanslı akışlarda rüzgârı karşıdan gören 2 numaralı piezoelektrik üreteçte diğerlerine kıyasla çok yüksek voltaj değerleri alınabilmiştir. Diğer üreteçlerde ise birbirine yakın değerler ölçülmüştür. Düşük türbülanslı akışlarda ölçülen değerler bu denli düşük kalırken yüksek türbülanslı akışta ölçüm sonuçları çok değişmiştir. Tüm üreteçlerden birbirine yakın değerler alınabilirken, üretilen voltaj değerleri oldukça yükselmiştir. Şekil 3.16’de yüksek türbülanslı akışlar için 4 köşeli sap yapısına ait voltaj üretimi değerleri gösterilmiştir. Yüksek türbülanslı akışlarda daha önce akım

ölçümünde de izah edildiği gibi, testler esnasında prototipe tek bir noktadan binen yük daha az olduğu için rüzgâr hızları 20m/s'ye kadar çıkarılmıştır.



Şekil 3. 16. Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap maksimum voltaj değerleri.

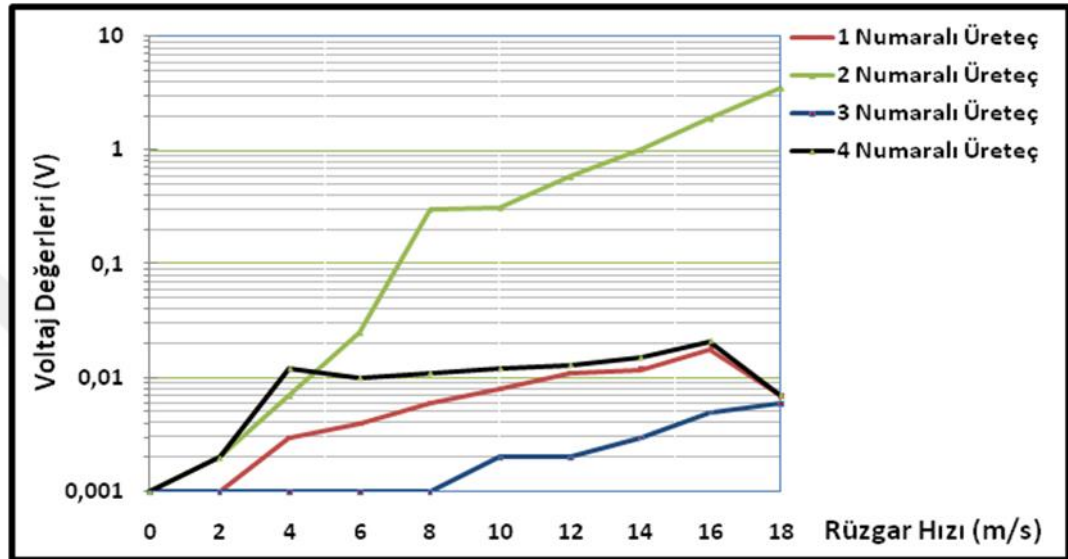
Piezoelektrik üreteçlerin basınç değişikliklerine karşı gösterdikleri tepkiler ve bunun sonucunda ürettikleri voltaj en iyi yüksek türbülanslı akışlarda gözlenebilmiştir. Bu nedenle yüksek türbülanslı rüzgâr akışlarında düşük türbülanslı rüzgâr akışlarına kıyasla üretilen voltaj oldukça fazla olmaktadır. 4 adet üreticinin toplam voltaj değerlerinin maksimum ve ortalama olarak, düşük ve yüksek türbülanslı akışlar için kıyaslaması Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 17. 4 köşeli sap düşük ve yüksek türbülanslı akış voltaj ölçümü kıyaslaması.

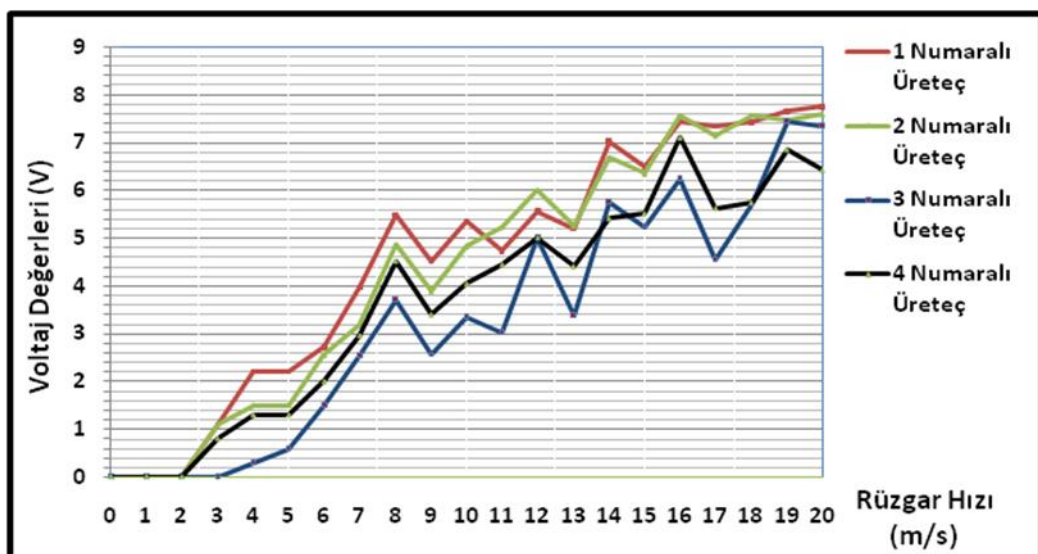
### 3.3.2. Yuvarlak Sap Yapısına Ait Voltaj Ölçümleri

Yuvarlak sap yapısına ait voltaj ölçümlerine düşük türbülanslı rüzgâr akışlarında 18m/s hıza çıkana kadar devam edilmiştir. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi sadece rüzgârı karşıdan alan 2 numaralı piezoelektrik üreteçte voltaj değerleri elde edilebilmiştir.



Şekil 3. 18.Düşük türbülanslı akışta yuvarlak sap maksimum voltaj değerleri.

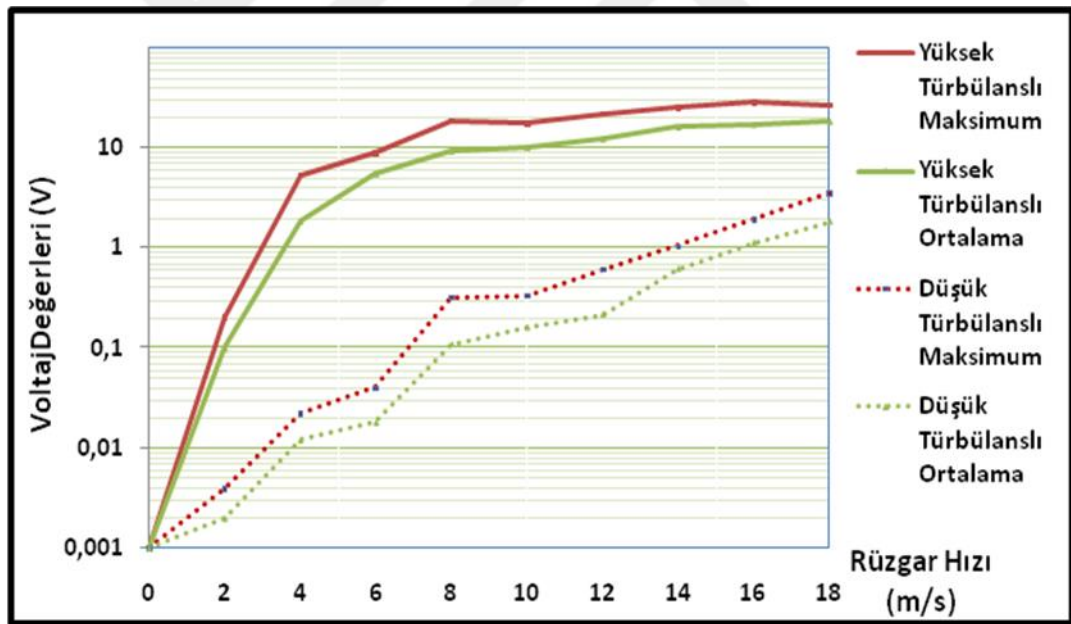
Düşük türbülanslı akışlardan sonra rüzgâr tünelinin test kısmına engel tekrar konularak akışlar yüksek türbülanslı hale getirilmiş ve yeni ölçümler bu şekilde alınmıştır. Şekil 3.19’de görüldüğü üzere 4 piezoelektrik üreteçte de elektrik üretimi sağlanarak ölçüm alınabilmektedir.



Şekil 3. 19.Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak sap maksimum voltaj değerleri.

Üreteçler arasındaki üretim farkının ise yüksek türbülanslı akış için koyduğumuz engelin şeklinden ve yaptığımız düzenekteki montajdan kaynaklanabilecek hatalardan olduğunu düşünülmektedir.

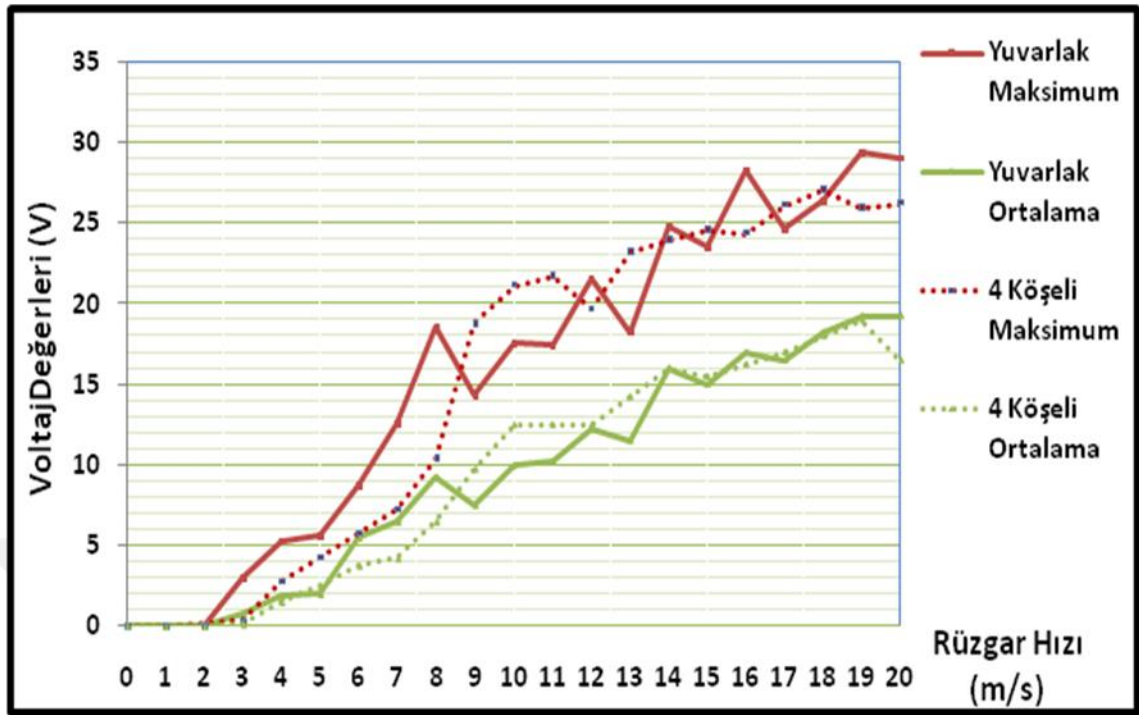
Daha önceki akım ve voltaj ölçümlerinde görülen sonuç, yuvarlak sap voltaj ölçümlerinde de teyit edilmiştir. Şekil 3.20’de görüldüğü üzere düşük türbülanslı akışlar ile yüksek türbülanslı akışlar arasında çok ciddi farklar vardır. Düşük türbülanslı akışlarda sadece tek bir üreteçten değer alınabilse bile üzerine sürekli olarak sabit bir kuvvet uygulandığından, üretebildiği voltaj düşük değerde kalmaktadır. Yüksek türbülanslı akışlarda ise sürekli değişken bir kuvvet uygulandığından her yeni baskıda ölçülen voltaj değeri artmıştır. Rüzgârı değişik yönlerden alması sayesinde ise 4 piezoelektrik üreteçten de voltaj üretilerek değer ölçülebilmektedir.



Şekil 3. 20. Yuvarlak sap düşük ve yüksek türbülanslı akış voltaj ölçümü kıyaslaması.

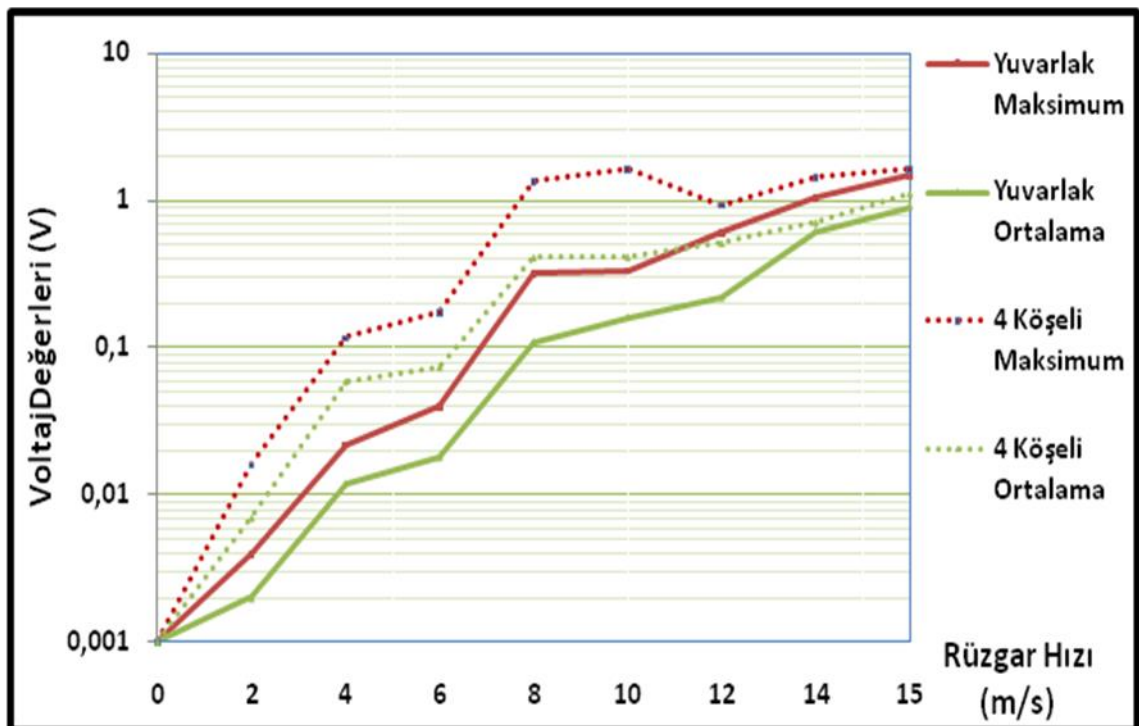
### 3.3.3. Yuvarlak ve 4 Köşeli Sap Yapısına Ait Voltaj Ölçümleri Kıyaslaması

Yuvarlak sap yapısı ile 4 köşeli sap yapısının elektrik üretimleri voltaj ölçümleri üzerinden kıyaslanacak olursa, yüksek türbülanslı akışlarda maksimum ve ortalama voltaj değerleri açısından yuvarlak sap yapısının 4 köşeli sap yapısından küçük bir farkla da olsa yüksek değerler verdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar 4 piezoelektrik üreticinin toplam değerleri üzerinden kıyaslanarak Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 21. Yüksek türbülanslı akışta yuvarlak ve 4 köşeli sap voltaj ölçümü.

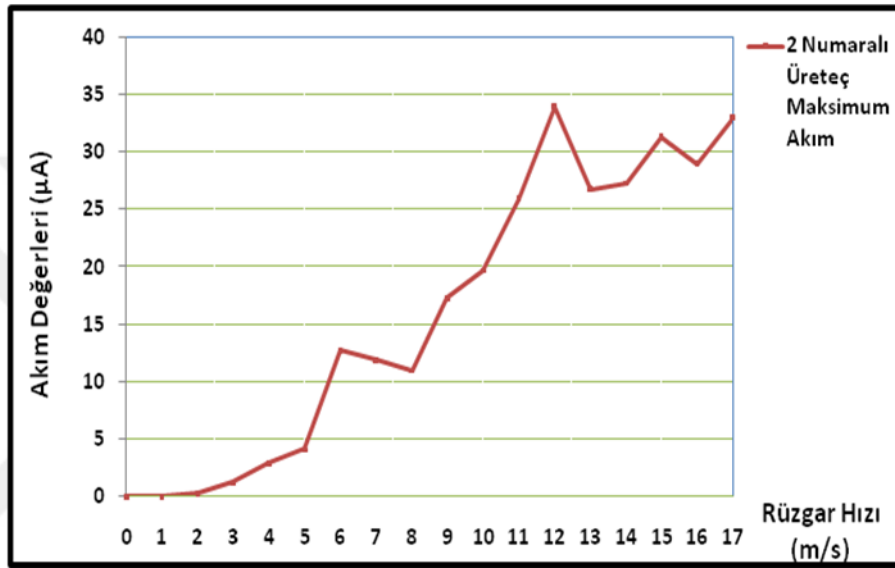
Düşük türbülanslı akışlarda 2 sap yapısı kıyaslanacak olursa küçük farklarla da olsa genel itibariyle 4 köşeli sap yapısının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 22. Düşük türbülanslı akışta yuvarlak ve 4 köşeli sap voltaj ölçümü.

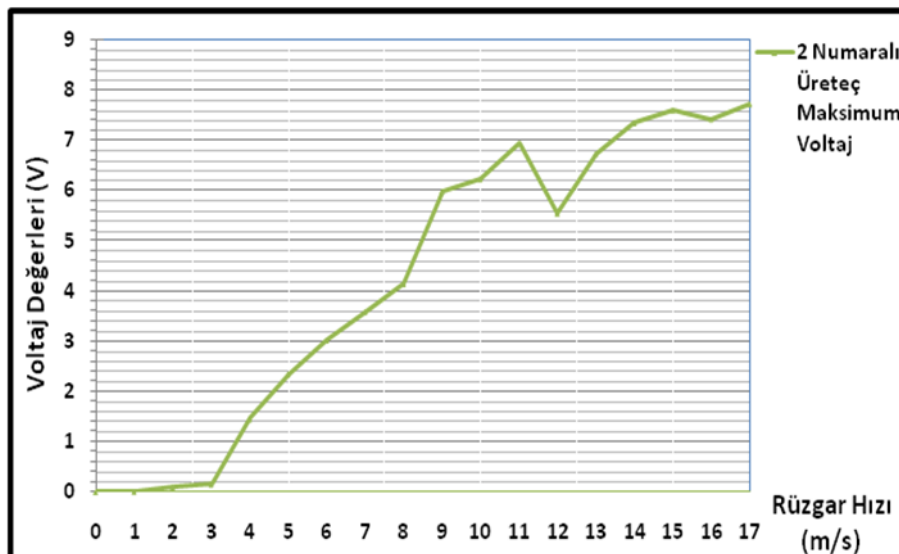
### 3.4. Piezoelektrik Üreteçlerin Güç Üretimleri

Üreteçlerin voltaj ve akım değerlerinden sonra ürettikleri güç incelenmiştir. Akım ölçümlerinde kayıp olduğu düşünülerek, ölçümleri 4 köşeli sap yapısı ile yenilenmiş ve nispeten daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu yüzden güç analizi için de 4 köşeli sap yapısının yüksek türbülanslı akıslarda ürettiği maksimum değerler kullanılmıştır. Kullanılan akım değerleri Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



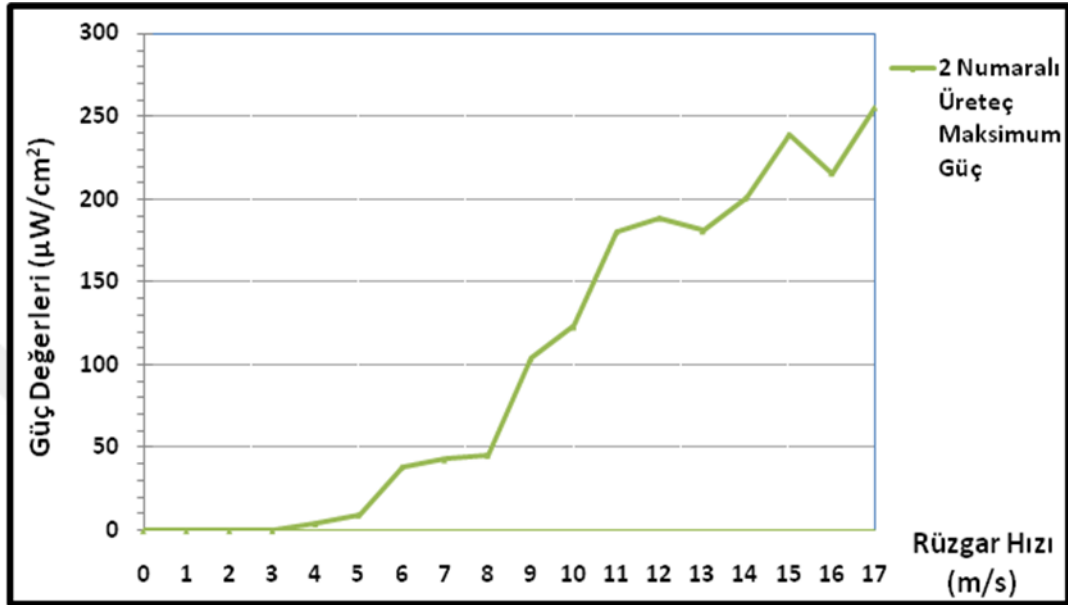
Şekil 3. 23. Güç analizlerinde kullanılacak akım değerleri.

Güç analizlerinde kullanılacak 4 köşeli sap yapısına ait yüksek türbülanslı akıslardaki voltaj değerleri Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



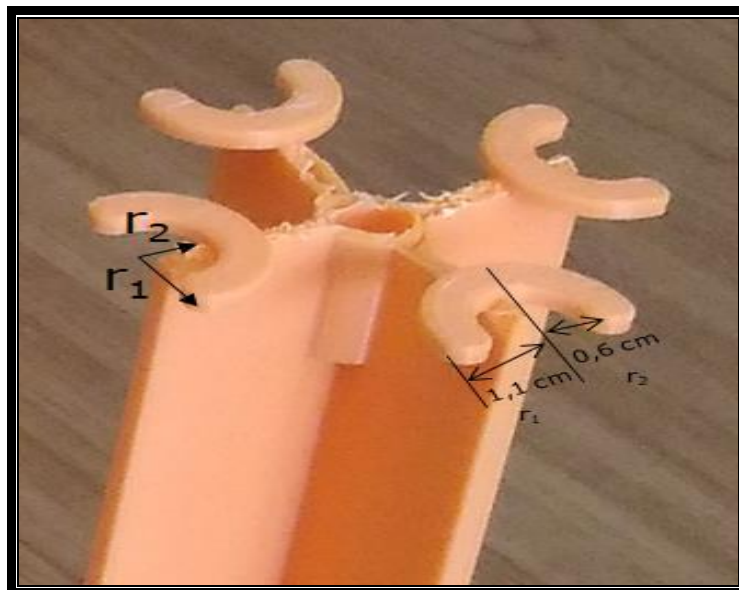
Şekil 3. 24. Güç analizlerinde kullanılacak voltaj değerleri.

Güç analizi yapabilmek için  $P$  (güç) =  $V$ (voltaj)  $\times$   $I$ (akım) formülünü kullanılmıştır. Maksimum ve ortalama değerlerin çarpımı sonucu elde edilen güç grafiği Şekil 3.25’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 255.Yüksek türbülanslı akışta 4 köşeli sap maksimum güç üretimi tablosu.

Üretilen gücün daha anlamlı ve kıyaslanabilir olması için piezoelektrik üreteçlerin bir santimetrekaredeki( $cm^2$ ) olan üretim değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için Şekil 3.25’de sap yapımızın piezoelektrik üreteçlerin yüzeyine basan kısmı gösterilmiştir.



Şekil 3. 26. 4 köşeli sap yapısının piezoelektrik üreteçlere baskı yapan kısmı.

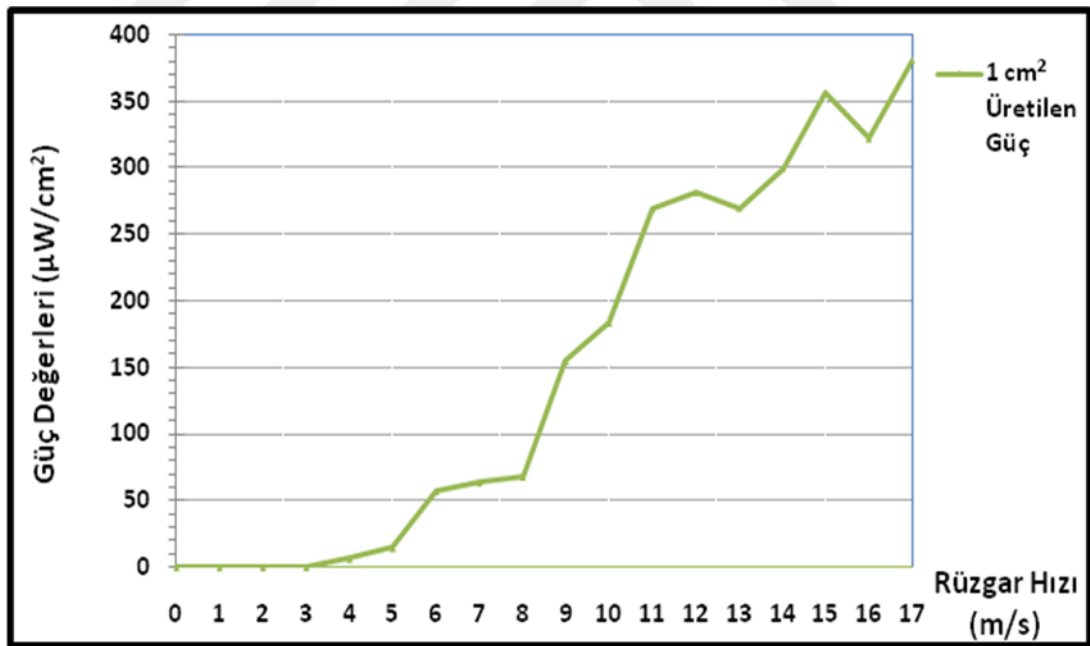
Piezoelektrik üreteçlerin üstüne basan ayakların alanını bulmak için dairenin yüzey alanı formülünden "A (dairenin alanı) =  $\Pi$  (pi) x  $r^2$  (yarıçap)" faydalanılmıştır. Dış kısımdaki yarım daire alanından iç kısımdaki alan çıkarılarak ayağın yüzey alanını bulunmuştur.

$$[\Pi * (r_1)^2 - \Pi * (r_2)^2] / 2 = [3.14 * (1,1)^2 - 3.14 * (0,6)^2] / 2 = 1,33 \text{ cm}^2$$

Yapılan gözlemler sonucu, düzeneğin yaylı olması ve salınım sonucu bu yüzey alanın ancak yarısının piezoelektrik üreteç üzerine baskı yapabildiği gözlenmiştir.

$$1,33 / 2 = 0.67 \text{ cm}^2$$

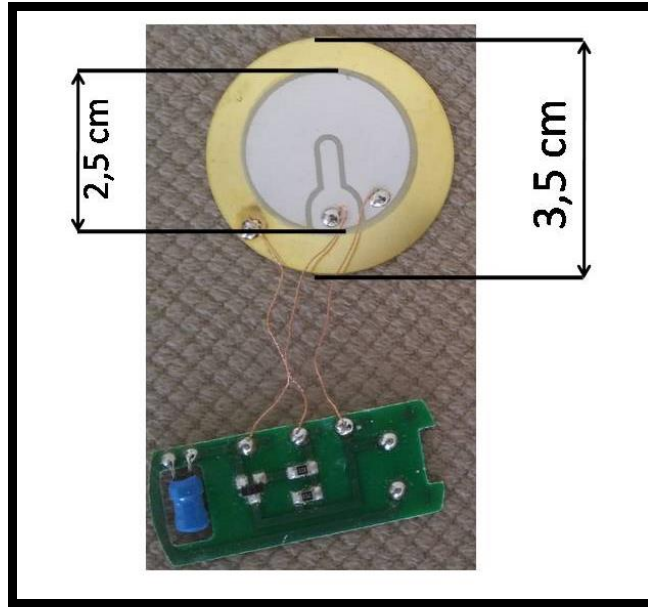
Şekil 3.25'deki güç değerleri piezoelektrik üreteçlerin  $0.67 \text{ cm}^2$  alan üzerine yaptığı basınç sonucu ürettiği gücü göstermektedir. Bu güç değerlerini  $1 \text{ cm}^2$  alan için hesapladığımızda Şekil 3.27'deki değerlere ulaşmıştır. Burada elde edilen en yüksek değer olan  $380.73 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  güce  $17 \text{ m/s}$  rüzgar hızında ulaşılabilmiştir.



Şekil 3. 27.  $1 \text{ cm}^2$ 'de üretilen maksimum güç tablosu.

Piezoelektrik üreteçlerin boyutlarına ait teknik özellikleri Şekil 3.28'deki görselde verilmiştir. Bu şekil üzerinde üreticinin boyutları gözükmemektedir. Bu boyutlara göre üreteçlerin yüzey alanını hesaplanacak olursa:

$$\Pi * (r)^2 = 3.14 * (1.25)^2 = 4.9 \text{ cm}^2$$



Şekil 3. 268. Piezoelektrik üreteçlerin dış görünüşü ve boyutları.

Üreteçlerin teknik verisine göre maksimum güç çıkışı 15V ve maksimum akımı 5mA 'dır. Buradan üreteçlerin maksimum güç çıkışı 1cm<sup>2</sup>'ye göre hesaplanacak olursa:

$$P = (V * I) / 4.9 \text{ cm}^2 = (15V * 5mA) / 4.9\text{cm}^2 = 15.3 \text{ mW/cm}^2$$

Testler sonucu elde edilen en yüksek değer, olması gereken maksimum değere oranlanırsa:

$$(0.381 / 15,3) * 100 = \% 2,5 \text{ ( Yüzde 2.5)}$$

Sonuçlara bakıldığında üretilen gücün olması gerekenin çok altında olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ölçülen akım değerlerinin teknik verilere göre çok düşük kalmasıdır. Bu durumun nedenleri sonuçlar kısmında detaylı olarak anlatılmıştır.

### 3.5. Çift Kath Piezoelektrik Üreteçlerle Güç Üretimi Denemesi

Bu çalışmadaki rüzgâr tüneli deneyleri sonucunda piezoelektrik malzemelerin rüzgâr karşısındaki tepkisi, voltaj ve akım üretimleri gözlemlenmiştir. Piezoelektrik malzemelerin kullanımı ve yapısı gereği diğer malzemelerden farklı olarak enerji üretimi için üst üste birbirlerini etkilemeden kullanılabilceği kanısına varılmıştır. Bu durumu gözlemleyebilmek için kullandığımız piezoelektrik üreteçlerden 2 tanesi birbiri üstüne gelecek şekilde sabitlenmiştir. Bu sabitleme işlemi için lehim yerlerinin baskıyı engellememesi için aradaki yüzeyi en iyi şekilde kaplayacak şekilde sıcak silikon

kullanılmıştır. En üst kısma ise konulacak ağırlıkların üreteçlere zarar vermesini engellemek için düz bir plastik malzeme yine sıcak silikon ile sabitlenmiştir. Kullanılacak ağırlıklar 100gr, 200gr, 500gr, 1000gr ve 2000gr olarak belirlenmiştir. Deneysel düzeneğine ait görsel Şekil 3.29’de verilmiştir.

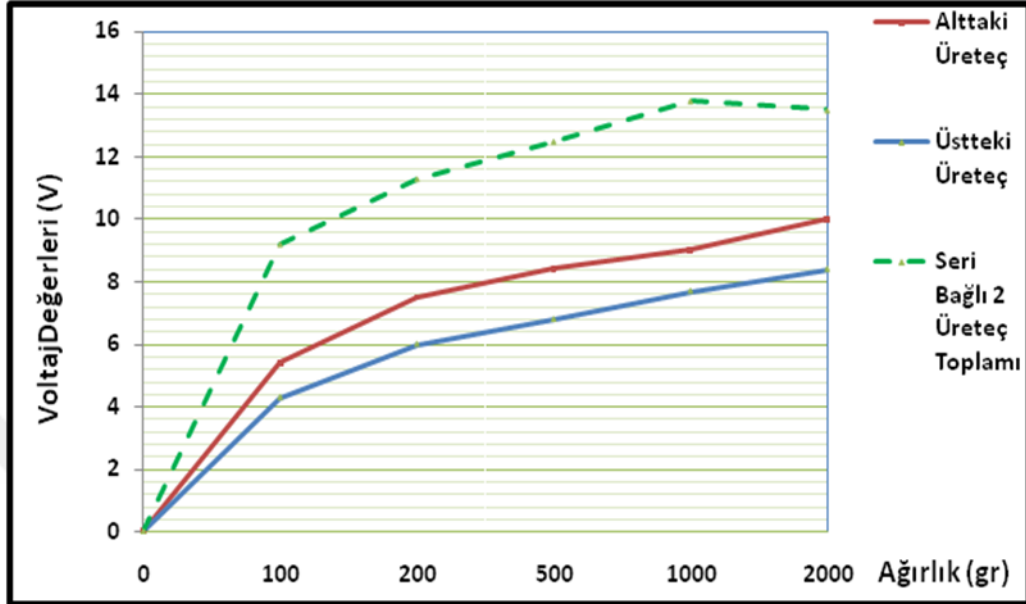


Şekil 3.29.Çift katlı piezoelektrik üreteç deney düzeneği.

Deneysel düzeneği oluşturduktan sonra ölçümlere voltaj üretimleri ile başlanmıştır. Ağırlıklar sırasıyla üst kısımdaki plastik zemine sürekli olarak konulup kaldırılarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Sürekli koyup kaldırılmasının sebebi, daha önceki rüzgâr deneylerindeki tecrübelerimize dayanarak sabit bir baskı dışında, sürekli değişen kuvvetlerin piezoelektrik üreteçler için daha uygun olmasıdır. Ölçümler alttaki üreteç, üstteki üreteç ve 2 üretecin toplamı olarak ayrı ayrı yapılmıştır. Voltajların toplamı alınırken üreteçler birbirine seri olarak bağlanmıştır. Voltaj ölçümünde üretilen maksimum değerler esas alınmıştır. Bu değerlere ait sonuçlar Şekil 3. 30’ da gösterilmiştir. Sonuçları volt(V) cinsindedir.

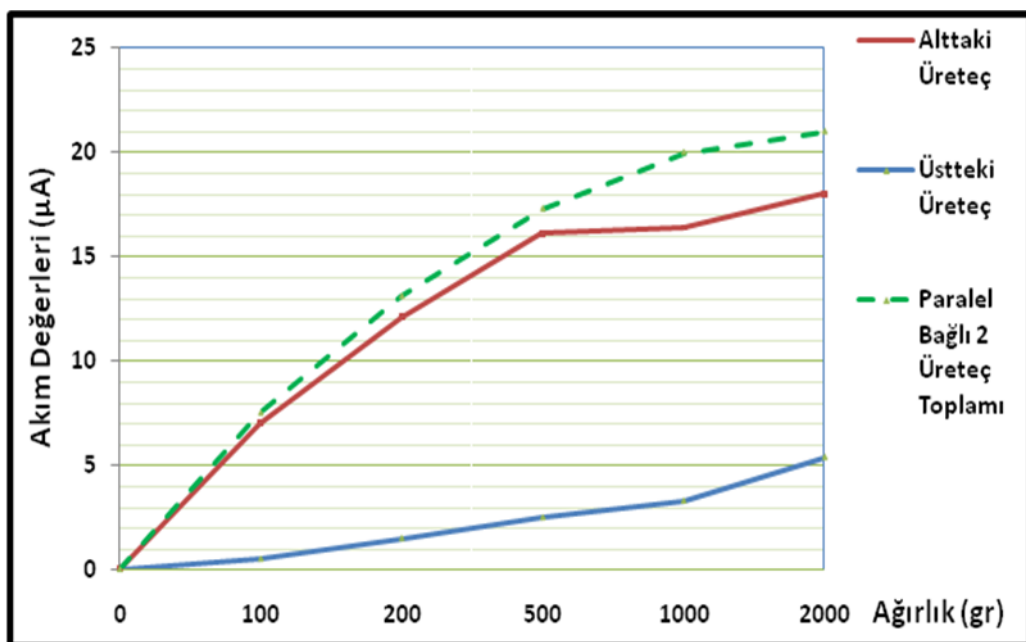
Voltaj ölçümleri sonucunda kullanılan ağırlıklar arttıkça üretilen voltaj miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Üreteçlerin değerleri birbirine yakın olsa da alttaki üretecin üsttekine nispeten bir miktar daha fazla voltaj üretmiştir. Seri bağlı haldeki 2 üretecin toplam voltaj üretimi ise 2 üretecin ayrı ayrı ürettikleri değerlerin toplamından bir miktar daha düşük kalmıştır. Bu durumun sebebi daha önce izah ettiğimiz gibi ağırlıklar değişken baskı oluşturmak adına üretecin farklı kısımlarına sürekli olarak konulup kaldırılarak değerler ölçülmüştür. 2 üretecin maksimum değer verdikleri noktalar farklı

olabileceğinden, toplam ölçümün maksimum verdiği değerler de 2 üretin toplamından nispeten düşük kalabilmektedir.



Şekil 3.30. Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin voltaj ölçümü sonuçları.

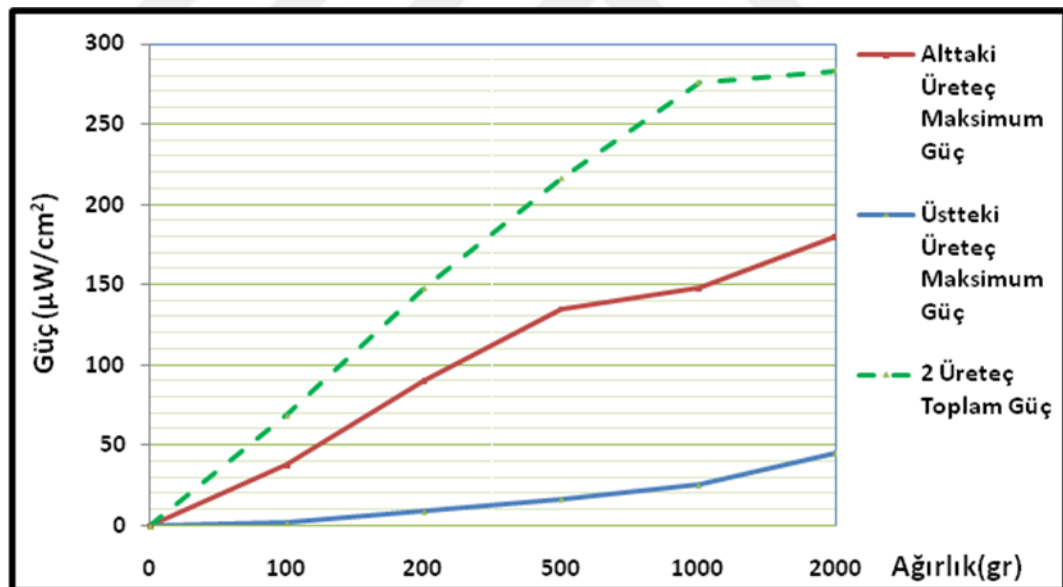
Voltaj ölçümlerinden sonra akım ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde voltaj da olduğu gibi ağırlıklar küçükten büyüğe sırayla konulup kaldırılarak, oluşan maksimum akım değerler gözlemlenmiştir. Sonuçlara ait grafik Şekil 3.31’de verilmiştir. Akım sonuçlar mikroamper( $\mu A$ ) cinsindedir.



Şekil 3. 31. Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin akım ölçümü sonuçları.

Akım ölçümleri sonucunda üst tarafa yerleştirilen piezoelektrik üreteçten çok düşük değerler ölçülmüştür. Bunun nedenin üretecin yerleştirilmesiyle veya ölçümle ilgili bir sıkıntı kaynaklandığı düşünülmemektedir. Böyle olması durumunda voltaj değerlerinin de düşük çıkması gerekirdi. Muhtemel nedeninin önceki deneyler sırasında üretecin zarar görüp özelliklerini kısmen yitirmiş olabileceği düşünülmektedir. Alt kısımdaki üreteç ise daha önceki deneylerimize yakın değerler vermiştir. Sonuç itibariyle paralel bağlanan 2 üretecin toplam akım değerleri de alttaki üretece yakın, daha önce voltaj ölçümünde de bahsettiğimiz sebeplerden dolayı, 2 üretecin ayrı ayrı değerlerinin toplamından da nispeten daha düşük değerlerdedir.

Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin güç analizlerine gelindiğinde, ölçülen voltaj ve akım değerleri çarpılarak alttaki, üstteki ve 2 üretecin toplam güç üretimi şeklinde hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Hesaplanan değerler mikrowatt/santimetrekare( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) cinsindedir.



Şekil 3. 32. Çift katlı piezoelektrik üreteçlerin güç analizleri.

Güç analizleri sonucunda üstteki üretecin akım değerlerinin düşük kalması gücünün de diğer üretece kıyasla düşük kalmasına neden olmuştur. 2 üretecin toplam güç değerlerine bakıldığında ise 2kg'lık bir baskı altında 283,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  seviyelerine çıkmayı başaramıştır.

## 4. BÖLÜM

### SONUÇLAR ve ÖNERİLER

#### 4.1. Sonuçlar

Rüzgâr tüneline piezoelektrik üreteçlerden elektrik üretme çalışması sonucunda ulaşılan maksimum güç 17m/s rüzgar hızında  $380.73\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 'dir. Kullanılan piezoelektrik üreteçlerin teknik verilerine göre  $15.3\text{mW}/\text{cm}^2$  güce kadar ulaşılabilmesi gerekmektedir. Bu sonuçlara göre üretimin verimliliği ancak %2,5 seviyelerinde kalmıştır. Bu durumun görünen nedeni teknik verilere göre 1mA seviyelerine kadar çıkması gereken akım değerinin maksimum  $34\mu\text{A}$  seviyelerinde kalmış olmasıdır. Test düzeneğinin yeterince ağır olmadığı düşünülerek yapılan kuleye ağırlık ekleme işlemi sonucunda da değerlerde beklenen yükselme gözlemlenmemiştir. Akım değerlerinin küçük olması sebebiyle kablolardaki iç dirençten kaynaklanabilecek kayıpları en aza indirmek amacıyla yapılan kablo kısalma işlemi de beklenen ölçüde sonuçlarda bir artış sağlayamamıştır. Ancak testler esnasında yapılan kırmızı led lamba yakma denemelerinde, anlık olarak lambada parıltılar gözlemlenebilmiştir. Bu durum gösteriyor ki, aslında üretilen elektriğin akım gücü mA seviyelerine çıkabilmektedir. Aksi takdirde ölçüm sonuçlarına göre hiçbir ışık alınamaması gerekmektedir. Kullanılan ölçü aletleri  $\mu\text{A}$  seviyelerinde akımları ölçebiliyor olsa da test düzeneğinden kaynaklanabilecek ön görülemeyen ve düzeltilemeyen sıkıntılardan kaynaklı olarak ölçümlerde tam olarak doğru sonuçlar elde edilememiştir. Yapılması gereken, testler sırasında piezoelektrik üreteçleri bilgisayar kontrollü ölçüm cihazlarına bağlayarak sonuçların kaydedilmesi ve değerlendirilmesidir. Ancak teknik imkânsızlıklardan dolayı maalesef ölçümleri bu şekilde gerçekleştirilememiştir. Piezoelektrik üreteçlerin çift katmanlı veya daha fazla katlı üst üste kullanılabilir olduğu da deneyler sonucunda gösterilmiştir.

## 4.2.Öneriler

Piezoelektrik malzemeler bilindiği üzere ve bu çalışmada bahsedildiği gibi birçok alanda kullanılıyor olsa da bu malzemelerin elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılması yeni ve geliştirilmeye açık bir alandır. Bununla ilgili bilimsel araştırmalar ve çalışmalarda artarak devam etmektedir[32]. Her geçen gün artan enerji ihtiyaçlarına, bu şekilde basit ve kullanışlı yöntemlerle çözüm üretebilmek, daha temiz ve sorunsuz bir gelecek için büyük umutlar vaat etmektedir. Kullandığımız herhangi düşmanın, sadece dokunuşunuzla görevini yerine getirebilmek için gerekli enerjiyi sağlayabilmesi, bu yöntemin kullanılacağı cihazlar için çok büyük tasarım kolaylıkları ve düşük enerji maliyetleri sağlayacaktır. Bu teknik taşınabilir cihazlara uygulandığında, dokunduğunuz tuşlarla veya cihazı elinizde tutmak için uyguladığınız kuvvetle kendi enerjisini üretebilen, pillere veya bataryaları ihtiyaç duymayan ya da en azından şarj gereksinimi olmadan kullanabileceğinizi cihazlar üretilebilir. Bu sayede, çevreyi en çok kirleten atıklardan olan pillerin olmadığı temiz bir dünya daha güzel ve yaşanabilir olacaktır.

Rüzgâr sapslarına geldiğimizde ise, Amerikan Massachusetts Institute of Science and Technology (MIT) gibi saygın bir üniversitenin onayını almış bir proje bizce de gelecek vadeden ve geliştirilmeye açık bir uygulamadır. Çalışmalar ve yeni projeler neticesinde, bu yöntemle ilgili olumlu sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Çünkü en yüksek maliyetler göz önüne alınarak yapılan hesaplamalarda bile bu proje rüzgâr türbinlerine kıyasla çok daha düşük maliyetlerle hayata geçirilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca kurulum ve bakım ihtiyaçlarının tamamının ülkenin iç piyasasından temin edilebilir olması da enerji konusunda dışa bağımlılığı azaltacak en önemli avantajlarından birisidir. Ayrıca sistemin türbinlere nazaran daha kolay kurulum ve daha az alan ihtiyacı ise kullanılabilirliğini artıracak başka bir yönüdür. Proje resminde Abu Dabi'deki kurulum yeri incelenirse, anayollar arasında kalan ve farklı kullanımlara imkân vermeyen ölü bir alan bile, istenilen ölçeklendirmede yapılabilecek rüzgâr sapsarı ile bir enerji üretim merkezi olabilmektedir. Böyle bir uygulama ile rüzgâr şartları elverişli olan tüm yolların, ışıklandırma ve sinyalizasyon gibi enerjiyi ihtiyaçlarının kendi üretimleriyle karşılanabilmesi mümkündür. Önemli diğer bir avantajı ise rüzgâr sapsarının tasarım itibarıyla gözü ve çevreyi rahatsız etmeyen yapılarıdır. Böyle olmasına rağmen, tasarımlarındaki küçük değişiklikler ile bu sapsar

çok rahat palmye ağaçlarına benzetilebilirler. Bu sayede insanların en yoğun kullandığı ortamlarda ya da doğal çevre şartları içerisinde, palmye bahçesi gibi çok hoş mimariye sahip enerji üretim santralleri kurmak, hayal olmanın ötesinde yakın gelecekte olabilecek uygulamalardır.

Piezoelektrik malzemelerle imal edilen rüzgâr sapları gibi projelerin, rüzgâr türbinlerinin verimli olmadığı türbülanslı akışlarda veya türbin kurulamayacak kadar küçük türbülanslı alanlarda kullanılabilir olması, bu malzemelerin en büyük avantajıdır.

Piezoelektrik malzemelerin diğer bir avantajı ise birbirlerini etkilemeden katmanlar halinde üst üste kullanılabilir olmasıdır. Çalışmalarımız sırasında ağırlık deneyleriyle de göstermeye çalıştığımız şekilde, birbirleri üzerine ağırlık yapmayacak şekilde yerleştirebilecek üreteçlerle, tek bir baskı veya kuvvetle birden fazla üreteçten aynı anda güç üretilebilmek mümkündür. Bu özelliği ile de özellikle zemine yerleştirebilecek projelerle, kaldırımlarda, araçların kullandığı yollarda, tren raylarının altında ve bu gibi daha sayılabilecek birçok alandan elektrik üretimi yapabilmek mümkündür. Günümüzde ve ilerleyen dönemlerde oldukça popüler olacak elektrikli araçların pillerinin, aracın tekerleğinin içine yerleştirilecek piezoelektrik malzemelerle şarj edilebilecek olması hayal olmanın ötesinde önümüzdeki yıllarda görülebilecek uygulamalardandır.

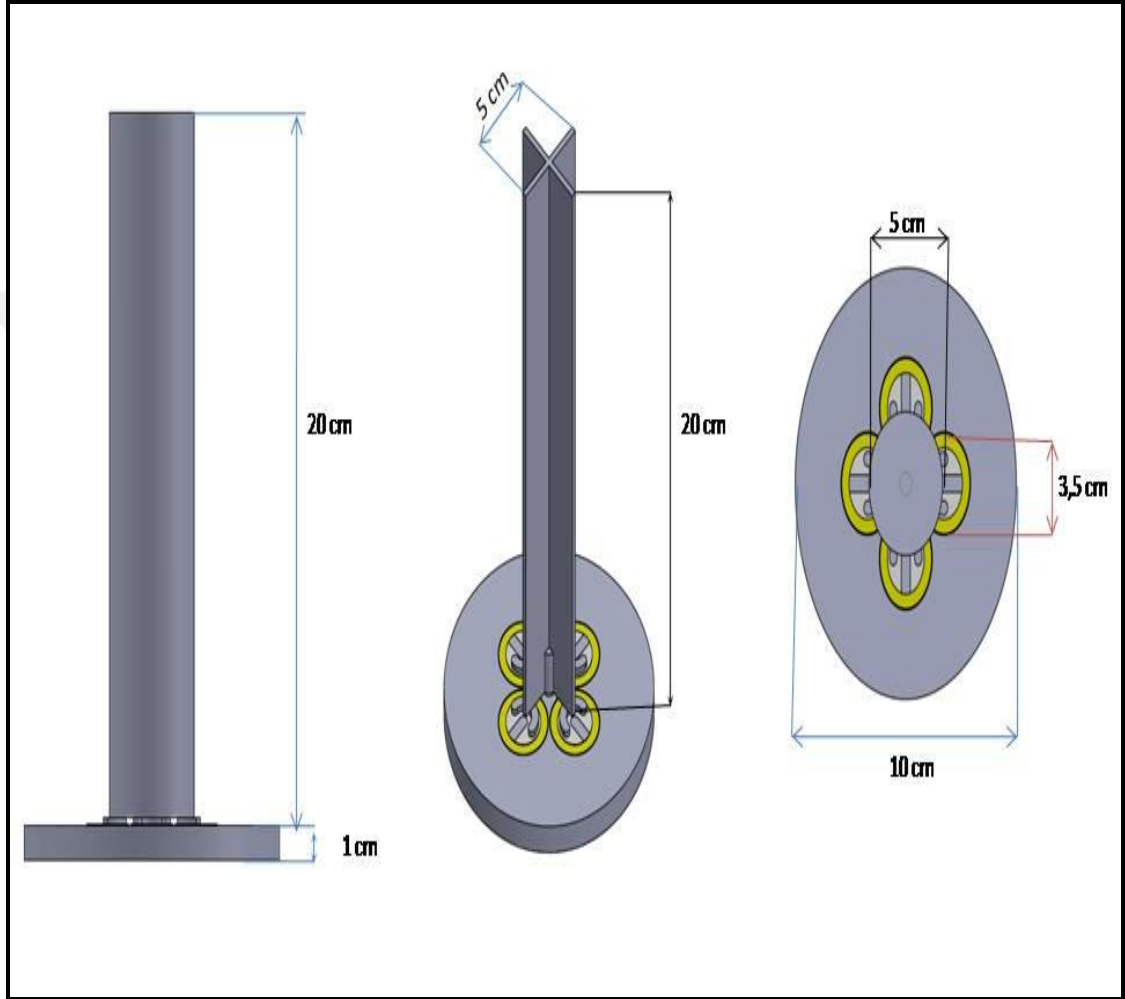
Sonuç olarak piezoelektrik malzemeler bu alanda çalışabilecek bilim insanları ve enerji üretimiyle ilgilenenler için gelecek vadeden bir malzemedir. Bu çalışmadaki temel amaç da bu malzemeleri daha yakından tanıtmak ve örnek bir uygulama ile bu konuya ilgiyi artırabilmektir. Bundan sonraki benzer projelere veya konuyla ilgili yapılabilecek farklı uygulamalara ve yaklaşımlar ilham verebildiysek çalışmamız amacına ulaşmış demektir.

## KAYNAKÇA

1. Kır a, B., eliktaŐ, M.S., 2013. Uluslar arası Patent ve Bilimsel alıŐmalar IŐıŐında Rüzgar Enerjisindeki Yönelimler. 9. Temiz Enerji Sempozyumu-UTES 2013, 25-28 Aralık 2013, Konya.
2. Karık, F., Sözen, A., İskender,  ., 2015. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinde Mevcut Durum. **Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, (1/2): 219-234.
3. Sönmez, F., 2012. AraŐtırmaya Göre Rüzgar Türbinleri Yarasaların Ciğerini Patlatıyor. (Web sayfası: <http://enerjienstitusu.com/2012/07/03/arastirmaya-gore-ruzgar-turbinleri-yarasalarin-cigerlerini-patlatiyor/>), (Erişim Tarihi: Nisan 2016)
4. Őenel, M.C., Koç, E., 2016. Rüzgar Türbinlerinde evresel Etkilerin Değerlendirilmesi. **Rüzgâr Enerjisi Wind Energy Magazine**,16(1):11-14.
5. G kınar, R.E., Uyumaz, A., 2008. Rüzgar Enerjisi Maliyetleri ve TeŐvikleri, ss. 699-706. 7. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu-UTES 2008, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
6. Karadeniz, Z.H., Güleryüz, İ.C., 2015. Çapraz AkıŐlı Rüzgar Türbini BaŐarımının İncelenmesi, ss. 87-96. 3. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, 8-10 Ekim 2015, İzmir.
7. Lippman, G. Annales de chimie et de physique. 1881, 24:145-178.
8. Voigt V.W.. Lehrbuch der kristallphysik, Teubner: Leipzig, 1910, p915.
9. Zhu, X., 2010. Piezoelectric Ceramic Materials: Processing, Properties, Characterization and Application. Nova Science Publishers Inc., New York, 63pp.
10. Özgül, M., Emanet, N., 2010. Sn Katkılı BaTiO<sub>3</sub> Piezo/Ferroelektrik Seramiklerin  retim ve Karakterizasyonu. (Web sayfası: <http://docplayer.biz.tr/12685766-Danisman-yard-doc-dr-metin-ozgul.html>), (Erişim tarihi: Temmuz 2016).

11. Alp, İ., 1998. Ultrases Dalgalarının Cevher Hazırlamada Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
12. PI Piezo Teknolojisi, 1992. Piezoelektrik Malzemeler (Web sayfası: <https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-materials/>), (Erişim tarihi: Ağustos 2017)
13. Kutluay, H., 2016. Kuvars Taşı Nedir, Özellikleri ve Çeşitleri. (Web sayfası: <https://www.makaleler.com/kuvars-tasi-nedir-ozellikleri-ve-cesitleri>), (Erişim tarihi: Kasım 2017).
14. Yazıcı, E.Y., Alp, İ., Yılmaz, A.O., Celep, Vieil, M., 2004. Piezoelektrik Teknoloji ve Piezo-Malzeme Olarak Turmalin, ss.279-285. 5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 2004, İzmir.
15. Çağatay, S., 1999. Piezoelektrik Seramikler. **Metarlarji Dergisi**,23 (121).
16. Erturk, A., Inman, D.J., 2011. Piezoelectric Energy Harvesting Modelin and Application. John Wiley&Sons Ltd.,New Jersey, 103pp.
17. Avşar, A.L.,Şahin, M., 2012. Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Enerji Hasatı. Savunma Teknolojileri Kongresi SAVTEK, 2012, ODTU Ankara.
18. Rocha, J.G.,Goncalves,L.M., Rocha, P.F., Silva, M.P., Lanceros-Mendez,S., 2010. Energy Harvesting From PiezoelectricMaterials Fully Integrated in Footwear (Webpage: [https://www.researchgate.net/publication/224574364\\_Energy\\_Harvesting\\_From\\_Piezoelectric\\_Materials\\_Fully\\_Integrated\\_in\\_Footwear](https://www.researchgate.net/publication/224574364_Energy_Harvesting_From_Piezoelectric_Materials_Fully_Integrated_in_Footwear))(Date accessed: Nisan 2016).
19. PI Piezo Teknolojisi, 1992. Piezo teknolojisi uygulamalar ve piyasalar(Web sayfası: <https://www.piceramic.com/en/applications/>), (Erişim tarihi: Ağustos 2017)
20. Doğanay, H., Coşkun, O., 2017. Enerji Kaynakları. Pegem Akademi Yayınları. Vadi Grup Ciltevi A.Ş., Ankara, 315s.
21. Kılıç, R.,Aslan, V., 2017. Yenilenebilen ve Yenilenemeyen Enerjinin İktisadi Büyüme Üzerindeki Etkisi: 28 OECD Ülkesi Üzerine Ampirik Bir Çalışma. **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi**,12(1):1-12.

22. Günüşen Varlık, İ., Yılmaz, A., 2017. Türkiye Ekonomisinde Yenilenebilir Enerji Projelerinin Gerçekleştirilmesinde Sorunlar ve Çözüm Önerileri. **Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar**,54(623):51-55.
23. Fırtın, E., 2009. Farklı Yükseklik ve Örnekleme Aralıklarındaki Rüzgar Verilerinin Rüzgar Potansiyeli Tahminine Etkisinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 78 s.
24. Omenetto, F., Kaplan. D., Yücel, T., 2011.Silk-based piezoelectric materials. US patent 9761789 B2, September 12, 2017.
25. Wang, Z.L., Song, J., 2006. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arraysıye. **Science**, 312 (5771):242-246.
26. Crawley, E.F., Luis, J., 1987.Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures. **AIAA Journal**, 25 (10):1373-1385.
27. Menge, G., 2011. Rüzgar gülü değil, rüzgar sapı. (Web sayfası: <http://www.teknokulis.com/haberler/guncel/2011/11/14/ruzgar-gulu-degil-ruzgar-sapi>), (Erişim tarihi: Ekim 2016)
28. Atelier DNA Design Laboratory, 2010. Winstalk. (Web sayfası: <https://atelierdna.com/2017/07/31/windstalk/>), (Erişim tarihi: Ekim 2016)
29. Alibaba.com, 1999. 35mm piezoelectric ceramic power module, new energy power generation module, PZT power chip, piezoelectric ceramic (Web sayfası: [https://www.alibaba.com/cache/piezoelectric-ceramic-type-piezoelectric-harvesting-energy\\_60358547342.html](https://www.alibaba.com/cache/piezoelectric-ceramic-type-piezoelectric-harvesting-energy_60358547342.html)), (Erişim tarihi: Temmuz 2016)
30. Karasu, İ., 2011. Düşük Reynolds Sayılı Akışlarda Kanat Profili Üzerinde Türbülansa Geçişin ve Laminer Ayrılma Kabarcığının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 89 s.
31. Durak, M.,Özer, S., 2008. Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulamaları. İmpress Yayınevi. Ankara, 543s.
32. Muensit, N., 2011. Energy Harvesting with Piezoelectric and Pyroelectric Materials. **Materials Science Foundations**, 72(1):2-69

**EKLER****EK 1.****Rüzgâr Saplarına Ait Teknik Çizimler**

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** İkrām BÜYÜKKESKİN  
**Uyruğu:** Türkiye (TC)  
**Doğum Tarihi ve Yeri:** 27.04.1988 - Konya  
**Medeni Durumu:** Evli  
**e-mail:** buyukkeskin@gmail.com  
**Yazışma Adresi:** Esenyurt Mah. Özgeçeçidi Sok. Hisar Konağı No:8/25  
 Melikgazi/KAYSERİ

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı	2018
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Elektrik/Elektronik Bölümü	2012
Lise	Anadolu Meteoroloji Meslek Lisesi, Ankara	2006

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2007-Halen	Kayseri Erkilet Meydan Meteoroloji Müdürlüğü	Rasatçı
2006-2017	Kayseri Pınarbaşı Meteoroloji Müdürlüğü	Rasatçı

### YABANCI DİL

İngilizce